

Carlos Torturella Valadão

**Sistema de Supervisão e Controle para
Interação Assistiva Humano-Robô**

Vitória, Brasil

2016

Carlos Torturella Valadão

Sistema de Supervisão e Controle para Interação Assistiva Humano-Robô

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Centro Tecnológico

Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Teodiano Freire Bastos Filho

Coorientadores: Prof. Dr. Anselmo Frizera Neto, Prof. Dr. Ricardo Carelli

Vitória, Brasil

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

V136s Valadão, Carlos Torturella, 1986-
Sistema de supervisão e controle para interação assistiva
humano-robô / Carlos Torturella Valadão. – 2016.
171 f. : il.

Orientador: Teodiano Freire Bastos Filho.

Coorientador: Anselmo Frizera Neto.

Coorientador: Ricardo Carelli.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Robótica. 2. Interface cérebro-computador. 3. Interação
homem-máquina. 4. Autismo – Interação social. 5. Sistemas
multimídia. 6. Controle automático. 7. Andador robótico. I. Bastos
Filho, Teodiano Freire. II. Frizera Neto, Anselmo. III. Carelli,
Ricardo. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro
Tecnológico. V. Título.

CDU: 621.3

Carlos Torturella Valadão

Sistema de Supervisão e Controle para Interação Assistiva Humano-Robô

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Vitória, Brasil, 04 de agosto de 2016:

Prof. Dr. Teodiano Freire Bastos Filho

Orientador

Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Anselmo Frizzera Neto

Coorientador

Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Ricardo Carelli

Coorientador

Universidad Nacional de San Juan

Prof. Dr. Jês Cerqueira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal da Bahia

Prof. Dr. Alberto Ferreira de Souza

Programa de Pós-Graduação em Informática

Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Evandro Salles

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. André Ferreira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal do Espírito Santo

Vitória, Brasil

2016

Este trabalho é dedicado a todas as pessoas com problemas de mobilidade e às crianças com o transtorno do espectro autista.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos os que me apoiaram nesta jornada do doutorado. Primeiramente a Deus, por toda força, fé e suporte que me deu durante este período do doutorado, e pelas pessoas que colocou no meu caminho, as quais me ajudaram muito.

A minha família, agradeço pelo apoio incondicional em todos os momentos, pela paciência nos momentos difíceis e pelas alegrias nos bons momentos durante esta etapa de minha vida.

A todos os meus amigos, em especial do Laboratório de Automação Inteligente (UFES) e do Instituto de Automática (UNSJ/Argentina), que por meio da amizade e carinho me estimularam muito para a realização desta tese, além de me auxiliarem de forma imensurável durante a realização desta pesquisa. O apoio de todos vocês foi fundamental para a realização desta tese de doutorado. Obrigado a todos vocês que nestes anos todos torceram por mim.

Aos meus orientadores e coorientadores, Professor Teodiano, Professor Anselmo e Professor Carelli por acreditarem em mim, pela paciência, pela sabedoria, por todo conhecimento que me passaram e por todo apoio que me deram neste período. Em especial agradeço ao Professor Carelli pelo seu apoio e amizade durante minha estadia em San Juan, Argentina, em 2011 e 2012.

Agradeço, também de forma especial, à Professora Eliete pelo carinho e pela ajuda na realização dos experimentos, redação dos artigos e apoio na pesquisa, o que enriqueceu bastante este trabalho.

Não poderia também deixar de agradecer aos voluntários dos experimentos, além dos profissionais da AMAES e do CREFES, por ajudarem nas sessões experimentais e na elaboração dos protocolos, e às agências de fomento CAPES (Brasil), FAPES (Brasil), CNPq (Brasil) e MINCyT (Argentina) pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Ahora voy a cambiar el idioma para español. Agradezco enormemente a todos los amigos que hice en San Juan en 2011 y 2012. Sus cooperaciones y apoyo fueron fundamentales para mi estancia allí en San Juan y para el desarrollo de mi investigación. En especial agradezco a Nora, del hotel Cerro Blanco, por la amistad.

Por fim, voltando ao Português, um muito obrigado a todos por me ajudarem nesta minha realização. O apoio, carinho e amizade de todos vocês foram fundamentais para que eu pudesse concluir a tese de doutorado e realizar este sonho. Muito obrigado a todos.

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos
não é senão uma gota de água no mar.
Mas o mar seria menor se lhe
faltasse uma gota”.*

(Madre Teresa de Calcutá)

Resumo

A proposta desta tese de doutorado é apresentar a construção de uma plataforma robotizada, a qual pode assumir duas configurações para dois propósitos distintos. Em ambas as configurações se usa como base o robô Pioneer 3-DX. As configurações do robô são intercambiáveis por meio da troca da estrutura adjacente ao robô, sendo que este último se mantém em ambas configurações.

A primeira configuração é a de um andador robótico para ajuda a pessoas com mobilidade reduzida. Uma estrutura feita em alumínio se conecta à estrutura do robô, e o sistema como um todo se transforma em um andador inteligente que possui sensores laser e ultrassom. Este andador é capaz de detectar a distância e o ângulo das pernas do usuário, mantendo ambas as medidas em um determinado valor, enquanto o usuário utiliza o sistema. Toda esta estrutura pode ser útil para melhorar a forma de caminhar de pessoas com mobilidade reduzida, bem como em tratamentos de fisioterapia. Além disso, também permite a pessoas que não podem suportar todo o peso nos membros inferiores a distribuir o peso entre as pernas e o andador.

A outra configuração que o robô pode assumir é a de um robô para assistência à interação social, com o qual crianças com autismo podem interagir. A ideia de utilizar robôs para interagir com autistas vem do conceito de que as crianças terão menos medo de interagir com o mesmo. Uma vez que se consiga uma melhoria na interação das crianças com o robô pode-se tentar propor novos tratamentos para o transtorno do espectro autista (TEA) e também pode ser um passo para uma melhor interação com humanos.

Para ambos os casos, há sistemas de controle, supervisão e segurança e uma interface que auxiliam a utilização o robô. Para o modo andador, foi desenvolvido um controle de formação entre um humano e o robô, sendo o humano líder da formação sem possuir nenhum sensor anexado a seu corpo. No modo de interação social foi utilizado controle manual e controle baseado em cinemática inversa, os quais garantiram a usabilidade do sistema. Além disso, neste último modo também foram utilizados sistemas multimídia para atrair a atenção das crianças com autismo.

Palavras-chave: Robótica, Interação Humana, Mobilidade.

Abstract

Robotics are widely applied in several areas, such as industrial production, toys, machinery, some commercial services and also health, the main focus of this work. Currently, several causes can be pointed out as the responsables for humans not being able to have adequate mobility and social interaction as well. Both mobility and interacion issues can impact negatively in the affected ones.

This work proposes a robotic platform, which can assume two different configurations. It is used the wheeled mobile robot Adept Pioneer 3-DX that is the core of both system configuration. Each system is mounted using different pheripheral devices and structures, but the robot is present in both.

The first configuration is a system that is used to help people with reduced mobility. An aluminum structure was made in order to turn the robot into a smart walker prototype. The idea is to use the whole device as an intelligent walker that is able to detect the distance and angle from the user's legs and keep these parameters at the same values while walking with the user. It also offers weight bearing and balance supports, since there is an aluminum structure that holds partially the weight from the user and there is the robot that helps with the propulsion.

The other proposed configuration is a friendly robot that can help autistic children to interact someway with the robot, as a social interaction robot. Since the robot is not a human and it is in a certain way more predictable than human beings, the children who suffer from ASD (Autism Spectrum Disorder) may feel more comfortable with the robot. The child-robot interaction can be a big step in the child's development and there is even the possibility of using robots as a way of helping children to interact with machines and further help the interaction with humans.

For both operation modes, there are control laws that were developed, such as the inverse kinematic controller for the system in the social interaction mode and the human-robot follower controller for the walker mode. Besides, there is a safety supervisor to ensure the users will not suffer any harm during the use of the system, in both modes. In addition, an interface common to both modes was developed to make the system easy to be used. For the social interaction mode, there is still a multimedia system that helps the children get entertained with the robot and pay attention to it.

Keywords: Robotics, Human-Robot Interaction, Mobility.

Resumen Extendido

La automatización y robótica han ampliado sus áreas de actuación y ahora no aparecen sólo en ambientes industriales, pero también en maquinarias, juguetes, dispositivos comerciales y en la salud, el foco principal de este trabajo. Hay distintas causas que llevan a la falta de movilidad humana o a la dificultad de interacción social, y ambas situaciones se muestran muy negativas para los afectados. Sin embargo, la robótica puede ofrecer un soporte para las personas afectadas por estas enfermedades y en esta tesis se propone una plataforma robotizada con configuraciones distintas, por medio de estructuras adyacentes y un robot móvil con ruedas (Pioneer 3-DX) como parte principal de ambas las soluciones. Así se puede intercambiar de una configuración a la otra solamente cambiando las estructuras adyacentes.

La primera configuración es de un andador robotizado para ayudar a las personas con movilidad reducida. Una estructura hecha en aluminio se conecta a la estructura del robot base y el sistema como un todo se convierte en un andador robotizado con sensores láser, ultrasonido y apoyos para las manos. Este andador puede detectar la distancia y el ángulo del usuario y, por medio de acciones de control en la velocidad del robot, hacer que la distancia y el ángulo entre ambos se mantengan fijos. Estas condiciones permiten ayudar a una persona con dificultades y marcha incorrecta a mejorar su forma de caminar. Además esta estructura presenta soporte de peso para la persona por medio de la estructura que se conecta al robot.

Otra configuración posible para el robot trata un problema distinto, que es la interacción social. Se propone una segunda configuración en que el robot tiene una pantalla, parlantes y una traje de un juguete para intentar ayudar a niños con autismo a interactuar con máquinas y así ayudarlos, más tarde, a interactuar con humanos. Debido a la previsibilidad de los robots los niños presentan un miedo menor a los robots que a los humanos, pero pueden ser un paso intermedio para que interactúen con humanos. En el futuro, se espera que esta plataforma pueda ser utilizada como tratamiento complementario para los niños con autismo y un avance para que ellos se puedan expresar y interactuar mejor con las personas en el medio en que viven.

Introducción

Hay muchos estudios relativos a la tecnología de asistencia para personas con discapacidad en todo el mundo. Algunos se basan en enfermedades relativas a la movilidad, mientras otros poseen el foco en el desarrollo de la parte cognitiva, del comportamiento y de las habilidades sociales). Hay también estudios relativos a la capacidad sensorial (ej.

investigaciones para ayudar las personas con discapacidades visuales y la cognición. Este tipo de estudio ayudan a mejorar la calidad de vida de las personas afectadas por las discapacidades dichas anteriormente.

La población mundial tiende a envejecer en casi todos los países con una participación de los mayores de 8% en 1950 para una proyección de 21% en 2050 ([United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2013](#)). En algunos países la población con edad superior a los 65 años ya pasa los 20%, como Japón, Italia y Alemania . Juntamente con el envejecimiento natural de la población aparecen las enfermedades asociadas, incluyendo aquellas que afectan la movilidad y fuerza ([MARTINS et al., 2012](#)). Además del envejecimiento, hay otras causas que pueden generar problemas de movilidad, como accidentes cerebro vasculares, trastornos neurológicos, problemas musculares y cardiovasculares y otros más que pueden afectar personas de cualquier edad, incluso los jóvenes ([MARTINS et al., 2012](#); [BRADLEY; HERNANDEZ, 2011](#)).

Para ayudar a estas personas que tienen movilidad reducida lograr vivir con mejor calidad de vida existen distintos dispositivos de soporte a la movilidad. Estos dispositivos pueden ser categorizados en dispositivos alternativos en que la persona se mueve sin utilizar las fuerzas residuales de los miembros afectados y los dispositivos aumentativos en que se hace necesario utilizar las fuerzas residuales ([FRIZERA et al., 2009](#); [MARTINS et al., 2012](#)). La utilización de la capacidad residual es propiciada por profesionales de la área de la salud, cuando posible, pues ayuda a no atrofiar los miembros afectados ([MARTINS et al., 2012](#)).

Ejemplos de los dispositivos alternativos son las sillas de ruedas y los vehículos guiados de forma autónoma. Ellos no necesitan una participación activa del miembro afectado ([MARTINS et al., 2012](#)). Estos dispositivos normalmente son indicados cuando no hay fuerza residual suficiente o esta no puede ser utilizada. Cuando posible, los indicados son los dispositivos aumentativos que aprovechan las capacidades que los miembros afectados todavía poseen para moverse ([LOTERIO et al., 2014](#)). Ejemplos son dispositivos como bastones, prótesis, ortesis y los andadores, siendo que este último es uno de los focos de esta tesis ([FRIZERA et al., 2009](#); [MARTINS et al., 2012](#)).

Por otro lado, también es importante el soporte para personas que poseen problemas de desarrollo social, incluyendo posible discapacidades cognitivas y de comportamiento. Por eso, hay investigaciones que tratan de esto tema y aquí en esta tesis hay un enfoque también en la interacción social para los niños con autismo. Para eso, se utiliza de robótica lúdica y de asistencia para ayudarlos a desarrollar sus capacidades sociales.

Tabla 1 – Andadores según la fuerza de reacción con el suelo.

Tipo del Andador	Características
Convencional	Andador de cuatro patas que ofrece mejor estabilidad, pero una marcha menos natural. Además es necesario que la persona tenga fuerza suficiente para subir y bajarlo en cada paso.
Ruedas Frontales	Este andador tiene dos ruedas en la parte frontal del andador y dos patas en la parte trasera. Tiene una estabilidad intermedia relativa a los otros dos andadores aquí mencionados.
<i>Rollator</i>	El andador tipo <i>rollator</i> tiene cuatro ruedas y es lo que ofrece la marcha más natural, pues no es necesario subir y bajar el andador a cada paso. En contrapartida, es necesario mucho control, pues este andador puede deslizarse libremente.



(a) Convencional



(b) Ruedas frontales



(c) *Rollator*

Figura 1 – Tipos de andadores de acuerdo con la reacción respecto al suelo.

Estado del Arte

Actualmente hay distintos modelos de andadores, incluso los robotizados para ayudar las personas con movilidad reducida en los miembros inferiores. La Tabla 1 y la Figura 1 resumen las estructuras de los andadores de acuerdo con las respectivas reacciones al suelo.

Relativo a la estructura del andador hay tres configuraciones posibles, de acuerdo con la reacción al suelo. Los andadores inteligentes, por su parte, utilizan dispositivos electrónicos, sensores y actuadores y por eso, normalmente, son do tipo *rollator*, que permite la utilización de motores y frenos. La Tabla 2 muestra algunos de los andadores de la literatura y una comparación con el andador de esta tesis doctoral.

Respecto a los robots de interacción social, hay algunos estudios que trabajan con robots para interacción con niños con autismo. Algunos tienen una forma humana, mientras

Tabla 2 – Andadores Inteligentes y sensores que utilizan.

Andador Inteligente	Sensores	Controladores
RT Walker (HIRATA; HARA; KOSUGE, 2004)	Sensor de fuerza/torque y <i>encoders</i>	Diversos algoritmos de control para movimiento (desvío de obstáculos, seguimiento de camino, entre otros)
GUIDO Smart Walker (RODRIGUEZ-LOSADA, 2008)	Sensores láser y de fuerza, <i>switches</i> , sonares y <i>encoders</i>	Control compartido
PAM-AID (MACNAMARA; LA-CEY, 2000)	Sensores de ultrasonido y láser	Control algorítmico
PAMM (DUBOWSKY et al., 2000)	Sensores de monitoramiento de salud, sensores externos, <i>encoders</i> y sensores de fuerza, entre otros	Control basado en admitancia
JARoW (LEE; OHNUMA; CHONG, 2010)	Sensores infrarrojo	Control algorítmico
iWalker (KULYUKIN et al., 2008)	RFID, <i>encoders</i> y sensores externos	Control algorítmico
UFES' Smart Walker (RODRIGUEZ et al., 2013)	IMUs, sensores láser y de fuerza	Control basado en fuerza y cinemática inversa
Andador presentado en esta tesis doctoral	Sensor láser, <i>encoders</i> y sensores de ultrasonido	Controlador basado en formación

otros imitan animales o no son bio-mimetizados. Ejemplos de robots que son utilizados con niños con autismo son el Keepon (KOZIMA; MICHALOWSKI; NAKAGAWA, 2009), PLEO (KIM et al., 2013), KASPAR (WAINER et al., 2014) y ROBUS (MICHAUD; CLAVET, 2001). La Tabla 3 muestra algunos de los robots y sus características respecto a la utilización para la interacción social.

Para efectos de comparación, esta tesis doctoral presenta el robot MARIA, que posee dispositivos multimedia y tiene una altura similar a la de los voluntarios que participaron de las pruebas. Además, este robot tiene un modo de auto-presentación que ayuda a los voluntarios a no tener miedo y acostumbrarse con el robot. Esto ayuda mucho la interacción en la segunda fase. El tamaño del robot es una diferencia a destacar comparado con los presentados en la literatura, pues según algunos estudios interactuar con algo similar en términos de tamaño es más interesante que interactuar con algo más pequeño (ROBINS; DAUTENHAHN; DUBOWSKI, 2006). En cambio interactuar con algo más grande puede generar miedo.

Estos robots son desarrollados de forma de llamar la atención del nos niños y hacerlos mirar hacia ellos. Eso es importante para un autista, pues la interacción social y el contacto físico y visual son tareas difíciles, pues normalmente ellos se encierran en un “mundo

Tabla 3 – Algunos robots utilizados en estudios con niños con autismo.

Referencia	Interacción con el robot
(WAINER et al., 2014)	KASPAR - El robot trabajó como un mediador ayudando el niño a interactuar con el mediador (interacción triádica), mientras jugaba un juego y también posibilitó una interacción diádica (entre el niño y el robot solamente), después de la interacción triádica. Eso muestra que el robot pudo ayudar a la interacción social del niño.
(SHAMSUDDIN et al., 2012)	NAO - El robot NAO ayudó a iniciar y mantener interacción social de un niño autista con otra persona.
(KIM et al., 2013)	PLEO - El robot pudo ayudar a un niño en edad escolar a mejorar su interacción y habla. La interacción con el robot resultó mejor que programas de computadora u otras personas intentando interactuar con él. Además, el robot pudo ayudar indirectamente al niño a desarrollar sus habilidades sociales para interactuar con otros humanos.
(KOZIMA; MICHALOWSKI; NAKAGAWA, 2009)	KEEPON - Los niños demostraron interés por el robot Keepon y les gustaron la interacción diádica (entre el robot y el niño) y hasta incluso la interacción triádica (con otro humano y el robot como mediador). A pesar de ser robot Keepon un robot complejo, la forma de interactuar con él fue simple y los niños no se sintieron enojados o cansados y, así, pudieron interactuar bien con el robot.
(ROBINS et al., 2004)	ROBOTA - Este robot tiene un aspecto de un muñeco y funciona como un mediador para promover la interacción triádica entre el niño y otro humano (normalmente profesores) con actividades de atención conjunta. A lo largo del tiempo los niños buscaron el robot para interactuar más y compartir las experiencias con los cuidadores y profesores.
(SIMUT et al., 2016)	PROBO - Este robot no funcionó como un mediador social, pero simula una interacción social directa con niños con autismo (como otros humanos harían). El aspecto del robot atraía las miradas de los niños, pero otras variables como atención conjunta no tuvieron gran diferencia entre los dos grupos (autista y desarrollo típico).

proprio” con poca interacción con su alrededor ([SCASSELLATI; HENNY; MATARIĆ, 2012](#); [KIM et al., 2013](#)).

En los experimentos hechos con estos robots se busca desarrollar y enseñar a los niños con autismo tareas sociales, atención conjunta y imitación.

Plataforma para Interacción Humano-Robot

La plataforma robotizada para interacción humano-robot es utilizada como si fuera una herramienta de fisioterapia para las personas con debilidades motoras y como un juguete para los niños con autismo. En la forma de andador robotizado la plataforma ofrece soporte físico y sistema para evitar colisiones.

Por lo tanto para esta misma plataforma hay dos aplicaciones distintas: (1) Para soporte a la movilidad a personas con discapacidades en los miembros inferiores y, (2) para interacción con niños autistas. En la primera aplicación, el robot recibe una estructura que puede conectarse a la estructura externa del robot y así formar un andador robotizado.

Dicha estructura es un andador de cuatro patas que fuera adaptado para tornarse un andador con cuatro ruedas. Las ruedas presentes en este soporte hecho para adaptación no interfieren de forma significativa en la estructura en general, pues las ruedas son libres y, siendo así, se preservan las restricciones no-holonómicas del robot que guía el movimiento del andador.

La Figura 2 muestra la estructura original del andador de cuatro patas y el andador robotizado, con detalle de las ruedas libres en lugar de las patas originales para que el robot pudiera funcionar como un andador inteligente.

En el modo de interacción social el robot es llamado MARIA (Figura 3), que es una sigla para “Mobile Autonomous Robot for Interaction with Autistics” (inglés), que se traduce Robot Móvil Autónomo para Interacción con Autistas.

Este robot tiene un disfraz de un muñeco robotizado colorido hecho con materiales blandos para evitar lastimar al niño si hay alguna colisión con el mismo. El sistema de control del robot y las reglas de seguridad no debe dejar que esto ocurra, sin embargo, por seguridad, son utilizados estos materiales blandos. Además, si el niño golpeara al robot en una parte que no puede ser detectada por el láser (y por tanto no se detendrá) el niño no se lastimaría por ser el material blando.

En la estructura interna del robot hay soporte para un monitor de 12”, parlantes y una



(a) Andador convencional



(b) *Smart Walker*

Figura 2 – Tipos de andadores.



Figura 3 – Robot MARIA para interactuar con niños que sufren del trastorno del espectro autista.

computadora embebida que controla la presentación de los vídeos que serán exhibidos para el niño durante las pruebas. Esta computadora embebida es controlada remotamente por el investigador por medio de un enlace VNC (*Virtual Network Computing*).

En las dos formas de operación, el robot utiliza el sensor láser para detectar la presencia del usuario o del niño con autismo. La forma de detectar se basa principalmente en la posición del punto más cercano dentro de la visión del sensor láser (modo interacción social) o de la detección de piernas (modo andador). Después de detectar la posición de la persona referente al robot, es posible hallar la distancia y ángulo del robot respecto al usuario.

Después de la etapa de sensado y de encontrar la posición del robot respecto al humano, se puede calcular la velocidad angular y lineal para que el robot se posicione a la distancia y el ángulo correcto respecto al humano.

Funcionamiento del Sistema

La plataforma robotizada funciona con el robot Pioneer 3-DX y con las estructuras adyacentes que son cambiadas de acuerdo con el modo de operación. Sin embargo, la interfaz y el *hardware* central son los mismos. El procesamiento de los controladores y de las reglas de seguridad es hecho en una computadora externa que transmite los datos por medio de la red Wi-Fi.

La computadora principal tiene un algoritmo que corre en MATLAB y por medio de una interfaz desarrollada en el Instituto de Automática (INAUT, Universidad de San Juan/Argentina), se puede hacer la comunicación del algoritmo con el robot. Así el robot envía datos acerca de los sensores (incluyendo el sensor láser) y recibe los comandos de velocidad.

La Figura 4 muestra gráficamente como se hace este tipo de comunicación.

Control

El control y supervisor de seguridad es el módulo que calcula la velocidad lineal y angular necesaria para que la plataforma robotizada pueda llegar a la distancia y orientación deseada relativa al usuario. Esto es igual tanto para el modo andador como para el modo de interacción social.

Hay tres tipos de control que pueden ser utilizados para el robot. Cuando en modo de interacción social se puede utilizar el controlador PID y el controlador de posición basado

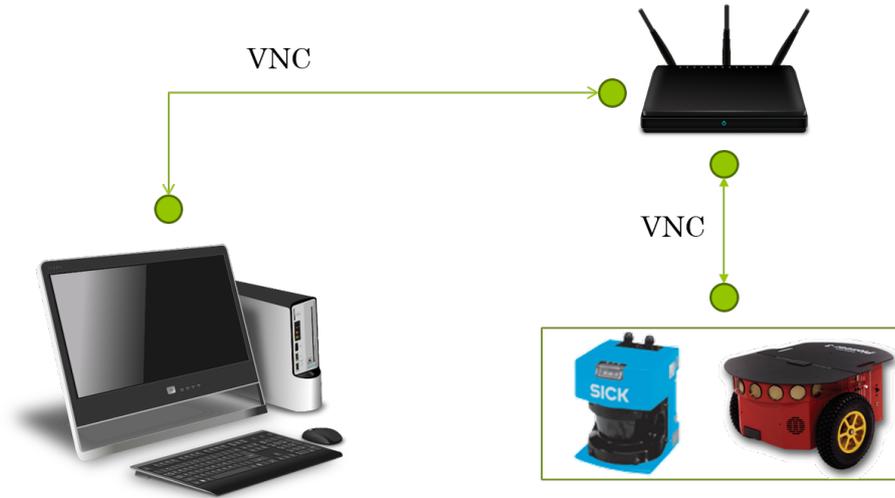


Figura 4 – Comunicación entre el robot, sensores y la computadora principal que hace el procesamiento.

en cinemática inversa. Sin embargo, si el robot está en el modo andador, los controles posibles de ser utilizados son el controlador PID y un controlador de formación (basado en el estudio (ROBERTI et al., 2011)).

El modelo cinemático del robot para el modo andador está mostrado en las ecuaciones 1, 2, y 3.

$$\dot{x}_r^h = v_r^0 \cdot \cos \alpha + \omega_h^0 \cdot d \cdot \sin \theta \quad (1)$$

$$\dot{y}_r^h = v_r^0 \cdot \sin \alpha + \omega_h^0 \cdot d \cdot \cos \theta \quad (2)$$

$$\dot{\alpha} = \omega_r^0 - \omega_h^0 \quad (3)$$

Los controladores utilizados para el andador fueron el controlador PID y el controlador de formación. Las ecuaciones del controlador PID están exhibidas en 4 y 5.

$$v_d = k_{d_1} \cdot \tilde{d} + k_{d_2} \cdot \dot{\tilde{d}} + k_{d_3} \cdot \int_0^t \tilde{d} \cdot dt \quad (4)$$

$$\omega_d = k_{\theta_1} \cdot \tilde{\theta} + k_{\theta_2} \cdot \dot{\tilde{\theta}} + k_{\theta_3} \cdot \int_0^t \tilde{\theta} \cdot dt \quad (5)$$

El controlador de formación tiene en cuenta los datos de velocidad del usuario y, por lo tanto, es más complejo. La Figura 5 muestra el diagrama utilizado para desarrollar el controlador.

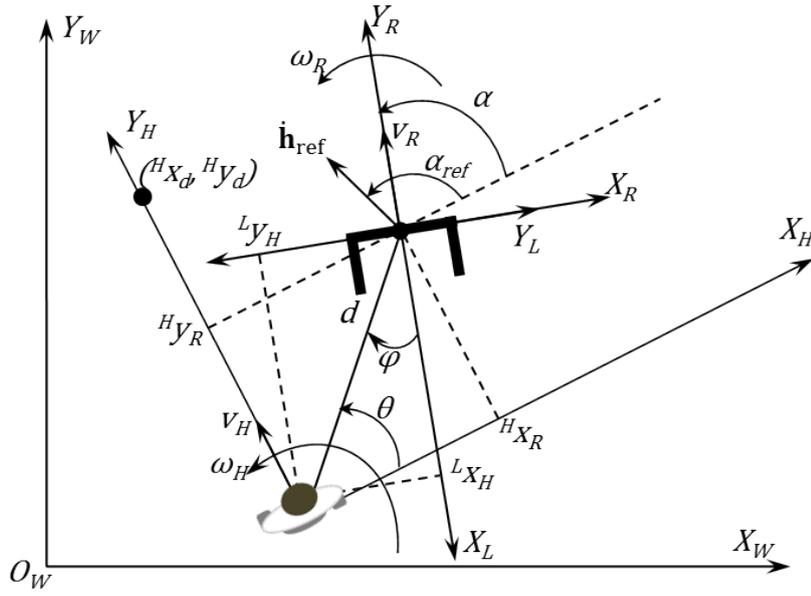


Figura 5 – Diagrama del andador robotizado para el control de formación.

Las salidas del controlador están presentadas por las ecuaciones 6 y 7.

$$v_c = |\dot{\mathbf{h}}_{ref}| \cos \tilde{\alpha} \quad (6)$$

$$\omega_c = k_\omega \tilde{\alpha} + \dot{\alpha}_{ref} + \omega_h \quad (7)$$

Para el robot en el modo MARIA, el modelo es más sencillo y es utilizado un controlador PID y otro de posición basado en cinemática inversa.

El diagrama utilizado para desarrollar este último controlador está mostrados en la Figura 6 y tiene su modelo cinemático directo descrito en las Ecuaciones 8 y 9.

$$\dot{d} = -v \sin \theta \quad (8)$$

$$\dot{\theta} = \omega + \frac{v \cdot \sin \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right)}{d} \quad (9)$$

Este ultimo controlador tiene como leyes de control las Ecuaciones 10 y 11.

$$v = \frac{-k_d \tilde{d}}{\sin \theta} \quad (10)$$

$$\omega = -k_\theta \cdot \tilde{\theta} + \frac{v \cdot \cos \theta}{d} \quad (11)$$

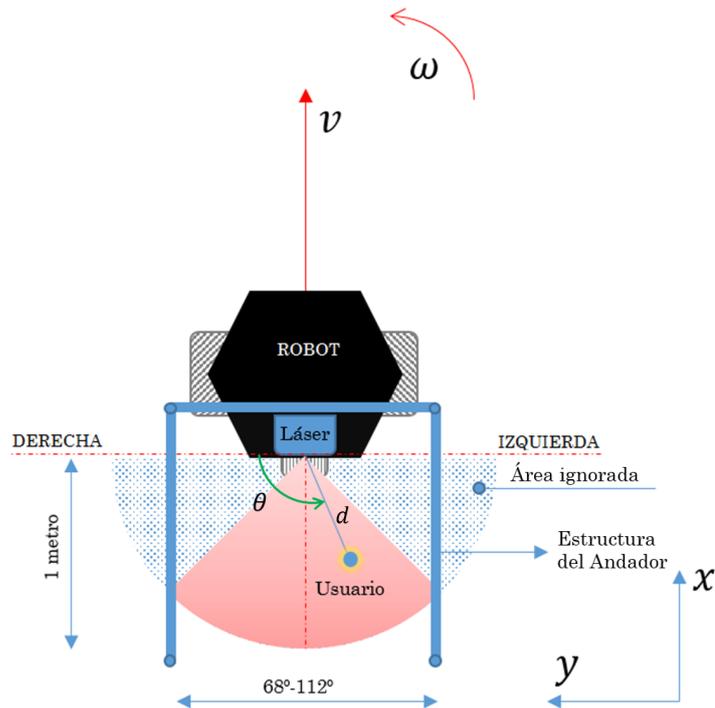


Figura 6 – Diagrama del andador robotizado. Las referencias “derecha” y “izquierda” son relativas al sensor láser. El ángulo θ es medido desde la derecha del sensor láser. La distancia d es la distancia entre el usuario y el sensor láser.

Supervisor de Seguridad

Hay también un supervisor de seguridad que informa y alerta posible colisiones y puede cambiar la salida de control, reduciendo la velocidad o deteniendo el robot. Lo más importante para el supervisor de seguridad es garantizar que no habrá colisiones con el niño o con el usuario del andador. Para el caso del usuario del andador, también se considera la detección de las piernas, pues si no fueran detectadas ambas piernas, el robot se detiene pues puede haber ocurrido una caída del usuario.

El supervisor de seguridad también evita que el robot llegue muy cerca del niño, haciéndolo detenerse antes si traspasa una distancia mínima. La velocidad del robot también es controlada en el caso del robot en el modo MARIA. Diferente del modo andador, el robot así configurado puede moverse hacia el frente o hacia atrás. La Tabla 4 muestra las reglas de seguridad, de acuerdo con el modo de operación del robot.

Métodos para Evaluaciones

En algunas pruebas se tuvo la participación de voluntarios y en otras sólo se probó la utilización de la plataforma con los controladores. Para las que tuvieron voluntarios fue posible la utilización de escalas *System Usability Scale* (SUS), *Goal Attainment Scale* (GAS) y Likert.

Tabla 4 – Reglas de seguridad para la plataforma robotizada.

Regla	Modo	Situación	Acción
#1	Andador	Sólo se detecta una pierna	Detiene el andador e incrementa el contador de seguridad
#2	Andador	Velocidad del controlador superior a la permitida	Limita la velocidad
#3	Andador	Velocidad del andador negativa (camina hacia atrás)	Detiene el andador
#4	Andador	Obstáculos	Detiene el andador si encuentra un obstáculo a menos de 50 cm adelante
#5	MARIA	Robot muy cerca del niño	Aleja el robot
#6	MARIA	Robot muy lejos del niño	Aproxima el robot
#7	MARIA	Robot no detecta el niño	Robot no se mueve
#8	Ambos	Pérdida de conexión WiFi	Alarma
#9	Ambos	Botón de Emergencia Interfaz	Detiene el robot
#10	Ambos	Limite de tiempo	Detiene el robot

Tabla 5 – Preguntas de la escala SUS.

Numero	Afirmaciones
#1	Me gustaría utilizar este sistema con frecuencia.
#2	El sistema me pareció que es innecesariamente complejo.
#3	El sistema me pareció fácil de usar.
#4	Creo que voy a necesitar el apoyo de una persona técnica para poder utilizar este sistema.
#5	Me parece que las diversas funciones de este sistema están bien integradas.
#6	Pienso que hay demasiada inconsistencia en este sistema.
#7	Me imagino que la mayoría de la gente aprende a utilizar este sistema muy rápidamente.
#8	Me pareció que el sistema es muy complicado de usar.
#9	Me sentí muy seguro en usar el sistema.
#10	Creo que tendré que aprender muchas cosas antes de que pudiera utilizar este sistema.

La escala SUS, que traduce por Escala de Usabilidad del Sistema, fue desarrollada en 1988 por un funcionario de *Digital Systems* y era inicialmente utilizada para evaluar la utilización de *softwares* por usuarios. Sin embargo, como las preguntas son amplias, esta escala puede ser utilizada para otros tipos de sistemas. Esta escala consiste en 10 preguntas estandarizadas y de acuerdo con las respuestas que pueden variar desde “muy de acuerdo” y “muy en desacuerdo” es posible calcular la usabilidad del sistema. Las preguntas de la escala SUS están en la [Tabla 5](#).

Al final se suma el puntuación y se puede calcular un puntaje final dado por la ecuación [12](#):

$$T = 2,5 \cdot \sum(\text{impares} - 1) + (5 - \text{pares}) \quad (12)$$

Es importante notar que aún que la puntuación T cambia entre 0 y 100, esto no sigue la escala de porcentaje. Hay una gráfica de conversión de porcentaje para el SUS, de modo que el 50% es el valor 68 en la escala SUS (BROOKE, 2013). De forma general, valores cerca de 68 están próximos al promedio, mientras valores muy abajo de 68 son valores que indican que la usabilidad no es buena y valores superiores a 68 indican buena usabilidad.

La escala GAS, tiene como objetivo convertir las tareas que deben ser hechas con el dispositivo y ayudar a entender si el usuario consigue cumplirlas bien o si tiene dificultad. Para eso, se calcula un puntaje que varía desde -2 (cuando la tarea no es cumplida o si es cumplida con poco éxito) hasta +2 (cuando se cumple de forma extraordinaria). La línea base para cada objetivo de la tarea es cero. Por lo tanto, la media de cada tarea, en términos de puntuación es 0. Para llegar a un valor final con n objetivos dentro de una tarea T, se utiliza la Ecuación 13 (KRASNY-PACINI et al., 2013).

$$T = 50 + C_n \sum_{i=1}^n g_i, \quad (13)$$

donde T es la puntuación general (incluyendo todos los objetivos), C_n es un índice utilizado para correlacionar n tareas. En el caso de tres tareas $C_3 = 4,23$ y para dos tareas $C_2 = 6,2$, según (KRASNY-PACINI et al., 2013).

Las Tablas 6 y 7 muestran la evaluación de calidad de acuerdo al cumplimiento de los objetivos, y la puntuación correspondiente para los dos modos del robot.

Por fin, la escala Likert fue utilizada para evaluar cómo los usuarios se sintieron utilizando el robot MARIA. La escala Likert sirve para mirar numéricamente datos cualitativos. Es similar a la escala SUS, pero no tiene una puntuación final y tampoco las preguntas son estandarizadas. En esta tesis doctoral había varias afirmaciones y la frecuencia con que ellas ocurrían (1-Nunca; 2-Raramente, 3-Ocasionalmente, 4-Frecuentemente y 5-Siempre). La Tabla 8 exhibe las afirmaciones utilizadas en Likert. Las siglas representan la identificación de los niños.

Pruebas y Resultados

Para cada una de las aplicaciones del robot móvil fueron hechos experimentos. Primeramente, en el caso del andador robotizado adaptado fueron hechas pruebas utilizando tres

Tabla 6 – GAS para el modo interacción social.

Calidad	Puntos	Mirar el robot	Tocar el robot	Imitar el mediador
Mucho peor	-2	Mirar el robot por lo menos 30 segundos y sentir miedo	Quedarse alejado del robot y no tocarlo	Mantenerse sentado, aún que el mediador lo estimule a interactuar con el robot
Peor	-1	Mirar el robot por lo menos 30 segundos y no presentar ninguna reacción	Tocar el robot por lo menos 5 segundos	Levantarse y no demostrar ninguna voluntad en moverse, aún que estimulado por el mediador
Esperado	0	Mirar el robot por más de 30 segundos y mantenerse mirando al monitor, pero sin interés	Tocar el robot por más de 5 segundos	Hacer el movimiento de interacción exhibido por el mediador por lo menos 20 segundos
Mejor	+1	Mirar el robot por más de 30 segundos y prestar atención al monitor	Tocar el robot por más de 5 segundos y prestar atención al monitor	Hacer movimientos de interacción con el robot, como mostrado por el mediador por más de 20 segundos
Mucho Mejor	+2	Mirar el robot por más de 30 segundos y moverse en su dirección	Tocar el robot por más de 5 segundos y tentar interactuar con el robot	Hacer el movimiento de interacción con el robot, como mostrado por el mediador e imitar el robot a su lado

Tabla 7 – GAS para el modo andador.

Calidad	Puntos	Adaptación al Andador	Compatibilidad de Velocidad
Mucho peor	-2	Más de dos minutos para adaptación y, aún así, usa de forma incorrecta el andador	Marcha discontinua durante el uso del andador
Peor	-1	Más de dos minutos para adaptación y uso correcto del andador	Velocidad de la marcha asistida más baja que velocidad de la marcha libre
Esperado	0	Menos de dos minutos para adaptación y uso correcto del andador	Velocidad de la marcha asistida igual a la de la marcha libre
Mejor	+1	Menos de un minuto para adaptación y uso correcto del andador	Velocidad de la marcha asistida más alta que la de marcha libre
Mucho mejor	+2	Menos de 30 segundos para adaptación y uso correcto del andador	Velocidad de la marcha asistida igual a la velocidad límite del andador

Tabla 8 – Cuestionario utilizado en la escala de Likert. TEA1 hasta TEA5 son los niños con autismo que participaron de las pruebas.

Afirmaciones	TEA1	TEA2	TEA3	TEA4	TEA5
El niño atendió a los comandos del mediador	2	5	4	3	4
El niño no tuvo miedo durante la sesión	5	1	3	3	2
El niño no sintió repulsa por el robot	5	1	2	3	1
El niño se ha puesto agitado	1	3	4	2	4
El niño demostró alegría	1	4	5	2	5
El niño habló	3	3	2	4	1

tipos de controladores: PID, control de posición no lineal basado en cinemática inversa y control de formación. Para el primer control, hubo un grupo de voluntarios saludables (grupo control) y grupo de personas que habían sufrido accidente cerebral vascular y presentaban hemiparesia en los miembros inferiores.

Pruebas con el andador

Las pruebas con el andador robotizado consistían en caminar tres veces un trayecto de 10 metros. El usuario caminaba 10 metros, volvía 10 metros y otra vez caminaba 10 metros. Era permitido parar y descansar entre una caminata y otra hasta que se sintiera bien otra vez para hacer el camino.

Los resultados fueron considerados buenos para el controlador PID. La puntuación SUS y GAS con el grupo control fue 96.25 y 68.55, respectivamente. Para el grupo de 2 voluntarios que habían sufrido accidente cerebro vascular y tenían marcha hemiparética, la puntuación SUS y GAS fue, respectivamente, 73.75 y 59.4. Eso muestra que el andador adaptado es una potencial herramienta para ayudar a la terapia de personas con dificultades motoras en los miembros inferiores.

Los resultados de la escala SUS fueron superiores a 68, lo que indica que el andador fue avalado como útil en el cuestionario de usabilidad. Con respecto al GAS, muchos del grupo con hemiparesia, podían caminar más rápido que la velocidad máxima del andador (0,5m/s) y, por eso, tuvieron que bajar la velocidad natural. Los valores del GAS para ambos grupos fueron superiores a 50, lo que muestra que los voluntarios pudieron completar las tareas de forma satisfactoria.

En cuestionarios y entrevista posterior al experimento, ambos los grupos relataron más facilidad de locomoción en términos de estabilidad, aún que la velocidad tuvo que ser reducida. En especial, el grupo pos-ACV, dijo que el balanceo y equilibrio fueron mejores comparados a la marcha libre y por eso se sintieron más seguros.

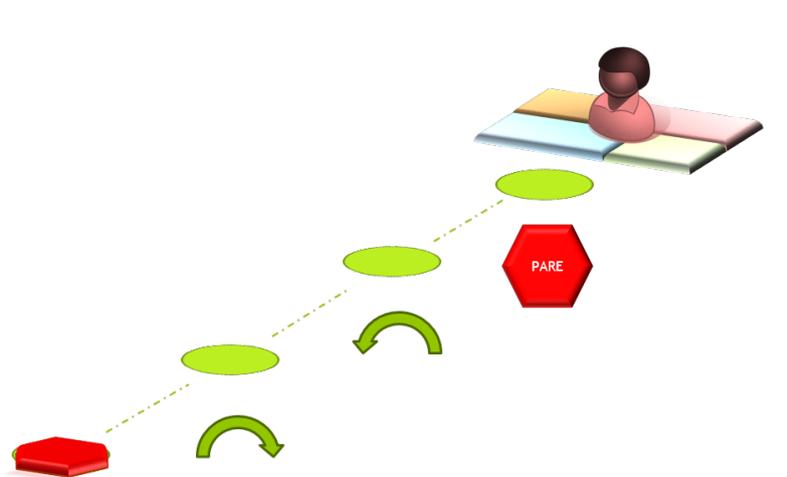
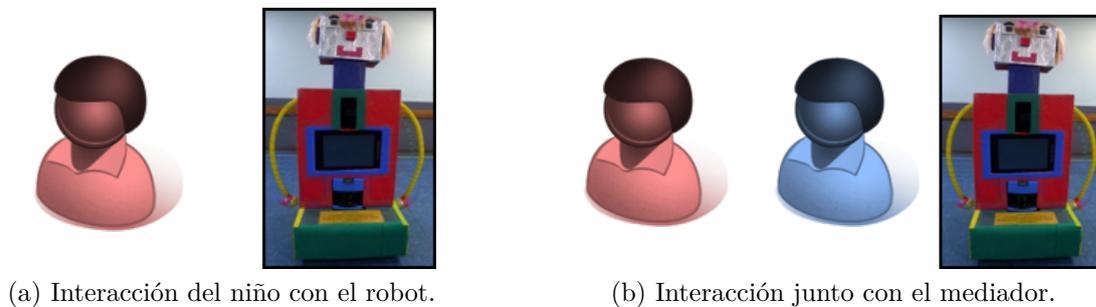


Figura 7 – Movimiento del robot en la Fase 1.



(a) Interacción del niño con el robot.

(b) Interacción junto con el mediador.

Figura 8 – Tipos de interação na Fase 2.

Pruebas con el robot MARIA

Para las pruebas hechas con el robot en el modo MARIA fue utilizado un control remoto. Tanto voluntarios con y sin autismo participaron en las pruebas. Los criterios de exclusión fueron no tener fobias u otros trastornos psicológicos, tener edad entre 7 y 8 años y los padres tendrían que estar de acuerdo con el término libre y esclarecido aprobado por el comité de ética de la Universidad Federal del Espíritu Santo (UFES/Brasil).

Las pruebas consistían de dos fases: la primera era una auto-presentación en que el robot caminaba hasta el niño y éste quedaba detenido en una parte del aula que el robot no iba a alcanzar. Esto era hecho para ayudar al niño a acostumbrarse al robot. En esta fase se observaba el tiempo en que el niño miraba hacia el robot. La Figura 7 exhibe un dibujo del movimiento del robot.

La otra fase, era la interacción entre el niño y el robot, junto con el mediador. La cantidad de veces que el niño tocaba el robot e imitaba al mediador era la forma de evaluar el éxito de la prueba. La Figura 8 muestra un dibujo conceptual de la interacción en esta fase.

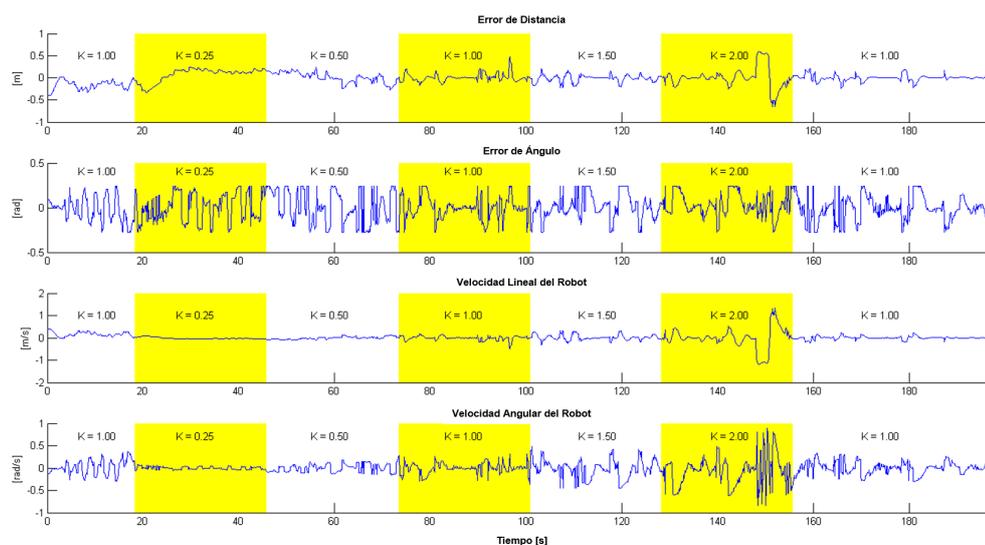


Figura 9 – Controlador de cinemática inversa con variación de ganancia durante la prueba.

Auto presentación automatizada

Fue hecha una prueba con el robot con un camino programado para hacer la auto-presentación sin un control remoto. Los resultados fueron exitosos y el robot paró exactamente a 30cm de distancia del niño. El camino es el mismo que está representado en la Figura 7, pero hecho de forma automatizada, sin control remoto manual.

Control basado en cinemática inversa para el robot MARIA

Fueron hechas pruebas con el robot MARIA con el control basado en cinemática inversa, con los investigadores del laboratorio. Los resultados fueron buenos, pues los errores llegaron a valores muy bajos y quedaron acotados, así como se esperaba. En estas pruebas no había movimiento definido, el usuario sólo tenía que aproximarse y alejarse del robot haciendo como se fuera un juego.

La Figura 9 se detalla las variables de control, incluyendo las variaciones de las ganancias que puede ser hecha por el mediador (el control sigue automático, pero la variación de las ganancias de acuerdo con la reacción del niño puede ser hecha manualmente). Aún que se hagan variaciones en la ganancia del controlador de cinemática inversa, el robot logra mantener la estabilidad (el promedio de los errores de distancia y ángulo tienden para cero a lo largo del tiempo)

Control basado en formación para el andador

El controlador basado en formación fue probado con tres caminos distintos. La recta simple (sin obstáculos), la recta con obstáculos y, finalmente, la curva de Lemniscata, que excita

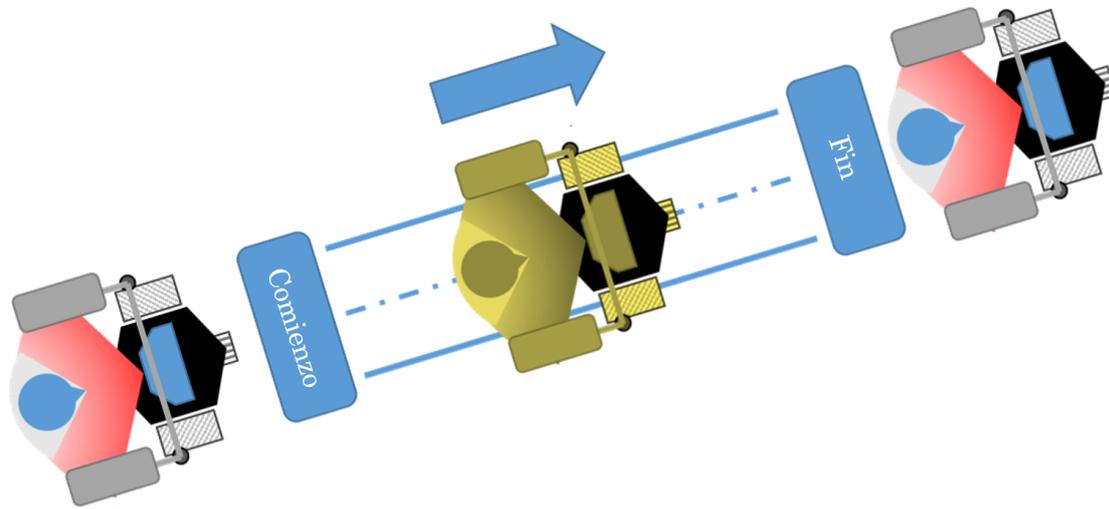


Figura 10 – Dibujo del camino en línea recta sin obstáculos.

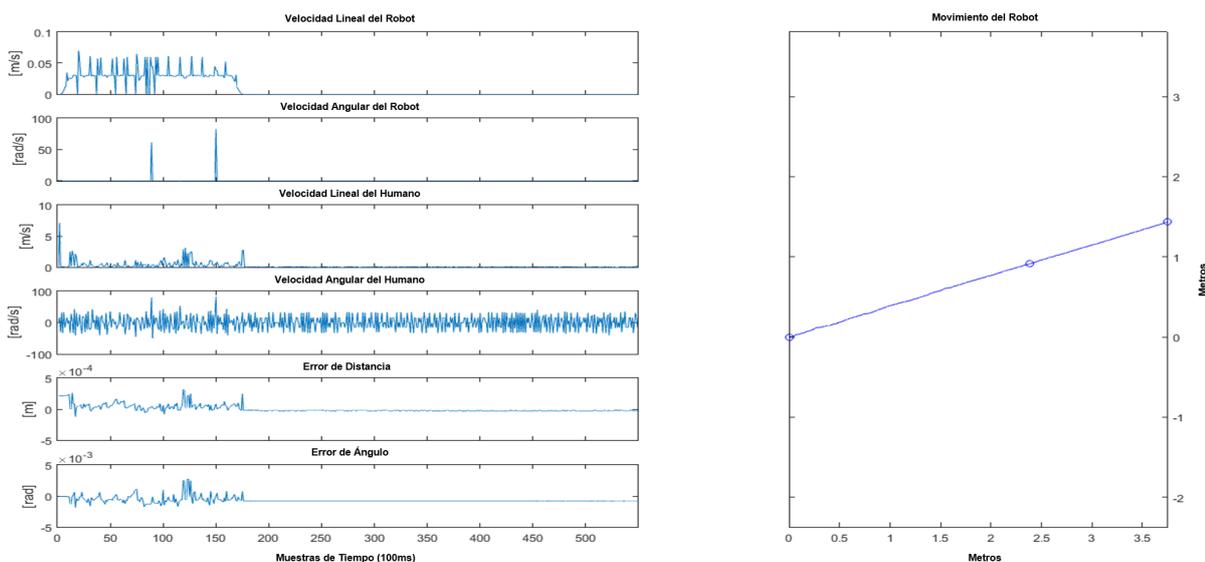


Figura 11 – Datos del camino en línea recta sin obstáculos.

mucho la dinámica del controlador.

El diagrama de la prueba sin obstáculo y los resultados están representados en las Figuras 10 y 11. Se observa que los errores promedios son de 0,0009m para el error lineal y -0,04rad para el error angular.

El diagrama de la prueba con obstáculo y los resultados están representados en las Figuras 12 y 13. El robot se detenía cuando había un obstáculo a 50cm del robot y sólo volvía a

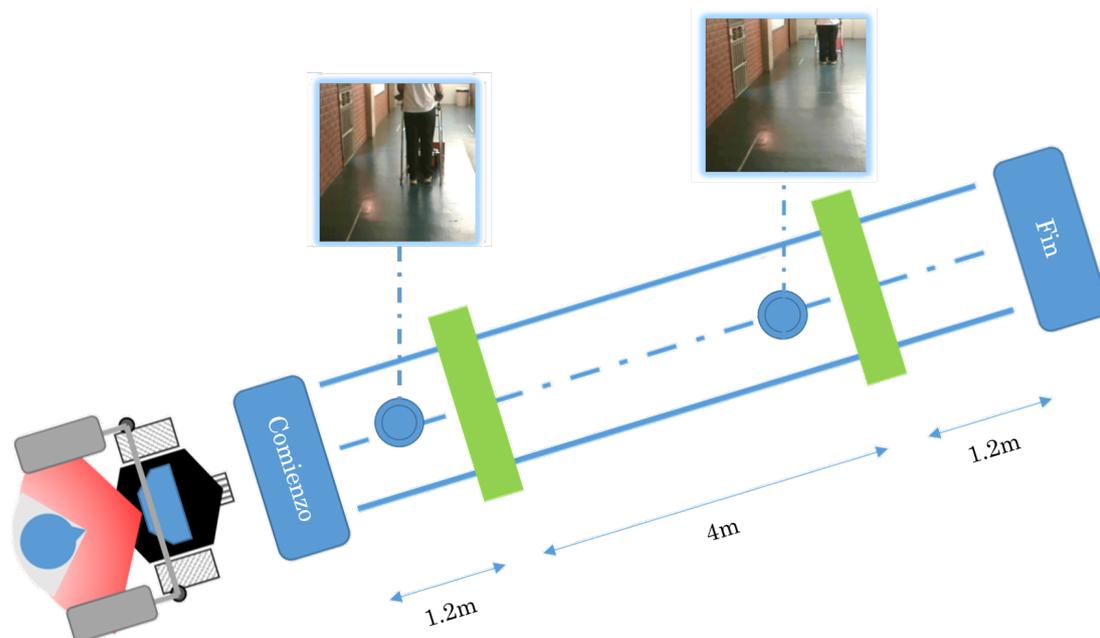


Figura 12 – Dibujo del camino con obstáculos.

andar cuando este obstáculo no era más detectado. Con eso, era hecho un sistema para evitar colisiones. Los errores medios son de 0.05m para el error lineal y -0.02rad para el error angular.

Finalmente la curva de Lemniscata era utilizada para probar la capacidad del controlador de soportar variaciones bruscas que excitan mucho la dinámica del sistema. El camino hecho con algunas fotos y los resultados están exhibidos en las Figuras 14 y 15. Los errores medios son de 0.02m para el error lineal y -0.08rad para el error angular.

Discusiones

Los controladores presentaron buen desempeño en ambas aplicaciones. Las pruebas con voluntarios fueron hechas utilizando un controlador PID (para el modo andador) y con el controlador manual (para el modo de interacción social).

En el modo andador, trajo más capacidad de balanceo y firmeza para los usuarios tanto del grupo control como para el grupo que sufría de hemiparesia. Aún que la velocidad con el andador se mostró más reducida, los voluntarios dijeron que la capacidad de estabilidad y la seguridad mejoró mucho.

En el modo interacción social, el robot representó para 4 niños de un total de 5, una herramienta que llamó la atención por su aspecto lúdico. Además, estos cuatro niños

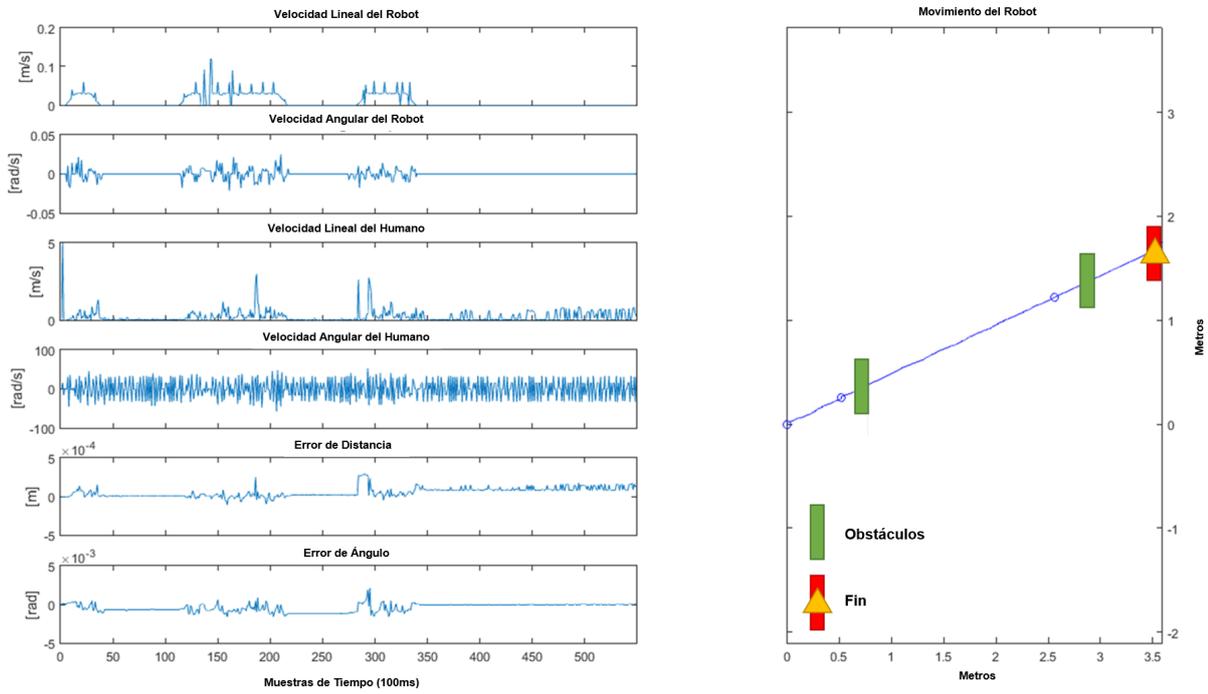


Figura 13 – Datos de las pruebas con obstáculos.

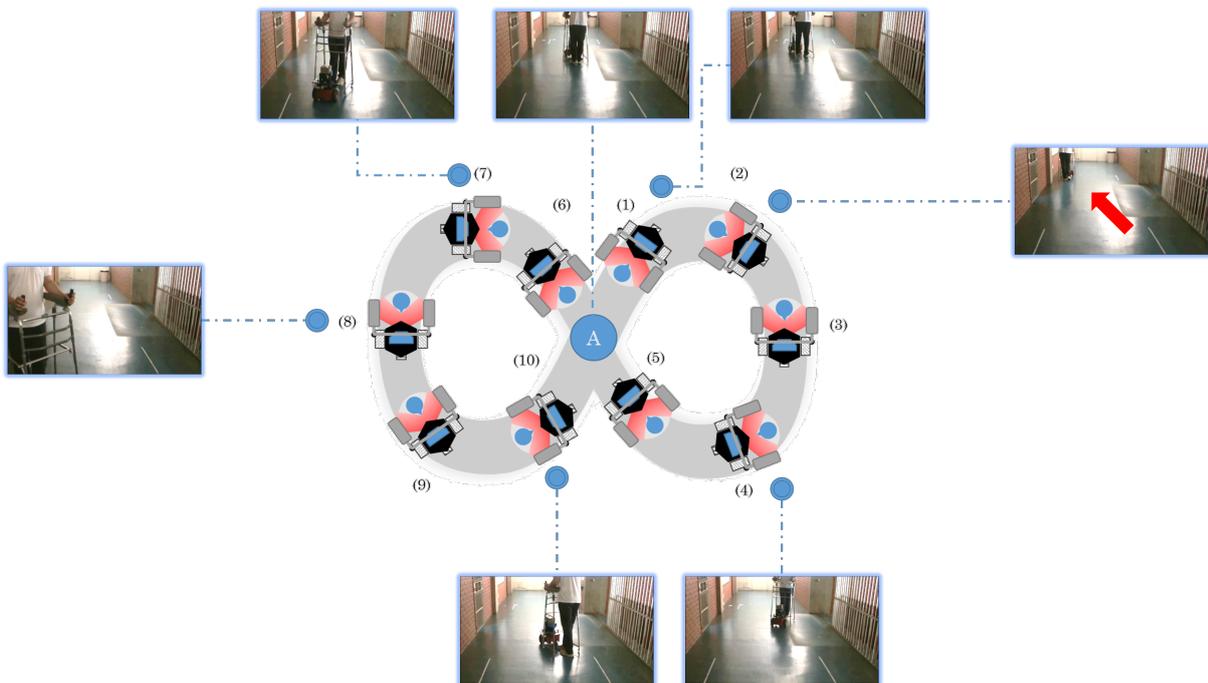


Figura 14 – Dibujo del camino de Lemniscata.

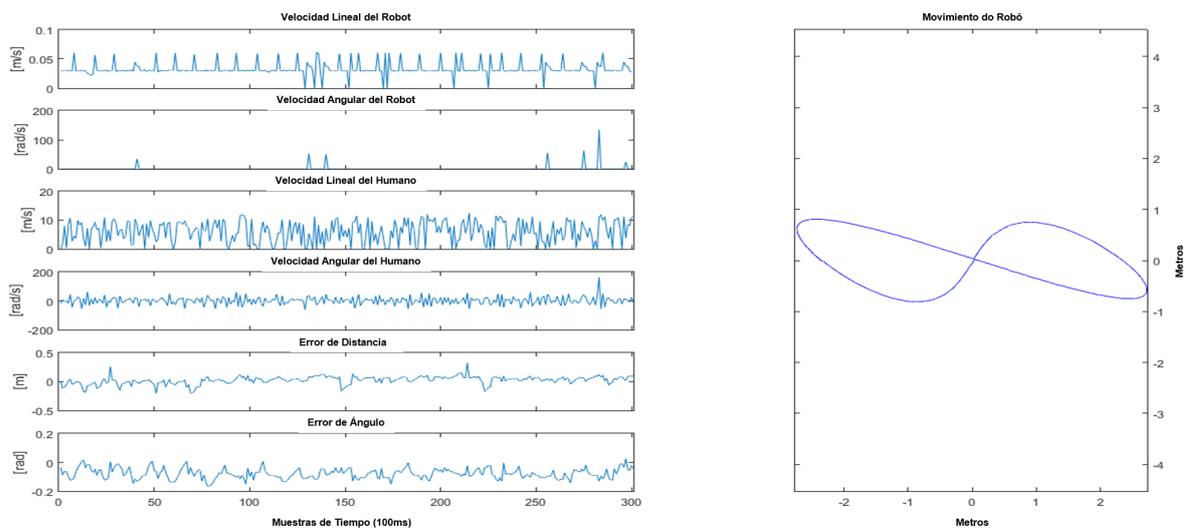


Figura 15 – Datos para la prueba del andador siguiendo un camino de Lemniscata.

podieron interactuar bien con el robot e imitaron al mediador en un mayor o menor grado.

Para hacer pruebas con los otros controladores propuestos, fueron hechas pruebas con las personas que trabajan en el laboratorio. Para probar el control de formación humano-robot, fueron hechas pruebas en camino recto con y sin obstáculos y un camino que seguía una curva de Lemniscata (en formato de ocho).

Los resultados para el controlador de formación fueron buenos, con errores bajos y con el controlador parando en los obstáculos cuando era necesario. Incluso en el camino del ocho (Lemniscata), él se comportó exitosamente.

Para las pruebas con el controlador utilizando el modo de interacción social de forma automática, se probó el robot haciendo la auto-presentación y el robot interactuando con el usuario. En este segundo modo se utilizaba un controlador automático, basado en cinemática inversa.

Las pruebas se mostraron exitosas, siendo que el robot mantuvo la distancia deseada del usuario (que representaba el niño con autismo) y el ángulo correcto. Con eso, el niño podrá tener nuevas posibilidades de terapia por medio de la interacción con el robot y con el terapeuta. Así el robot se convierte en una importante herramienta para estímulos sociales.

Conclusiones

La plataforma robótica se mostró útil para los dos propósitos presentados. Cuando en modo andador automatizado, esta pudo ayudar los voluntarios, tanto del grupo control, como del grupo de personas afectadas por la hemiparesia. Los resultados de las métricas GAS, SUS y Likert atestatan que la utilización del sistema ha sido positiva para los dos modos de operación.

Las personas con movilidad reducida reportaron que tuvieron más confianza al utilizar el andador y presentaron una estabilidad mejor. Respecto a la velocidad, algunos reportaron que tuvieran que andar más despacio, pues estaba la limitación de velocidad del robot (una de las reglas de seguridad). Aún así, se sintieron más confortables al caminar con el dispositivo y puntuaron alto en la escala GAS y cerca del promedio en la escala SUS.

En las pruebas hechas con el robot en el modo de interacción social, de los diez niños que participaron de las pruebas, nueve pudieron interactuar bien. Uno voluntario solo presentó miedo y se recusó a interactuar con el robot. Los otros cuatro con TEA y más los cinco del grupo control tuvieron reacciones positivas, de acuerdo con los datos de las métricas GAS y Likert y de las entrevistas hechas con los padres y las madres de los niños, que estuvieron presentes en todas las pruebas.

Proyectos futuros

Como expansión del proyecto, se ha planteado hacer un sistema de detección de emociones por medio de cámaras de vídeo RGB, infrarroja y Kinect. Un nuevo diseño del robot basado en los resultados de este trabajo está en desarrollo. El nuevo robot tendrá una *tablet* para exhibir distintas expresiones faciales y un nuevo sistema multimedia que será controlado por una *tablet* externa. Esta otra *tablet* estará con el terapeuta que podrá cambiar el comportamiento del robot remotamente y aún controlarlo, si se hace necesario.

Figura 16 muestra los dispositivos que serán utilizados en las etapas futuras del proyecto.



(a) Kinect



(b) Ca-
mara
IR



(c) Eye Tracker



(d) LIDAR

Figura 16 – Dispositivos a ser utilizados en versiones futuras de la plataforma robotizada.

Palabras clave: Robótica, Interacción Humano-Robot, Movilidad.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Tipos de andadores de acuerdo con la reacción respecto al suelo.	15
Figura 2 – Tipos de andadores.	19
Figura 3 – Robot MARIA para interactuar con niños que sufren del trastorno del espectro autista.	19
Figura 4 – Comunicación entre el robot, sensores y la computadora principal que hace el procesamiento.	21
Figura 5 – Diagrama del andador robotizado para el control de formación.	22
Figura 6 – Diagrama del andador robotizado. Las referencias “derecha” y “izquierda” son relativas al sensor láser. El ángulo θ es medido desde la derecha del sensor láser. La distancia d es la distancia entre el usuario y el sensor láser.	23
Figura 7 – Movimiento del robot en la Fase 1.	28
Figura 8 – Tipos de interação na Fase 2.	28
Figura 9 – Controlador de cinemática inversa con variación de ganancia durante la prueba.	29
Figura 10 – Dibujo del camino en línea recta sin obstáculos.	30
Figura 11 – Datos del camino en línea recta sin obstáculos.	30
Figura 12 – Dibujo del camino con obstáculos.	31
Figura 13 – Datos de las pruebas con obstáculos.	32
Figura 14 – Dibujo del camino de Lemniscata.	32
Figura 15 – Datos para la prueba del andador siguiendo un camino de Lemniscata.	33
Figura 16 – Dispositivos a ser utilizados en versiones futuras de la plataforma robotizada.	35
Figura 17 – Fases e subfases do ciclo da marcha (BARELA, 2005).	53
Figura 18 – Ilustração de alguns tipos de marchas patológicas.	54
Figura 19 – Participação de pessoas com mais de 60 anos na população mundial (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2013).	55
Figura 20 – Evolução da pirâmide etária e projeções	55
Figura 21 – Países e territórios com maior participação de pessoas acima de 65 anos na população total.	56
Figura 22 – Demonstração gráfica da distribuição de idosos com mais de 65 anos em valores absolutos. Fonte: Wolfram Alpha Knowledgebase, 2015.	56
Figura 23 – Epidemiologia em alguns países da América do Norte, Europa e Ásia.	58
Figura 24 – Utilização de dispositivo de assistência à mobilidade. Adaptado de (BRADLEY; HERNANDEZ, 2011).	66

Figura 25 – Tipos de dispositivos de ajuda a mobilidade de acordo com o apoio no solo.	68
Figura 26 – Usuário com o RT Walker.	71
Figura 27 – Andador GUIDO em suas diferentes versões (RODRIGUEZ-LOSADA, 2008).	71
Figura 28 – JARoW - JAIST Active Robotic Walker (LEE; OHNUMA; CHONG, 2010).	72
Figura 29 – UFES’s Smart Walker.	73
Figura 30 – Robôs para interação com crianças com deficiência.	75
Figura 31 – Robôs para interação social e aprendizagem.	76
Figura 32 – Fantasias para o robô ROBUS usadas para interação com crianças com TEA (competição <i>RoboToy Contest</i> realizada em Sheerbroke, Quebec, Canadá).	76
Figura 33 – Exemplos de robôs desenvolvidos para interação crianças-robô.	77
Figura 34 – Paro: robô não antropomórfico (CABIBIHAN et al., 2013).	78
Figura 35 – Exemplos de robôs antropomórficos (CABIBIHAN et al., 2013).	79
Figura 36 – Exemplos de robôs não biomiméticos (CABIBIHAN et al., 2013).	79
Figura 37 – Plataforma robótica e sensor laser utilizados nesta pesquisa.	81
Figura 38 – Detalhes da adaptação do andador à plataforma robótica.	83
Figura 39 – Robô MARIA para interação com crianças com TEA.	84
Figura 40 – Diagrama de blocos mostrando as partes do sistema.	87
Figura 41 – Interface para o controle do robô.	88
Figura 42 – Interface para o controle do robô.	89
Figura 43 – Leitura do robô em cada um dos modos de operação.	91
Figura 44 – Criança sentada interagindo com o robô MARIA.	92
Figura 45 – Posturas possíveis das pernas sob o ponto de vista do número de transições do sinal do sensor laser.	94
Figura 46 – Lógica usada para achar a posição de cada perna.	95
Figura 47 – Área de abrangência do sensor laser.	96
Figura 48 – Posturas possíveis das pernas sob o ponto de vista do sensor laser.	97
Figura 49 – Planos sagital, coronal e transversal. Fonte: WikiCommons	97
Figura 50 – Exemplos de transições de pernas.	98
Figura 51 – Detecção do ponto mais próximo ao sensor laser. Dentro do ambiente controlado este ponto será a criança.	100
Figura 52 – Diagrama do sistema utilizando controlador de cinemática inversa, onde d_d e θ_d são a posição e ângulo desejados, e \tilde{d} e $\tilde{\theta}$ são os erros de posição e ângulo.	102
Figura 53 – Diagrama do andador robótico. Os lados “direita” e “esquerda” são sob o ponto de vista do sensor laser.	102

Figura 54 – Simplificação do modelo humano-robô.	105
Figura 55 – Diagrama do andador. As variáveis estão detalhadas na lista de símbolos no apresentado no início do texto.	107
Figura 56 – Diagrama de funcionamento no modo andador.	108
Figura 57 – Fluxograma do funcionamento do controle de formação	109
Figura 58 – Cálculo do ângulo β	110
Figura 59 – Cálculo das componentes da velocidade do usuário.	110
Figura 60 – Variação do ângulo do robô (α_r) no plano absoluto.	111
Figura 61 – Rotação do plano do laser para o plano do robô (90°).	111
Figura 62 – Cálculo da variação do ângulo beta ($\Delta\beta$).	112
Figura 63 – Funcionamento do sistema de controle manual.	115
Figura 64 – Detalhe da lateral do robô com o botão <i>reset</i>	117
Figura 65 – Caminho em linha reta sem obstáculos.	121
Figura 66 – Fotos dos testes realizados no caminho reto sem obstáculos.	121
Figura 67 – Diagrama dos testes realizados no caminho reto com obstáculos.	121
Figura 68 – Fotos dos testes realizados no caminho reto com obstáculos.	122
Figura 69 – Experimento da curva de Lemniscata com fotos de alguns instantes.	123
Figura 70 – Resultados para o teste utilizando a curva de Lemniscate.	123
Figura 71 – Parte da interface responsável por alterar a velocidade de reação do robô quando em modo de interação social.	138
Figura 72 – Controlador de cinemática inversa com variação de ganhos durante o teste.	139
Figura 73 – Gráfico da escala de Likert (dados da Tabela 16)	140
Figura 74 – Caminho feito no experimento do andador	140
Figura 75 – Fotos do experimento utilizando o controlador PID	140
Figura 76 – Movimentação na Fase 1.	141
Figura 77 – Tipos de interação na Fase 2.	141
Figura 78 – Planta Baixa dos Experimentos Realizados com a MARIA.	141
Figura 79 – NUC - computador embutido a ser usado dentro do robô MARIA em sua nova versão.	151
Figura 80 – Equipamentos futuros a serem instalados na nova versão da plataforma robótica para interação social (Kinect, câmera térmica, Eye-Tracker, LIDAR).	152
Figura 81 – Diferentes vistas do andador.	161

Lista de tabelas

Tabela 1 – Andadores según la fuerza de reacción con el suelo.	15
Tabela 2 – Andadores Inteligentes y sensores que utilizan.	16
Tabela 3 – Algunos robots utilizados en estudios con niños con autismo.	17
Tabela 4 – Reglas de seguridad para la plataforma robotizada.	24
Tabela 5 – Preguntas de la escala SUS.	24
Tabela 6 – GAS para el modo interacción social.	26
Tabela 7 – GAS para el modo andador.	26
Tabela 8 – Cuestionario utilizado en la escala de Likert. TEA1 hasta TEA5 son los niños con autismo que participaron de las pruebas.	27
Tabela 9 – Número de transições para cada configuração de pernas.	98
Tabela 10 – Modos de estimar a posição das pernas	99
Tabela 11 – Regras de segurança para o robô no modo “andador”.	115
Tabela 12 – Regras de segurança para o robô no modo “interação social”.	116
Tabela 13 – Questionário da escala de usabilidade SUS.	125
Tabela 14 – GAS para interação social.	127
Tabela 15 – GAS para o andador.	127
Tabela 16 – Questionário usando a escala de Likert	128
Tabela 17 – Escalas GAS e SUS para o experimento com o andador (grupo controle).	131
Tabela 18 – Escalas GAS e SUS para o experimento com o andador (voluntários com hemiparesia).	131
Tabela 19 – Pontuação GAS para as crianças com TEA	134
Tabela 20 – Pontuação GAS para as crianças do grupo controle	134
Tabela 22 – Pontuação SUS para as crianças do grupo controle.	135
Tabela 21 – Pontuação SUS para as crianças com TEA.	135
Tabela 23 – Dados de comportamento observados durante os experimentos com crianças com TEA.	137
Tabela 24 – Síntese dos resultados da plataforma robótica.	143
Tabela 25 – Síntese dos resultados observacionais dos controladores.	144

Lista de abreviaturas e siglas

ASD	<i>Autism Spectrum Disorder</i> - sigla em inglês para o Transtorno do Espectro Autista
TEA	Transtorno do Espectro Autista
MARIA	Mobile Autonomous Robot for Interaction with Autistics
GAS	Goal Attainment Scale
SUS	System Usability Scale
PAMM	Personal Aid for Mobility and Health Monitoring
PAM-AID	Personal Adaptative Mobility AID
ROBUS	ROBot of University of Sheerbroke
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
JAIST	Japan Advanced Institute of Technology
JARoW	JAIST Robotic Walker
ADCS	Assistive Technology for developing Skills
LMS	Laser Measurment Systems
DSM	Diagnostoc and Statistical Manual of Mental Disorders

Lista de símbolos

v_h	Velocidade linear absoluta do humano
ω_h	Velocidade angular absoluta do humano
d	Distância humano-robô
θ	Ângulo do robô na referência do humano
φ	Ângulo do humano na referência do robô
x^L	Eixo transversal do sensor laser
y^L	Eixo longitudinal do sensor laser
x^H	Eixo transversal do humano
y^H	Eixo longitudinal do humano
x^R	Eixo transversal do robô
y^R	Eixo longitudinal do robô
x_h^L	Posição do humano no eixo transversal do laser
y_h^L	Posição do humano no eixo longitudinal do laser
x_h^R	Posição do humano no eixo transversal do robô
y_h^R	Posição do humano no eixo longitudinal do robô
x_R^h	Posição do robô no eixo transversal do humano
y_R^h	Posição do robô no eixo longitudinal do humano
\dot{h}_{ref}	Set-point de posição do robô em relação ao humano
α	Ângulo do set-point em relação ao eixo transversal do robô
α_{ref}	Set-point do ângulo do vetor de referência
v_r	Velocidade linear absoluta do robô
ω_r	Velocidade angular absoluta do robô
β	Ângulo entre o eixo transversal do laser e o vetor velocidade do humano

v_{h_x}	Velocidade linear absoluta do humano no eixo das abcissas
v_{h_y}	Velocidade linear absoluta do humano no eixo das ordenadas
k	Instante de tempo (amostragem)
$k - 1 k$	Instante de tempo anterior projetado no instante atual

Sumário

1	INTRODUÇÃO	51
1.1	Locomoção humana e problemas de mobilidade	52
1.2	Desordens cognitivas e do espectro autista	57
1.3	Hipótese	59
1.4	Justificativa	59
1.5	Objetivos da Tese	60
1.5.1	Objetivos Específicos	60
1.6	Contribuições da Tese	61
1.7	Organização da Tese	62
2	ESTADO DA ARTE	65
2.1	Tecnologias Assistivas	65
2.2	Sistemas de auxílio à mobilidade	65
2.2.1	Tipos de Suporte	67
2.2.2	Andadores	68
2.2.3	Andadores Robóticos	70
2.3	Sistemas de reabilitação cognitiva	73
2.3.1	Tipos de robôs para interação com crianças com deficiência	75
2.3.2	Alguns trabalhos com interação humano-robô	77
2.3.3	Classificação dos robôs de acordo com a forma	78
3	PLATAFORMA PARA INTERAÇÃO HUMANO-ROBÔ	81
3.1	Adaptação do andador convencional à plataforma robótica	81
3.2	Robô para interação com crianças com TEA	83
3.3	Funcionamento do sistema	86
3.3.1	Interface	86
3.3.2	Aquisição dos dados dos sensores	88
3.3.3	Comportamento desejado do robô	89
3.3.4	Processamento de dados dos sensores	90
3.3.5	Controle	91
3.3.6	Supervisor de Segurança	91
3.3.7	Relatório da Sessão	92
4	AQUISIÇÃO DE DADOS E CONTROLE	93
4.1	Detecção de pernas	93
4.1.1	Pré-processamento dos dados	93

4.1.2	Detecção de transições	96
4.1.3	Extração de padrões de análise	97
4.1.4	Coordenadas das pernas	98
4.2	Detecção da criança	100
4.3	Arquitetura de controle	100
4.4	Controlador PID	101
4.5	Controlador de Posição Baseado em Cinemática Inversa	101
4.5.1	Ajuste nas variáveis de distância e ângulo	104
4.6	Controle de Formação	106
4.7	Controle Manual	114
4.8	Sistema de Segurança	114
5	EXPERIMENTOS	119
5.1	Testes preliminares	119
5.1.1	Modo andador com controlador de formação	120
5.1.2	Modo Interação Social Autônomo	124
5.2	SUS - <i>System Usability Scale</i>	124
5.3	GAS - <i>Goal Attainment Scale</i>	125
5.4	Likert	128
5.5	Experimentos com voluntários	128
5.5.1	Critérios de inclusão e exclusão	130
5.5.2	Modo andador com controlador PID	130
5.5.3	Modo Interação Social com Controle Manual	132
6	CONCLUSÃO	143
6.1	Síntese das contribuições	146
6.2	Lista de publicações	146
6.3	Pesquisas futuras	151
	REFERÊNCIAS	153
	APÊNDICES	159
	APÊNDICE A – ADAPTAÇÃO DO ANDADOR	161
	ANEXOS	163
	ANEXO A – COMITÊ DE ÉTICA (ANDADOR)	165

ANEXO B – COMITÊ DE ÉTICA	
(INTERAÇÃO SOCIAL)	167

1 Introdução

A condição de saúde em que uma pessoa se encontra afeta de forma substancial sua qualidade de vida. Pessoas acometidas por enfermidades relacionadas à mobilidade ou problemas cognitivos comportamentais, como o transtorno do espectro autista (TEA), têm sua qualidade de vida reduzida, devido ao impacto dessas condições de saúde. Contudo, há tecnologias assistivas que podem ajudá-las a melhorar a mobilidade e a interação social, provendo assim uma melhor qualidade de vida a essas pessoas. Dentro do contexto das tecnologias assistivas, a robótica tem apresentado resultados satisfatórios em diversas pesquisas ao redor do mundo, em ambos os campos citados anteriormente. Exemplos de aplicação da robótica para auxílio a pessoas com problemas motores podem ser vistos em (MATSUMOTO; INO; OGASAWARA, 2001), (MIN et al., 2002), (CHUGO et al., 2008). Já estudos que envolvem enfermidades que prejudicam a parte cognitiva e comportamental dos pacientes (em especial o TEA - *Transtorno do Espectro Autista*) podem ser vistos em (CABIBIHAN et al., 2013; ROBINS; DAUTENHAHN; DICKERSON, 2009; SCASSELLATI; HENNY; MATARIĆ, 2012; KIM et al., 2013; DAUTENHAHN; WERRY, 2000; DAUTENHAHN, 2003).

A locomoção é uma habilidade importante que permite às pessoas trabalharem, realizar suas tarefas diárias e terem independência, sendo indispensável para uma boa qualidade de vida. Além da capacidade de se deslocar, esta habilidade também representa uma forma primária de exercício físico para as pessoas, especialmente para aquelas com deficiência motora e para os idosos (MORRIS et al., 2003). Desta forma, pessoas que possuem limitação física requerem cuidados e podem necessitar de meios que auxiliem a sua locomoção, a fim de minimizar os prejuízos oriundos da mobilidade reduzida.

As origens dos problemas de locomoção podem ser diversas e, normalmente, não possuem um único fator que ocasione todo o problema de mobilidade. Disfunções neurológicas, circulatórias, doenças relacionadas à genética, doenças musculares, pulmonares, acidentes, ferimentos e até mesmo o envelhecimento do indivíduo são causas de problemas relativos à locomoção (MARTINS et al., 2012). Devido a tais doenças e limitações parciais ou totais na locomoção, são produzidos graves prejuízos aos indivíduos afetados, o que traz, inevitavelmente, diminuição na qualidade de vida e afeta não somente as tarefas ligadas diretamente à mobilidade, mas também aquelas correlacionadas, como as citadas anteriormente. Além disso, a mobilidade reduzida ainda pode trazer problemas relacionados ao desenvolvimento social, cognitivo e psicológico (COOK et al., 2002).

A capacidade de interação é outro fator importante que afeta diretamente a qualidade de vida das pessoas, situação esta que pode ser percebida em indivíduos de todas

as idades, estando também presente no TEA, em inglês conhecido como ASD (*Autism Spectrum Disorder*). Assim, da mesma maneira que a capacidade de locomoção afeta diversas áreas da vida (COOK et al., 2005), a falta de interação com outras pessoas e com o ambiente ao redor também pode gerar problemas sérios (seja por questões de déficit motor, seja por transtornos de desenvolvimento comportamental e/ou cognitivo), uma vez que há relação entre o desenvolvimento cognitivo e a interação social entre as pessoas (CABIBIHAN et al., 2013).

Crianças com TEA tendem a se isolar e criar o que popularmente é conhecido como um “mundo próprio” e, desta forma, não interagem bem com as pessoas ou com o ambiente ao seu redor (KLIN, 2006). Neste caso, para auxiliá-las, em especial aquelas ainda em fase de desenvolvimento, são utilizadas técnicas de terapia comportamental para estimulá-las a interagir e se socializar com outras pessoas (LORD et al., 2000). Nessas terapias são utilizados estímulos para atrair a atenção dessas crianças. Contudo, não é possível garantir que o estímulo irá provocar uma resposta nas crianças e tampouco que o mesmo estímulo que atrai a atenção de uma criança terá o mesmo efeito em outras. Isso se deve ao fato de que o TEA não é uma única enfermidade, mas sim um espectro que se manifesta de formas diferentes (SCASSELLATI; HENNY; MATARIĆ, 2012). Mais detalhes sobre o TEA são apresentados na seção 1.2.

A Robótica é uma ciência que vem ajudando as pessoas nas mais diversas tarefas, inclusive na área de saúde e reabilitação, tanto nos aspectos físicos quanto cognitivos e comportamentais (COOK et al., 2005; SCASSELLATI; HENNY; MATARIĆ, 2012). Entre as aplicações da robótica na área da saúde, pode-se citar robôs que auxiliam em cirurgias, que dão suporte na fisioterapia e reabilitação e aqueles usados para apoio cognitivo e comportamental (KIM et al., 2013). Esta tese de doutorado mostra a construção de uma plataforma robótica com dois propósitos (detalhados no Capítulo 3): de um andador robótico que auxilia pessoas com problemas de mobilidade, e de um robô para auxiliar a interação social de crianças com TEA. Ambos os modos de operação dessa plataforma robótica utilizam o mesmo robô como estrutura principal e compartilham vários algoritmos de controle e de sistemas de segurança.

1.1 Locomoção humana e problemas de mobilidade

Prejuízos na função motora podem acarretar problemas de locomoção e disfunções na marcha humana e trazerem prejuízos à qualidade de vida. Dentro da biomecânica, o ciclo da marcha humana possui duas fases: uma de apoio e outra de balanço, subdivididas em cinco e três subfases, respectivamente (BARELA, 2005). Dentro da primeira fase (apoio) há as subfases de contato inicial, resposta à carga, apoio médio, apoio terminal e pré-balanço. A fase de balanço possui as subfases de balanço inicial, balanço médio e

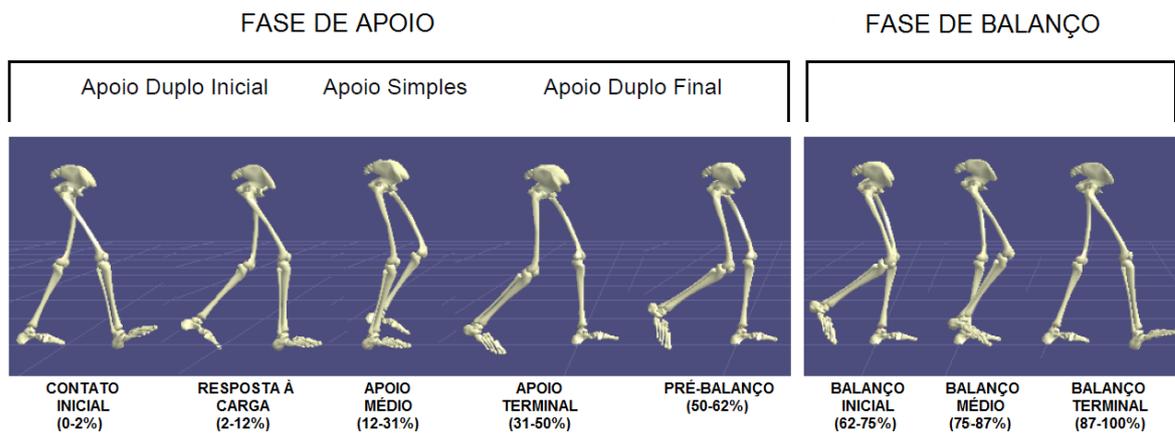


Figura 17 – Fases e subfases do ciclo da marcha (BARELA, 2005).

balanço terminal. Tais fases e subfases estão ilustradas na Figura 17 (BARELA, 2005).

Há diversos tipos de marchas patológicas, dentre as quais podem-se citar a marcha antálgica (para compensar a dor), a marcha de tesouras (em que as pernas se cruzam enquanto a pessoa anda) e a marcha hemiparética (em que um lado tem limitação quanto à mobilidade e a perna faz um movimento de circundução) (Van Hook; DEMONBREUN; WEISS, 2003). Ainda existem outras enfermidades que provocam alterações na marcha, porém, como o estudo da marcha humana não é o foco desta tese, as informações sobre as mesmas aqui presentes são sucintas. Mais detalhes sobre o assunto podem ser vistos em (FRIZERA et al., 2009; MARTINS et al., 2012; BARELA, 2005). Algumas ilustrações de marchas patológicas podem ser vistas na Figura 18.

O foco desta tese, dentro do contexto de mobilidade, é auxiliar pessoas que tenham problema de locomoção nos membros inferiores por meio da utilização de um dispositivo robótico que funciona como um andador. O grupo de voluntários que participou dos testes e que tinham problema de mobilidade apresentavam a marcha hemiparética, a qual pode ser provocada por várias enfermidades, entre elas o acidente vascular cerebral (AVC) (LOTTERIO et al., 2014), justamente a causa da marcha que acometia os voluntários das sessões experimentais realizadas nesta tese.

Dados estatísticos da Organização das Nações Unidas (ONU) (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2013) mostram que a média de idade da população mundial está crescendo ao longo do tempo. Ao mesmo tempo que isso representa uma expectativa de vida maior das pessoas, também implica em desafios quanto ao tratamento das doenças relacionadas à idade.

Pessoas com idade avançada apresentam diversos problemas de saúde, relativos ao processo natural do envelhecimento, e muitas doenças que se manifestam nesta fase da vida têm relação com a mobilidade (MARTINS et al., 2012). Entre tais problemas de saúde, podem ser citadas a fraqueza e perda de massa muscular, as doenças inflamatórias

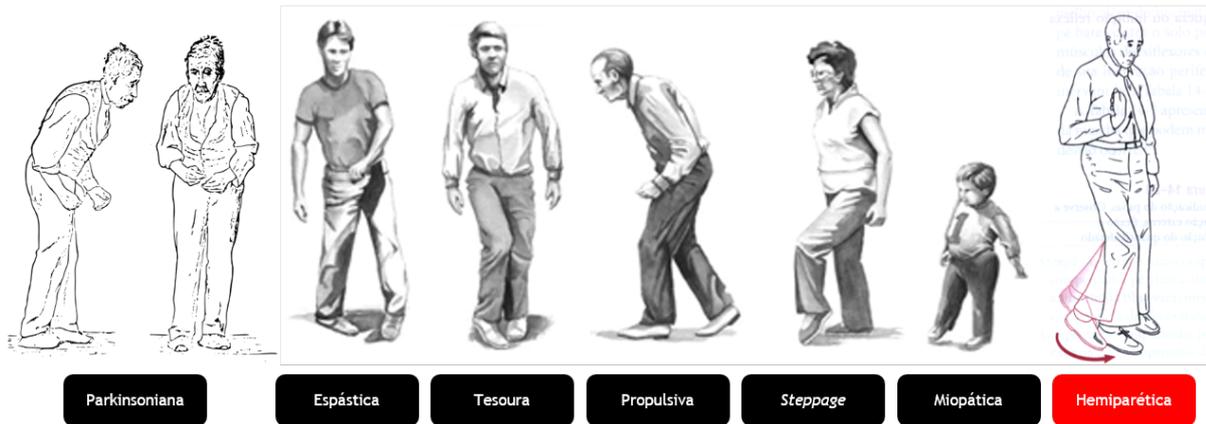


Figura 18 – Ilustração de alguns tipos de marchas patológicas.

e reumáticas, como a artrite e artrose, a perda de massa óssea, apresentada na osteoporose; problemas neurológicos, como a doença de Alzheimer, dentre outros (BRADLEY; HERNANDEZ, 2011).

Dado este contexto, é necessário o aumento da assistência a esse crescente grupo de pessoas com enfermidades relacionadas à capacidade locomotora (KAMATA; SHINO, 2006). Em (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2013) é mostrado que, proporcionalmente, a população com idade superior a sessenta anos tende a crescer ao longo do tempo, e, com isso, há a necessidade de se ter tecnologia e equipamentos para auxiliá-las. O gráfico da Figura 19 mostra o aumento percentual da população de idosos ao longo do tempo (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2013). É importante observar que há um aumento significativo de 8% em 1950 para 21% na projeção feita para 2050.

Na Figura 20, mostra-se uma composição de pirâmides etárias, onde pode-se verificar que a base da pirâmide (que representa as pessoas mais jovens) tende a ficar proporcionalmente menor em relação ao topo, com o passar do tempo. Nesta imagem é possível ver a evolução em 1950, 2010 e as projeções para 2050 e 2100.

Além dos dados da ONU, existem dados que mostram uma tendência no aumento do número de idosos, especialmente entre países desenvolvidos, o que implica que o suporte à mobilidade para atividades diárias é um ponto importante a ser trabalhado (KIKUCHI et al., 2010; KAMATA; SHINO, 2006). A Figura 21 mostra a participação dos idosos nos países e territórios que têm maior número relativo de idosos e a Figura 22 mostra o número absoluto de idosos em cada país no mapa-múndi. Além da população idosa e os problemas associados a essa condição, é necessário também levar em conta as pessoas que não possuem idade avançada, mas que também tem problemas de locomoção provocados por outros motivos, como doenças degenerativas e acidentes.

Desta forma, as tecnologias assistivas de apoio à mobilidade podem ajudar, já que auxiliam as pessoas com dificuldades de locomoção a terem uma vida mais independente

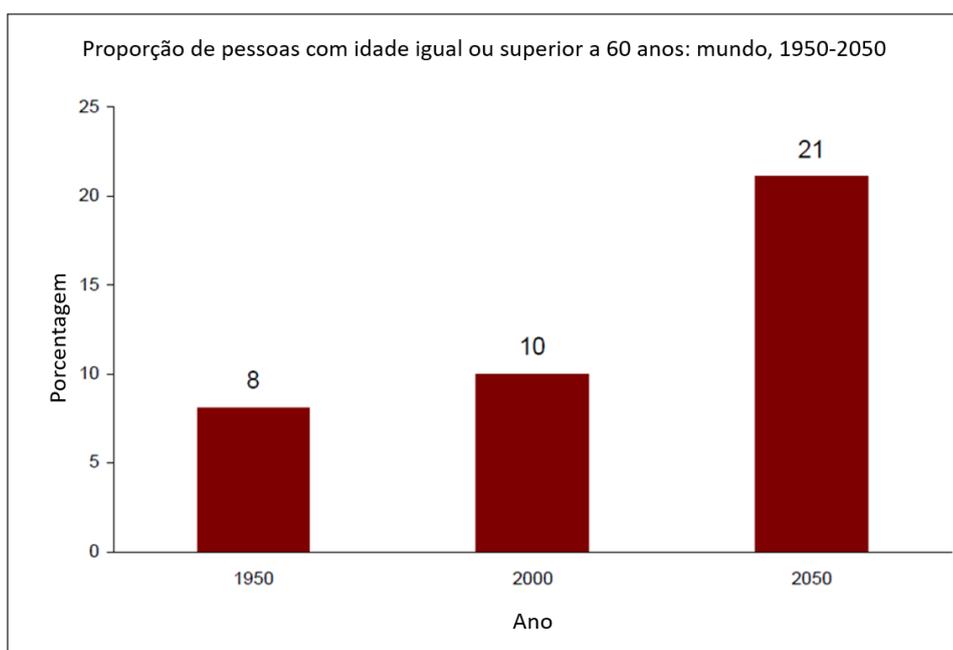


Figura 19 – Participação de pessoas com mais de 60 anos na população mundial (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2013).

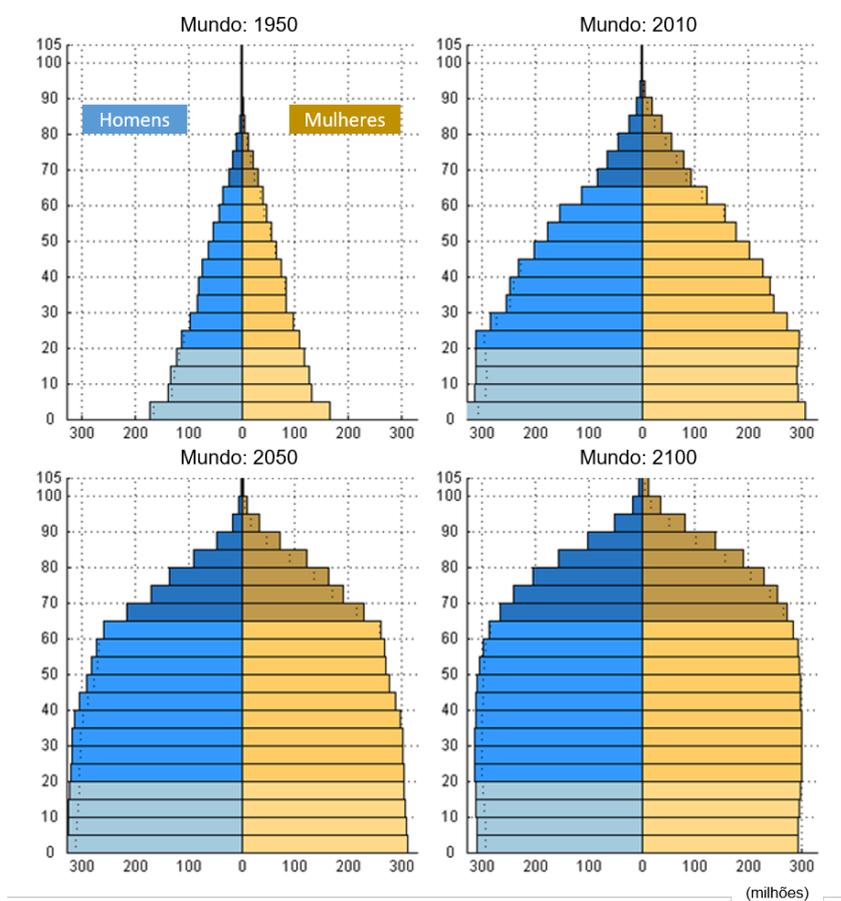


Figura 20 – Evolução da pirâmide etária e projeções

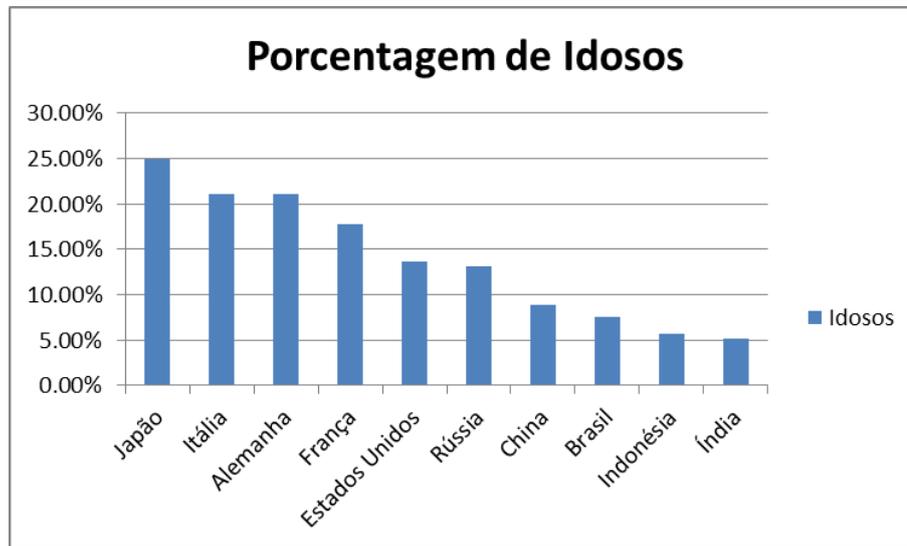


Figura 21 – Países e territórios com maior participação de pessoas acima de 65 anos na população total.

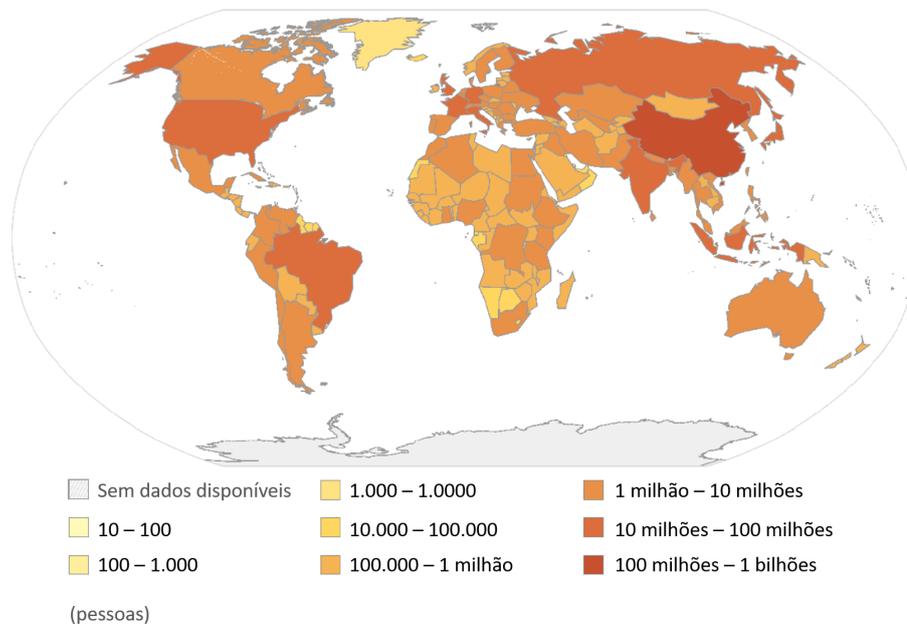


Figura 22 – Demonstração gráfica da distribuição de idosos com mais de 65 anos em valores absolutos. Fonte: Wolfram|Alpha Knowledgebase, 2015.

e aumentarem suas capacidades de lidar com o problema ou enfermidade que possuem (BRADLEY; HERNANDEZ, 2011; Van Hook; DEMONBREUN; WEISS, 2003; CHUGO et al., 2008). Por isso, existem dispositivos de apoio à mobilidade que oferecem desde suporte físico, como o caso das bengalas e muletas, até suporte cognitivo e sensorial, como os andadores inteligentes que ajudam as pessoas a se locomoverem sem colidir contra obstáculos, além de serem capazes de guiar a pessoa para um determinado local. Esses dispositivos e tipos de suporte são abordados no Capítulo 2 desta tese.

1.2 Desordens cognitivas e do espectro autista

O TEA é um espectro autista e são desordens relacionadas ao desenvolvimento neurológico e comportamental (GOULART et al., 2014; SALCEDO; de Jesus Cerqueira; LIMA, 2013). Crianças com TEA têm como principais características a dificuldade de socialização, comportamentos repetitivos e estereotipados, problemas para conseguir perceber e expressar emoções, além de dificuldade em manter contato visual. Além disso, poucas atividades chamam sua atenção (KIM et al., 2013).

Existem divisões dentro do TEA, tais como a Síndrome de Asperger, a qual se assemelha ao autismo clássico, porém com a diferença que não há atraso na linguagem nem na cognição. Além disso, há certo interesse do portador desta síndrome em explorar o ambiente, além de ter uma grande capacidade de resolver problemas de áreas específicas, com capacidades cognitivas por vezes acima da média (KLIN, 2006). Outra divisão do TEA é o Transtorno Global do Desenvolvimento sem Outra Especificação (em inglês, *Pervasive Developmental Disorder Not Otherwise Specified*, cuja sigla é PDD-NOS), o qual é caracterizado quando não se consegue encaixar a desordem dentro de uma subdivisão conhecida, sendo que tal condição pode estar associada ao retardamento mental (RUTTER, 2005). Contudo, em todos os casos, se mantém a falta de interesse social e o comportamento inexpressivo quando comparado às crianças com desenvolvimento típico (GOULART et al., 2014). Essa característica de isolamento e falta de interação social é algo bem marcado nas crianças que possuem TEA.

Devido à falta de expressividade apresentada pelas crianças com TEA, bem como a dificuldade de socialização, há trabalhos que buscam encontrar formas de detectar emoções baseando-se na imagem da face das crianças com TEA, uma vez que as mesmas podem estar sentindo as emoções, porém com dificuldade para expressá-las (SALCEDO; de Jesus Cerqueira; LIMA, 2013), pois as crianças com TEA têm grande dificuldade, tanto em perceber como em expressar emoções. Desta forma, é possível que a mesma esteja sentindo alguma emoção mas não consegue externá-la (SCASSELLATI; HENNY; MATARIĆ, 2012).

Não há uma etiologia definida para o TEA, e estudos apontam que podem haver fatores genéticos, ambientais, congênitos e sócio-culturais que interferem no processo

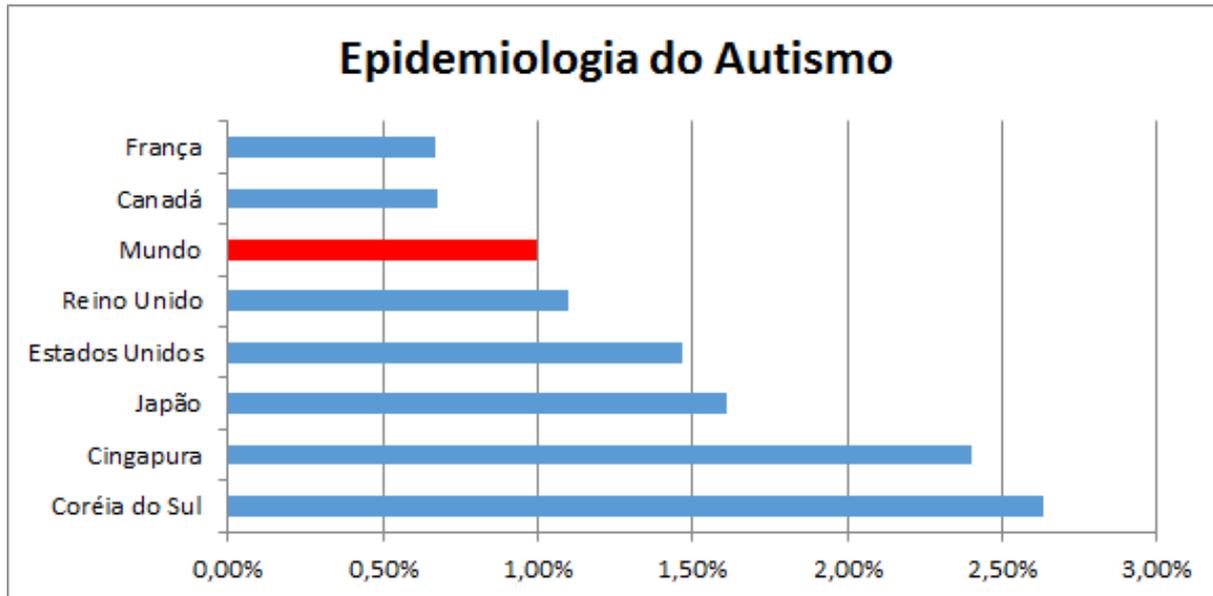


Figura 23 – Epidemiologia em alguns países da América do Norte, Europa e Ásia.

(RUTTER, 2005). Exatamente por ser uma desordem possivelmente multifatorial, não é possível definir uma etiologia específica para o TEA (RUTTER, 2005). Atualmente, não existe uma cura para o autismo, embora hajam terapias comportamentais que tentam auxiliar as crianças a interagirem mais, seja por meio de música, brincadeiras, esportes ou qualquer atividade que exija interação social (RUTTER, 2005).

Estatisticamente, o índice de portadores de TEA é estimado em 62 a cada 10.000 pessoas, considerando todos os subtipos (ELSABBAGH et al., 2012). Contudo, as estatísticas variam devido às distintas formas de visualização do espectro autista e da dificuldade de diagnóstico, sendo que há países que registram mais de 2,5% de sua população como tendo algum tipo de TEA.

O gráfico mostrado na Figura 23 mostra a porcentagem de pessoas com TEA em alguns países da América do Norte, Europa, e Ásia. No mundo estima-se que haja 1% de pessoas com autismo. Vale a pena ressaltar que os estudos, por terem sido feitos em países diferentes, podem não utilizar os mesmos critérios, o que influencia nos resultados ¹.

No Brasil não há uma estatística definida para pessoas com TEA, embora o governo brasileiro tenha lançado cartilhas com orientações sobre o TEA. Contudo, baseado no Censo de 2000 (Brazilian Health Ministry, 2013), há uma indicação de que 0,29% da população brasileira (no ano 2000) possuía autismo.

¹ Fontes sobre a incidência de ASD:
 América do Norte: (Center for Disease Control and Prevention, 2013; Noris, S; Pare, JR Starky, 2006)
 Europa: (Autism Grande Cause, 2012; The National Autistic Society, 2015)
 Ásia: (HONDA; SHIMIZU; RUTTER, 2005; Autism Resource Centre, 2013)
 Mundo: (American Psychiatric Association, 2013)

1.3 Hipótese

A hipótese a ser provada nesta tese de doutorado é a de que uma única plataforma robótica pode ser utilizada para múltiplos propósitos distintos, sendo um de ordem cognitiva (TEA) e outro de ordem motora (problemas relacionados a mobilidade dos membros inferiores). Além disso, a interação desta plataforma pode ser com contato, no caso das pessoas com problema de mobilidade, ou sem contato, no caso das crianças com TEA.

Desta forma, com pouca modificação no *hardware*, desenvolvimento de controladores para controlar a movimentação e regras de segurança, pode-se criar uma única plataforma, guiada por uma única interface, que permite a utilização do sistema em dois propósitos diferentes. Isso é possível devido ao fato de que a plataforma permite facilmente intercambiar as duas funções, apenas trocando os acessórios adjacentes. Especificamente quanto aos controladores, um deles faz uma formação humano-robô baseando-se em um controlador anterior robô-robô, sendo, portanto, um item de inovação e pesquisa.

Estudos realizados por (FRIZERA-NETO, 2010) apresentam vários dispositivos e andadores robóticos que auxiliam na movimentação de usuários. Em paralelo, estudos realizados por (CABIBIHAN et al., 2013) mostram que um robô pode ser utilizado para auxiliar na interação e socialização de crianças com TEA. Desta forma, é possível inferir que a adaptação de um robô móvel pode fazer com que este funcione como um andador robótico e traga benefícios a pessoas com mobilidade reduzida e aos idosos. Ao mesmo tempo, essa mesma plataforma robótica poderia ser utilizada, com algumas modificações na estrutura externa, para montar um robô que auxilie crianças com TEA no processo de interação e socialização. Mais detalhes destas adaptações são mostrados no Capítulo 3.

1.4 Justificativa

A justificativa para a realização desta tese de doutorado é a utilização da robótica como ferramenta auxiliar para pessoas com problemas de mobilidade e crianças com TEA. Desta forma, explora-se a utilização de sistemas de controle e adaptação de robôs para atividades relacionadas à saúde em dois campos distintos: mobilidade e comportamento. Com isso, têm-se dois enfoques para esta interface humano-robô: a interação física para apoio à marcha humana e a interação cognitiva e comportamental para apoio às crianças com TEA. A função da plataforma robótica como “andador” tem como motivação melhorar a marcha de usuários acometidos por enfermidades que prejudicam a mobilidade e fornecer apoio durante as sessões de fisioterapia. Já a plataforma no modo “interação social” pretende ajudar crianças com TEA a interagirem melhor com o meio em que vivem.

O contexto social, de apoio tanto à mobilidade quanto a crianças com TEA é a

grande motivação em construir esta plataforma robótica. Desta forma, tem-se na realidade, uma plataforma de interação humano-robô com ou sem contato (modo “andador” e modo “interação social”, respectivamente), a qual utiliza como base o mesmo robô e a mesma interface. Apenas alguns elementos, facilmente intercambiáveis, mudam nos respectivos modos de operação do robô, os quais são facilmente encaixáveis na plataforma robótica. Com isso, pretende-se auxiliar pessoas com limitação motora e crianças com autismo nas suas devidas terapias de reabilitação e assim melhorar a qualidade de vida dessas pessoas.

1.5 Objetivos da Tese

O objetivo geral desta tese de doutorado é investigar se uma única plataforma robótica pode ajudar na mobilidade e na interação social. Dentro da questão da mobilidade, pessoas que possuem capacidades residuais de locomoção podem aproveitá-las com esta plataforma robótica para aumentar sua capacidade de locomoção e, com isso, preservar as capacidades de mobilidade remanescentes. O foco do trabalho é a utilização do sistema dentro de ambientes de reabilitação e fisioterapia, auxiliando os pacientes a recuperar a musculatura e sistema locomotor, sendo assim uma ferramenta para permitir a reabilitação motora.

Por outro lado, a mesma plataforma pode ser utilizada como robô de interação social para auxiliar crianças que possuem TEA. O sistema robótico nesta configuração possui o nome de MARIA, que é acrônimo para *Mobile Autonomous Robot for Interaction with Autistics* (Robô Móvel Autônomo para Interação com Autistas). O robô, neste caso, serve como um mediador para interação social, pois ele permitirá que a criança trabalhe o desenvolvimento de habilidades sociais com o robô e com o terapeuta.

O esperado é desenvolver e implementar estratégias de controle, interfaces e regras de segurança para o robô, para que este possa ser usado para interagir e oferecer assistência às pessoas. A interface é capaz de operar tanto com o robô na forma de andador quanto na forma de robô para interação social. Com relação ao escopo, esta tese abrange a utilização do dispositivo dentro de um ambiente controlado e com apoio de um profissional qualificado, como fisioterapeutas e terapeutas ocupacionais, para ambas as formas de operação do robô.

1.5.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho envolvem construir uma interface para a utilização do robô, que controle o tempo e os parâmetros que o robô deve utilizar para operar e o desenvolvimento de controladores para que o robô possa realizar as tarefas de interação social e de auxílio à mobilidade. O sistema de controle da plataforma robótica é utilizado para calcular a velocidade angular e linear do robô, a fim de mantê-lo estável

e a uma distância e ângulo desejado do usuário. Vale a pena ressaltar que o sistema de controle varia, em função do modo de utilização do robô, o que é mostrado em detalhes no Capítulo 4.

Em termos de segurança, é proposto um sistema de regras que impede situações que possam colocar o usuário em risco. Este sistema verifica, dentre outros fatores, se o usuário está dentro da zona segura próxima ao robô e se a velocidade do robô está adequada no momento da interação. Caso o usuário se encontre em uma situação de risco, o sistema toma decisões automáticas para evitar acidentes, como reduzir a velocidade ou parar totalmente o robô.

Além disso, pode-se citar como objetivo específico a adaptação de um andador convencional em um *smart walker*, por meio da utilização do robô e dos sensores (incluindo o sensor laser).

1.6 Contribuições da Tese

Como mencionado anteriormente, o foco deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema robótico que propicia a interação humano-robô, com e sem contato, para auxiliar, respectivamente, pessoas com problemas de mobilidade nos membros inferiores e crianças com TEA.

Quando a plataforma robótica funciona no modo andador, exige um contato com a pessoa, uma vez que a mesma deve apoiar-se na plataforma para utilizá-la. Em contrapartida, quando o robô está funcionando no modo “interação social”, não é necessário que a criança com TEA se apoie no robô, sendo, portanto, uma interação humano-robô sem contato.

Ambas as formas de interação são integradas em uma única plataforma que utiliza uma interface e um robô, sendo que poucas alterações são necessárias para converter o sistema de um modo para o outro. De forma sucinta, as contribuições desta tese de doutorado são:

1. Adaptação de um andador convencional para um andador robótico.
2. Adaptação de um robô móvel para a construção de um robô para auxiliar a interação social de crianças com TEA.
3. Criação de uma interface única para ambos os propósitos citados nos itens anteriores.
4. Desenvolvimento de dois controles (baseado em cinemática inversa e formação) para ser usado no robô de acordo com o modo de operação (“andador” ou “interação social”).

5. Criação das regras de segurança para a utilização do sistema, que envolve a detecção de pernas, alarme para obstáculos e limites de velocidade, dentre outras.
6. Testes do sistema para usabilidade.
7. Testes pilotos com pessoas com problemas de mobilidade.
8. Testes pilotos com crianças com autismo.
9. Aplicação das escalas métricas SUS, GAS e Likert para ambos os contextos de assistência da plataforma robótica.

O desenvolvimento de sistemas de controle para interação humano-robô (item #4), que é um dos objetivos específicos desta tese, toma um lugar especial, por ter um aporte mais científico e por ser o que dá suporte para as outras contribuições.

1.7 Organização da Tese

A organização desta tese de doutorado trata primeiro da parte mais abrangente, envolvendo a introdução e o estado da arte, e a partir daí entra em tópicos mais específicos como o funcionamento do sistema, o controle e as regras de segurança, e termina com a explicação dos métodos usados para avaliação do sistema, bem como os resultados de tais avaliações. Por fim, a tese é encerrada com a conclusão e os trabalhos futuros. Desta forma, a mesma está dividida nos seguintes capítulos:

- **Introdução:** nesta parte inicial é dada uma explicação geral da pesquisa realizada, com um destaque à sua utilidade dentro do conceito global de mobilidade e interação humana. Para contextualizar, são apresentados dados estatísticos e uma breve descrição de mobilidade e tecnologias assistivas. Este capítulo também mostra a organização do texto desta tese.
- **Estado da Arte:** neste capítulo são mostrados os dispositivos de assistência à marcha humana, suas subdivisões e utilizações. Também são mostrados alguns dispositivos de assistência à interação humana. É dado um enfoque especial aos *Smart Walkers* (Andadores Inteligentes) e aos dispositivos de ajuda à interação social para crianças com TEA.
- **Plataforma Robótica para Interação Humano-Robô:** aqui é apresentada a proposta da plataforma robótica desta tese. São descritas a construção, adaptação e as formas de operação do sistema. Dentro deste capítulo é tratado com mais detalhe a parte de *hardware* da plataforma robótica. Além disso, é dado um enfoque ao funcionamento geral do sistema e como são processados os sinais dos sensores, a fim de gerar informação para o módulo de controle e sistema de segurança.

- **Aquisição de Dados e Controle:** é dada uma atenção especial aos algoritmos do sistema de controle e das regras de segurança. Neste capítulo são detalhados os modelos matemáticos usados, bem como a lógica usada para desenvolver os algoritmos de controle. Também são feitas provas de estabilidade dos controladores propostos e são exibidas as regras de segurança utilizadas.
- **Experimentos:** dentro deste capítulo são exibidos os protocolos para as sessões experimentais, bem como os métodos de avaliação utilizados, tanto da interface quanto do controle. Além disso, são mostradas as métricas usadas para a avaliação da plataforma robótica e os resultados das sessões experimentais realizadas.
- **Conclusões:** este capítulo faz uma discussão dos resultados obtidos nos experimentos realizados, tanto em relação à validação da plataforma robótica quanto à facilidade de uso da mesma. Também é mostrado que a plataforma robótica pode ser usada como uma possível ferramenta de terapia para mobilidade e interação social. Além disso, são exibidas as publicações que foram realizadas durante o processo da pesquisa realizada e são citados os trabalhos futuros para a continuidade desta pesquisa.

2 Estado da Arte

2.1 Tecnologias Assistivas

“Tecnologia Assistiva é uma área do conhecimento, de característica interdisciplinar, que engloba produtos, recursos, metodologias, estratégias, práticas e serviços que objetivam promover a funcionalidade, relacionada à atividade e participação de pessoas com deficiência, incapacidades ou mobilidade reduzida, visando sua autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social” (Comitê de Ajudas Técnicas, 2007).

A partir desta definição de tecnologia assistiva pode-se entender que esta é a área do conhecimento que invoca dispositivos ou equipamentos que ajudam pessoas com deficiências motoras ou cognitivas a terem uma melhor qualidade de vida, incluindo-as socialmente. Nas seções 2.2 e 2.3 serão mostrados alguns tipos de dispositivos de auxílio à mobilidade e de reabilitação cognitiva de pessoas com deficiência.

2.2 Sistemas de auxílio à mobilidade

Os dispositivos de assistência à mobilidade são desenvolvidos para auxiliar pessoas com mobilidade reduzida a se locomover e melhorar sua qualidade de vida. A classificação desses dispositivos pode ser feita em dois grandes grupos: alternativos e aumentativos. O grupo dos *alternativos* engloba os dispositivos que modificam a forma de locomoção da pessoa, que passa a não utilizar nem as pernas, nem as forças residuais dos membros inferiores, para realizar o movimento de andar. Exemplos de tais dispositivos são as cadeiras de rodas motorizadas e os veículos autônomos especiais como os Veículos Auto-Guiados (*Auto Guided Vehicles - AGV*) (FRIZERA et al., 2009; MARTINS et al., 2012). Estes tipos de dispositivos não requerem que a própria pessoa auxilie na locomoção propriamente dita, ou seja, ela não necessita colocar força no membro afetado a fim de conseguir realizar movimento, como faria se não tivesse problemas de locomoção, já que o dispositivo pode fazer isso por ela. Cadeiras de rodas tradicionais (manuais) também são considerados dispositivos alternativos, devido ao fato de não utilizarem os membros afetados (no caso as pernas).

De forma contrária aos dispositivos citados anteriormente, o grupo dos dispositivos *aumentativos* utilizam as forças residuais das pessoas, isto é, as forças que ainda restam do sistema locomotor afetado. Tais dispositivos recebem o nome de *aumentativos* exatamente por aumentarem a força residual do indivíduo (do membro afetado), sendo que é necessária a participação ativa da pessoa para que a locomoção ocorra. Dentro deste grupo estão

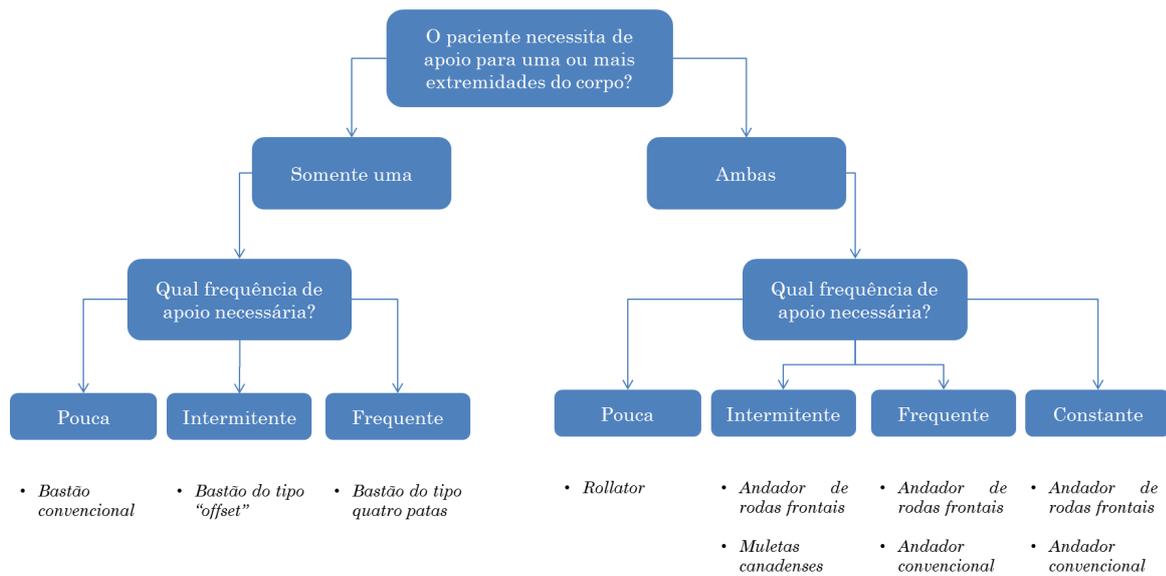


Figura 24 – Utilização de dispositivo de assistência à mobilidade. Adaptado de (BRADLEY; HERNANDEZ, 2011).

dispositivos como muletas, órteses, próteses e andadores. Há ainda uma subdivisão deste grupo em dispositivos de auxílio à mobilidade e dispositivos para fins de reabilitação e fisioterapia (MARTINS et al., 2012).

É importante ressaltar que os profissionais de saúde que cuidam de pessoas que possuem alguma capacidade residual de movimento nos membros afetados optam preferencialmente por dispositivos aumentativos ao invés de alternativos (MARTINS et al., 2012), pois a falta de uso da musculatura dos membros afetados pode provocar sua atrofia (LOTTERIO et al., 2014). De acordo com (BRADLEY; HERNANDEZ, 2011), é possível definir o tipo de dispositivo de ajuda que deve ser utilizado, os quais serão detalhados na seção 2.2.1, de acordo com a necessidade de suporte de peso e necessidade de estabilização do balanço, seguindo o fluxograma apresentado na Figura 24.

A utilização destes dispositivos, bem como a escolha dos mesmos, depende do tipo de mobilidade reduzida da pessoa. De acordo com a condição do indivíduo, pode haver necessidade de um ou mais tipos específicos de suporte, seja sensorial, físico, de monitoramento ou cognitivo (BRADLEY; HERNANDEZ, 2011). Além disso, é necessário saber se o dispositivo será utilizado para mobilidade diária ou para reabilitação. Todos esses fatores devem ser analisados pelos profissionais de saúde, a fim de oferecer ao paciente o melhor tratamento e o dispositivo de assistência à mobilidade mais adequado (MARTINS et al., 2012).

2.2.1 Tipos de Suporte

Entre os suportes de assistência de um andador encontram-se os suportes físico, sensorial, cognitivo e para o monitoramento de saúde (MARTINS et al., 2012; MACNAMARA; LACEY, 2000; RODRIGUEZ-LOSADA, 2008), de acordo com a função específica que pode ter:

- Suporte físico: auxílio que o dispositivo dá ao usuário para que este possa se locomover. Todos os dispositivos de assistência à mobilidade, desde muletas até andadores e exoesqueletos, têm como função principal melhorar a mobilidade do usuário e, para isso, os dispositivos suportam uma parte do peso e auxiliam no balanço do usuário. É o principal suporte dentro da categoria de dispositivo de assistência à mobilidade, porém não é o único, pois existem outros fatores que atrapalham a locomoção que podem não estar diretamente conectados ao sistema locomotor, como problemas visuais.
- Suporte sensorial: muitas vezes o problema com a mobilidade está associado a uma questão sensorial; em outras palavras, o usuário tem problemas em algum dos sentidos (principalmente a visão). Para casos como este, existe o suporte sensorial, ou seja, suportes que ajudam o usuário a se guiar, evitar obstáculos e ser mais independente, ainda que tenha problemas sérios de visão. O nome *suporte sensorial* se deve ao fato de que este suporte ajuda na parte de percepção do mundo ao redor (sensoriamento). Outra causa para problemas de mobilidade podem ser problemas cognitivos, como os relacionados à demência. Neste caso, é necessário orientar a pessoa, sendo usado o suporte cognitivo, que é o próximo item a ser apresentado.
- Suporte cognitivo: consiste em ajudar pessoas com problemas de orientar-se e localizar-se no espaço. Tais problemas podem aparecer em decorrência de doenças como Alzheimer, Parkinson e alguns tipos de demências. Um andador que oferece suporte cognitivo pode mostrar ou até mesmo guiar o usuário até o local desejado, caso este não saiba onde fica algum lugar específico. Também pode ter funções de lembrar o usuário de tomar remédios nos horários corretos e até levá-los ao local onde estão os remédios. Além disso, alguns andadores, para fornecerem suporte cognitivo, vão mapeando o ambiente à medida que são utilizados, enquanto outros já possuem previamente um mapa em sua memória. Uma vez mapeado o ambiente, o andador pode ajudar o usuário a ir para um local específico como um quarto dentro de uma casa, funcionando assim como um guia.
- Monitoramento de Saúde: este tipo de suporte garante o monitoramento de saúde do usuário durante sua reabilitação ou dentro de uma clínica. Tal monitoramento pode ser necessário para garantir ao usuário bem-estar e tratamento de algumas



Figura 25 – Tipos de dispositivos de ajuda a mobilidade de acordo com o apoio no solo.

doenças. Este suporte avalia os sinais relacionados com a forma de andar do usuário, e assim, junto com outros sensores, pode determinar vários tipos de doenças e problemas de locomoção. Além disso, há andadores que podem monitorar outros sinais como, por exemplo, batimentos cardíacos, temperatura, sinais mioelétricos (sEMG - eletromiografia de superfície, em inglês *surface Electromyography*) e, assim, fornecer várias informações sobre o estado de saúde do usuário, montando um histórico médico que pode ser útil para os cuidadores e para o paciente. Esses dados podem ainda, ser enviados por uma rede sem fio para análise externa.

2.2.2 Andadores

Os andadores, que são um dos temas desta tese de doutorado, são estruturas que oferecem, primariamente, suporte de peso e balanço ao usuário (suporte físico). Normalmente, este dispositivo suporta parcialmente o peso do usuário, transferindo-o para a estrutura do próprio andador. Isso torna a carga sobre os membros e articulações inferiores, como o joelhos, mais leve, além de distribuir parte da carga para os membros superiores. Em termos de estrutura e construção dos andadores, existem três tipos, classificados de acordo com a força de reação em relação ao solo, como mostrado na Figura 25.

As três estruturas mais comuns dos andadores, apresentadas na Figura 25, são:

- Estrutura Convencional (*Standard Frames*): a estrutura padrão ou convencional (Figura 25a), também conhecida como Zimmer-Frame ou estrutura de quatro patas, possui quatro pontos de apoio, sendo necessário que o usuário o levante a cada passo. Isso promove uma marcha não natural e exige força, embora favoreça no quesito equilíbrio e balanço em comparação com os andadores que possuem rodas. Existe uma versão chamada *Estrutura Recíproca (Reciprocal Frame)*, que difere da *Standard Frame*, pois os lados do andador se movem alternadamente, permitindo uma marcha mais natural (LACEY; DAWSON-HOWE; VERNON, 1998).

- Estrutura de rodas frontais (*Front Wheeled*): estrutura que possui duas rodas frontais para permitir que o usuário ande sem levantar totalmente o andador (Figura 25b). É melhor, quando comparado ao Zimmer-Frame, no quesito de qualidade da marcha, já que esta estrutura se mantém muito mais natural, uma vez que não é necessário suspender totalmente o andador do chão, exigindo menor esforço físico para andar. Porém, é importante enfatizar que o usuário tem que ter um bom controle e equilíbrio, pois um descuido pode fazer que o andador deslize, quando a parte que não tem rodas está no ar, para dar o passo. É comum a presença de freios neste andador para que, caso ocorra o deslizamento das rodas, este possa ser acionado próximo ao guidão, freando o andador e impedindo a queda do usuário (MARTINS et al., 2012).
- Estrutura tipo *rollator*: estrutura que garante uma marcha mais natural por não necessitar levantar nem abaixar o andador, exigindo menos força (Figura 25c). Em sua forma não motorizada, o usuário o empurra e este vai sustentando o peso e ajudando no balanço. Dos três modelos mostrados na Figura 25, é o que exige menor força e promove uma marcha mais natural. No entanto, exige maior controle, já que com quatro rodas sempre em contato com o solo, estas podem deslizar e o usuário pode cair (MARTINS et al., 2012). Assim como os andadores de rodas frontais, muitos deles possuem freios para serem acionados caso ocorra risco de queda do usuário por deslizamento das rodas. Uma outra classificação dos andadores tipo *rollator* se refere ao fato de poderem ou não utilizar propulsão e orientação por meio de motores, classificados em andadores ativos ou passivos, (FRIZERA-NETO, 2010). A estrutura ativa do andador *rollator* é a utilizada no andador robótico desta Tese de doutorado, o qual, por ter controle mecânico e eletrônico, é capaz de frear e controlar a rotação das rodas, o que dá ao usuário uma maior segurança para não cair durante o uso, e a vantagem do sistema de controle garantir uma maior segurança e controle da velocidade das rodas, impedindo inclusive os deslizamentos das rodas e, conseqüentemente, as quedas (FRIZERA-NETO, 2010).

Os andadores convencionais de quatro patas, por serem mais estáveis, podem ser utilizados em miopatias severas e neuropatias, dependendo do grau da doença. De forma similar, um andador com rodas frontais também pode ser utilizado para tais doenças, desde que a estabilidade exigida seja menor, podendo também ser utilizado para quem sofre de doenças de Parkinson (BRADLEY; HERNANDEZ, 2011). Já os andadores do tipo *rollator* só podem ser utilizados por pessoas que têm condições de controlar muito o andador, para não correr o risco de deixá-lo escorregar livremente, o que pode levar a uma queda e a prejuízos à saúde (MARTINS et al., 2012). Pessoas com artrite moderada e alguns problemas pulmonares também podem usar este andador, já que pode ter uma velocidade de reação suficiente para evitar quedas (BRADLEY; HERNANDEZ, 2011).

2.2.3 Andadores Robóticos

Os andadores robóticos surgiram como uma evolução dos andadores convencionais, quando lhes foram agregados sistemas eletrônicos embutidos, que permitem, além de aliviar a carga da pessoa, desviar de obstáculos, mapear o ambiente, auxiliar os usuários em tarefas cognitivas (quando esta parte está prejudicada), dentre outras funções. Estas funções extras presentes nos andadores robóticos auxiliam os usuários, já que pessoas que necessitam de suporte podem possuir também problemas que não se limitam à mobilidade, como problemas cognitivos, sensoriais e também problemas de saúde. Os andadores robóticos se diferem dos convencionais por poderem oferecer, além do suporte físico, suporte sensorial, cognitivo e monitoramento da saúde do usuário. Isso é feito por meio de sensores e atuadores, associados a controladores para coordenar o sistema.

Na literatura são encontrados vários tipos de andadores robóticos desenvolvidos ao redor do mundo. Há uma variedade de tipos e suportes que os mesmos oferecem, sendo que o suporte físico é comum a todos. Alguns exemplos de andadores robóticos são descritos a seguir. São andadores que utilizam sensores de força, ultrassom, laser, infravermelho e IMUs e que possuem diversas funcionalidades, o que permite auxiliar pessoas idosas e/ou com problemas de mobilidade.

2.2.3.1 RT Walker

É um andador passivo que contém um sensor laser, para monitorar o entorno, e dois outros sensores laser para localizar as pernas usuário, além de inclinômetros para determinar a inclinação do andador. A estratégia de controle deste andador para se deslocar e evitar colisões baseia-se em forças virtuais de reação que são criadas a partir da presença de obstáculos ao redor do andador, além da análise da dinâmica do usuário ao utilizar os freios. Também há uma outra versão deste andador que utiliza um mapa do ambiente para realizar seu deslocamento (HIRATA; MURAKI; KOSUGE, 2006). Por ser um dispositivo passivo, a força de propulsão do andador é feita pelo próprio usuário, enquanto o dispositivo orienta o ângulo de direção das rodas. Na Figura 26 pode-se ver um usuário utilizando o RT Walker (HIRATA; HARA; KOSUGE, 2004).

2.2.3.2 GUIDO Smart Walker

O *GUIDO Smart Walker* é um andador cujo foco principal são as pessoas com problemas de visão. Algumas versões deste andador possuem sensores de ultrassom, e as mais modernas também contam com sensores laser para desvio de obstáculos. Existem várias versões do GUIDO, que começou a ser oficialmente comercializado no ano 2000, como mostra a Figura 27a. Este tinha menos recursos do que o recente, mostrado na Figura 27b, o qual possui um *design* mais sofisticado, além de ter um sistema eletrônico com microcontrolador mais avançado (Hitachi H8), que gerencia a odometria, ajuda a identificar



Figura 26 – Usuário com o RT Walker.



(a) Versão antiga



(b) Versão recente

Figura 27 – Andador GUIDO em suas diferentes versões (RODRIGUEZ-LOSADA, 2008).

a intenção de movimento do usuário e promove uma melhor interface (RODRIGUEZ-LOSADA, 2008).

As novas versões do GUIDO mapeiam o ambiente utilizando a técnica SLAM - *Simultaneous Localization And Mapping* (Mapeamento e Localização Simultânea). Com a construção do mapa do ambiente é possível inferir a localização do andador e evitar obstáculos, sendo que o usuário pode se mover dentro do ambiente, mesmo com obstáculos, sendo avisado por meio de sinais sonoros e frenagem das rodas (RODRIGUEZ-LOSADA et al., 2005).

O GUIDO possui três modos de operação: o manual, o programado e o automático. No modo de operação manual, o usuário é avisado sobre a presença de obstáculos, podendo,



Figura 28 – JARoW - JAIST Active Robotic Walker (LEE; OHNUMA; CHONG, 2010).

por meio de botões de mudança de direção e alavancas de freio, desviar do obstáculo. No modo programado, existe um destino já definido, sendo o usuário guiado até o mesmo. Já no modo automático, o controlador guia totalmente o usuário, seguindo certos caminhos previamente definidos (RODRIGUEZ-LOSADA et al., 2005).

2.2.3.3 JARoW

Outro andador encontrado na literatura é o JARoW, desenvolvido no JAIST (*Japan Advanced Institute of Technology*), o qual utiliza rodas omnidirecionais para melhorar a sua manobrabilidade. A estrutura do JARoW (Figura 28) é feita de liga de alumínio, o que permite seu baixo peso, de apenas 20 kg. As pernas do usuário são detectadas por dois sensores infravermelhos posicionados na parte inferior do andador. O controlador utiliza a informação das posições das pernas para definir uma matriz de velocidade de saída para cada motor, a cada intervalo de tempo (LEE; OHNUMA; CHONG, 2010).

2.2.3.4 UFES's Smart Walker

O *UFES'S Smart Walker*, é um andador robótico previamente desenvolvido na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) feito em metal e que conta com apoio para braços e suporte para mãos. Ele possui um sensor laser para detectar a distância às pernas do usuário, além de uma IMU (*Inertial Measurement Unit*) utilizada na cintura do usuário, a qual é usada para detectar a orientação do usuário. Este andador também possui sensores de força localizados sob os apoios para os braços, os quais são utilizados para inferir a intenção de movimento do usuário, fornecendo mais informações ao controlador.



Figura 29 – UFES's Smart Walker.

Este controlador ajusta a distância e o ângulo de orientação do usuário em relação ao sensor laser, e, conseqüentemente, em relação ao andador. Além de auxiliar a mobilidade, este andador pode ser utilizado em sessões de fisioterapia, diminuindo a carga necessária nos membros e ajudando no balanço e equilíbrio do usuário. Outra funcionalidade deste andador é a possibilidade de utilizá-lo para o estudo da marcha humana (ELIAS *et al.*, 2012). Na Figura 29 é mostrado o andador UFES's Smart Walker.

2.2.3.5 Outros dispositivos e comparação

Existem outros tipos de andadores robóticos, como o andador SIMBIOSIS, desenvolvido para estudo da marcha humana e suporte a pessoas com problema de mobilidade por meio da análise de interação de forças do usuário com o andador e da posição dos pés em relação ao mesmo (FRIZERA-NETO, 2010); o andador PAM-AID desenvolvido para auxílio a pessoas com problemas de visão grave (MACNAMARA; LACEY, 2000); o PAMM-AID desenvolvido para monitorar a saúde do usuário (DUBOWSKY *et al.*, 2000); o iWalker, desenvolvido para ser utilizado dentro de um ambiente estruturado (KULYUKIN *et al.*, 2008), dentre outros. Esses andadores utilizam outros sensores diferentes aos aqui apresentados, como GPS, sensores RFID, dentre outros.

2.3 Sistemas de reabilitação cognitiva

Uma vez abordado o tema de dispositivos de ajuda à mobilidade, nesta seção são abordados os sistemas de reabilitação cognitiva. Estes sistemas podem ser aplicados tanto àquelas pessoas que possuem transtornos exclusivamente cognitivos (sem implicação

motora), como àquelas que, devido ao déficit motor, apresentam problemas de cognição. São duas abordagens distintas, visto que são dois problemas diferentes. O primeiro envolve majoritariamente aspectos cognitivos e comportamentais, enquanto o segundo auxilia a comunicação que é prejudicada pela falta de motricidade, como o caso de crianças que não podem se locomover e, por isso, têm menos interação com o meio em que vivem. Este último caso é uma mescla entre auxílio motor e auxílio cognitivo.

Neste contexto de ajuda à terapia comportamental é que as tecnologias assistivas para desenvolvimento cognitivo (em inglês conhecido pela sigla ADCS - *Assistive technologies for Developing Cognitive Skills*) podem auxiliar. Ainda dentro deste contexto, se encaixam as crianças com Transtorno do Espectro Autista (TEA), que, por terem tal condição, necessitam de apoio cognitivo e comportamental.

Robôs lúdicos, por chamarem muito a atenção, serem atrativos, coloridos e mais previsíveis que os humanos, são ferramentas capazes de auxiliar as crianças com TEA a desenvolver aspectos de interação social (CABIBIHAN et al., 2013). A ideia do “robô lúdico” dentro do contexto aqui apresentado é que o mesmo se pareça com um brinquedo e tenha aspectos coloridos e agradáveis para chamar a atenção da criança. Desta forma, é promovida uma interação da criança com o robô (o robô é o intermediário para posterior melhora da interação social com humanos), através da demonstração de interesse da criança em brincar com o robô, (CABIBIHAN et al., 2013). De fato, as crianças que são afetadas pelo TEA normalmente fazem terapias que as ensinam a desenvolver os aspectos sociais e, desta forma, as auxiliam a ter uma melhor qualidade de vida.

Estudos demonstram que tais terapias de interação aumentam as chances de desenvolver as habilidades sociais em tais crianças (SCASSELLATI; HENNY; MATARIĆ, 2012). Nessas terapias são utilizados brinquedos e jogos para estimular socialmente as crianças, fazendo-as interagir tanto com o ambiente a sua volta, como com as pessoas - justamente uma das maiores dificuldades das crianças com TEA. Como cada criança possui um comportamento distinto, é comum que elas recebam tratamentos e estímulos diferentes.

A base principal dos estudos para melhorar as habilidades das crianças com TEA incluem verbalização, imitação e sensibilidade ao toque (CABIBIHAN et al., 2013; KIM et al., 2013). Estudos como (MICHAUD; DUQUETTE; NADEAU, 2003; DUQUETTE; MICHAUD; MERCIER, 2008) mostram que robôs podem ser úteis em terapias para crianças que possuem TEA; pois tais crianças têm uma tendência a reagir melhor com robôs do que com outros humanos, possivelmente devido à previsibilidade destes últimos, já que os humanos tendem a ser vistos como mais ameaçadores do que robôs (DUQUETTE; MICHAUD; MERCIER, 2008; CABIBIHAN et al., 2013). Devido a este fator, o robô utilizado na interação social com crianças com TEA deve ser o mais amigável possível e, preferencialmente, deve ter uma aparência lúdica e que deixe a criança confortável

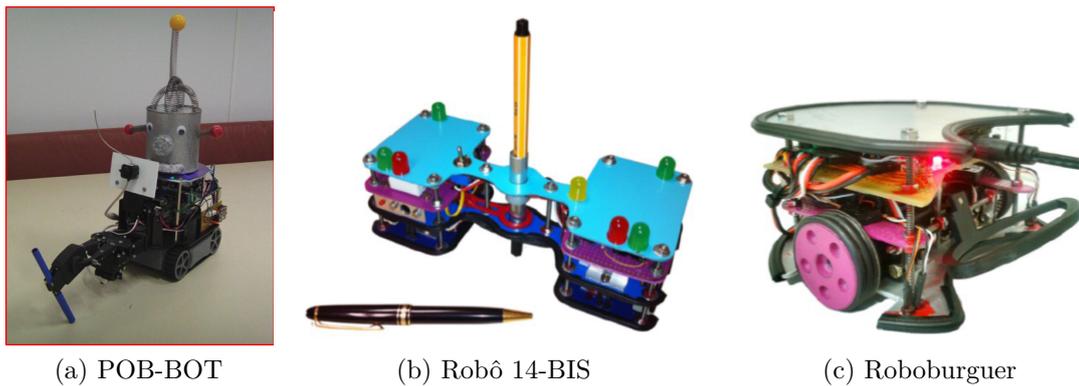


Figura 30 – Robôs para interação com crianças com deficiência.

em brincar e interagir com o mesmo. Desta forma, é possível auxiliar o desenvolvimento pedagógico e neurológico dessas crianças com TEA (CABIBIHAN *et al.*, 2013; KIM *et al.*, 2013; KOZIMA; MICHALOWSKI; NAKAGAWA, 2009).

2.3.1 Tipos de robôs para interação com crianças com deficiência

A literatura apresenta alguns exemplos de uso da robótica para interação com crianças com deficiência (Figura 30), como é o caso de um manipulador robótico para interação de crianças com o entorno (COOK; HOWERY, 1999), (COOK *et al.*, 2005). Nesse estudo, a criança controla o manipulador robótico por meio de pulsadores para pegar um brinquedo específico dentro de uma caixa de brinquedos.

Outro exemplo é o uso de um robô móvel e sensores de inclinação e mioelétrico para comandar, via Bluetooth, a pinça de um robô para desenhar com um pincel, sobre uma superfície de papel. Outros exemplos são os robôs 14-BIS e o Roboburguer apresentados em (FERASOLI-FILHO *et al.*, 2012), os quais são usados para melhoria de comunicação, interação social e desenvolvimento cognitivo através de desenhos e brincadeiras com o robô.

Com respeito ao uso de robôs pode-se citar o PaPeRo e o IROQUIIB, sendo o primeiro um robô assistente pessoal que também promove a interação humano-robô (incluindo comportamentos variados), possui também uma função que ajuda a cuidar de crianças; já o segundo funciona como um robô para auxiliar crianças no ensino da língua inglesa e que, por este motivo, também pode ajudar na parte cognitiva. Os dois robôs estão representados na Figura 31.

No caso específico do uso de robôs para crianças com TEA, existem robôs lúdicos que foram especialmente desenhados para interação com as essas crianças. Esses robôs normalmente utilizam uma fantasia amigável (tal como mostrada na Figura 32), pois, desta forma, há uma menor probabilidade de provocar reações negativas, como ansiedade e medo, nas crianças.

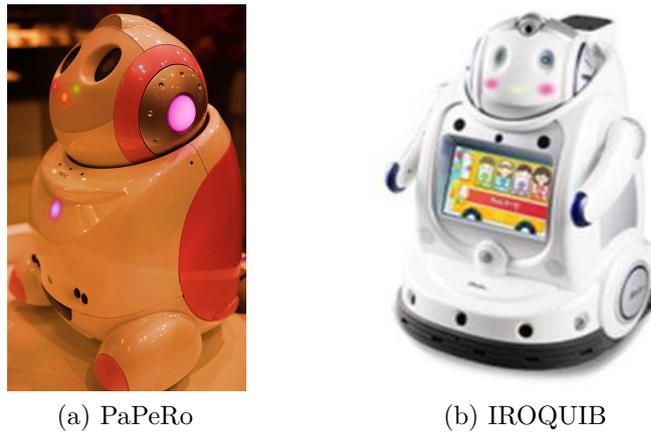


Figura 31 – Robôs para interação social e aprendizagem.

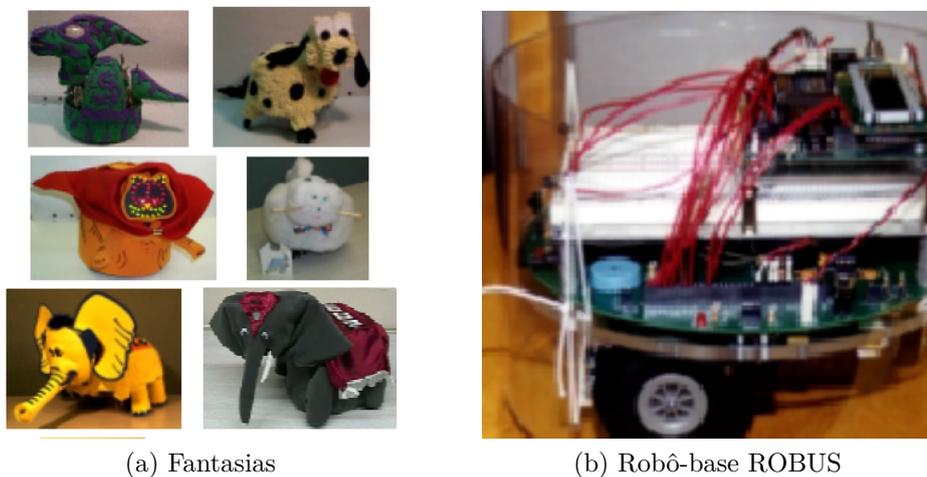


Figura 32 – Fantasias para o robô ROBUS usadas para interação com crianças com TEA (competição *RoboToy Contest* realizada em Sheerbroke, Quebec, Canadá).

Alguns exemplos de robôs móveis para interação com crianças com TEA podem ser vistos na Figura 32. O ROBUS (ROBot of University of Sherbrooke), usado para pesquisas com o TEA no Canadá é um exemplo desses robôs. O ROBUS conta com diversas fantasias, o que lhe dá a possibilidade de interagir com a criança de diversas formas diferentes (MICHAUD; CLAVET, 2001).

Outro exemplo é o robô Keepon, mostrado na Figura 33b (KOZIMA; MICHALOWSKI; NAKAGAWA, 2009). Este robô consegue movimentar-se de forma divertida de forma a chamar a atenção das crianças com TEA, sendo que também conta com sistema que reage aos estímulos do ambiente, como sons, luzes e torque (quando tocam o robô). Já o robô PLEO (Figura 33a), construído em formato de dinossauro, foi desenvolvido para verbalizar e se movimentar de acordo com a interação com a criança e conta com diversos sensores que captam sinais de toque para verificar a interação com a criança com TEA (KIM et al., 2013).

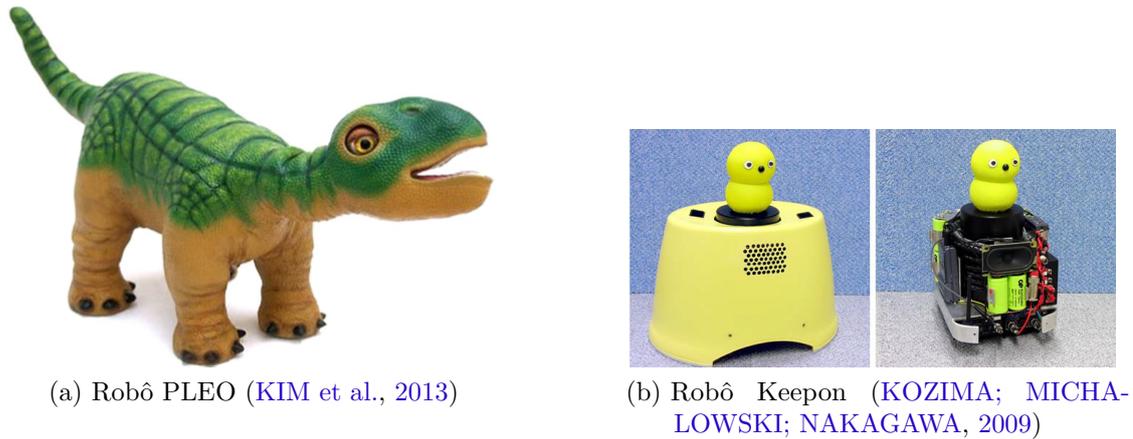


Figura 33 – Exemplos de robôs desenvolvidos para interação crianças-robô.

Como pode ser visto, os trabalhos anteriores se baseiam em estimular as crianças com TEA a tomarem a iniciativa de interagir com os robôs. Em linhas gerais, isso se dá por meio de formas lúdicas e brincadeiras interativas dos robôs, fazendo com que a criança não veja o robô como algo imprevisível ou uma ameaça que a faça isolar-se, mas sim como um dispositivo que pode ser utilizado para entretê-la. Conseqüentemente, em caso de sucesso na interação, com o robô, estudos indicam que, em alguns casos, haverá uma melhor resposta em termos de socialização com humanos. Além dos robôs citados anteriormente, outros robôs usados para interação com crianças com TEA são mostrados em estudos como (KOZIMA; MICHALOWSKI; NAKAGAWA, 2009; SCASSELLATI; HENNY; MATARIĆ, 2012; CABIBIHAN et al., 2013; KIM et al., 2013; ROBINS; DAUTENHAHN, 2014).

2.3.2 Alguns trabalhos com interação humano-robô

Dentro da literatura, há alguns trabalhos com interação humano-robô com o intuito de auxiliar crianças com TEA. Nenhum deles, até o momento, reúne as características da plataforma robótica que será apresentada aqui nesta tese. Contudo, vale a pena citá-los como exemplo de que este tema é relevante e tem tido atenção de pesquisadores de vários locais do mundo.

Em (WAINER et al., 2014), o autor utiliza um robô (KASPAR) para auxiliar a interação entre duas crianças por meio de jogos e também interação direta criança-robô (sem outra criança envolvida). Desta maneira, o robô pode ajudar a interação humano-humano entre duas crianças.

Já em (SIMUT et al., 2016) é usado o robô PROBO para imitar interações sociais que os humanos teriam com as crianças. Aspectos como o olhar e a atenção, dentre outras variáveis como atenção conjunta, fala, afetividade positiva eram analisadas, porém apenas o olhar apresentou maior diferença nas crianças com TEA, enquanto as outras variáveis se mantiveram sem grande diferença.



Figura 34 – Paro: robô não antropomórfico (CABIBIHAN et al., 2013).

Estudos como (ROBINS et al., 2004) mostra o uso de um robô em formato de boneca, chamado ROBOTTA. Ela funciona como mediadora para promover a atenção entre crianças e professores/cuidadores. Ao longo do tempo, as crianças se sentiram mais confortáveis com o robô e procuraram interagir mais e compartilhar experiências com os professores/cuidadores.

Há ainda outros estudos como (SHAMSUDDIN et al., 2012) em que é mostrado que um robô NAO ajudou a iniciar a interação e a verbalização de uma criança com TEA de forma mais eficiente que jogos de computador. Além disso, trabalhos como (KOZIMA; MICHALOWSKI; NAKAGAWA, 2009) mostram que as crianças com TEA conseguiram ter interações diádicas (criança-robô) e triádicas (criança-robô-criança) por meio do uso de robôs como o KEEPON, que foi programado para ser simples de ser usado, embora fosse capaz de interagir de forma complexa, com movimentos e sons para não deixar a criança entediada. Mais detalhes sobre trabalhos para auxiliar crianças com TEA podem ser vistos em (VALADÃO et al., 2016).

2.3.3 Classificação dos robôs de acordo com a forma

Os robôs utilizados para estimular crianças com TEA podem ser divididos em antropomórficos, não-antropomórficos e não-biomiméticos, de acordo com a sua aparência (SCASSELLATI; HENNY; MATARIĆ, 2012; CABIBIHAN et al., 2013). A primeira categoria relembra aspectos humanos e tenta imitar tanto ações como aparência humana. Já a segunda categoria são robôs que têm características que se assemelham com um ser biológico, como animais (mas sem características humanas). A última categoria é composta por robôs que não têm aspectos biológicos e não são associados a nenhum ser biológico.

Os robôs PLEO (Figura 33a), Keepon (Figura 33b) e Paro (Figura 34) (WADA et al., 2004; SALTER; DAUTENHAHN; Te Boekhorst, 2006; KOZIMA; MICHALOWSKI; NAKAGAWA, 2009; SCASSELLATI; HENNY; MATARIĆ, 2012; KIM et al., 2013) são exemplos de robôs não antropomórficos.

Já os robôs Lego Mindstorm NTX, NAO e KASPAR (DAUTENHAHN, 2003; CABIBIHAN et al., 2013; ROBINS; DAUTENHAHN, 2014) são considerados robôs antropomórficos, pois se assemelham a feições humanas (Figura 35). Como exemplo de robôs não biomiméticos, estão o robô Pekee e o Roball (MICHAUD; DUQUETTE;



Figura 35 – Exemplos de robôs antropomórficos (CABIBIHAN et al., 2013).

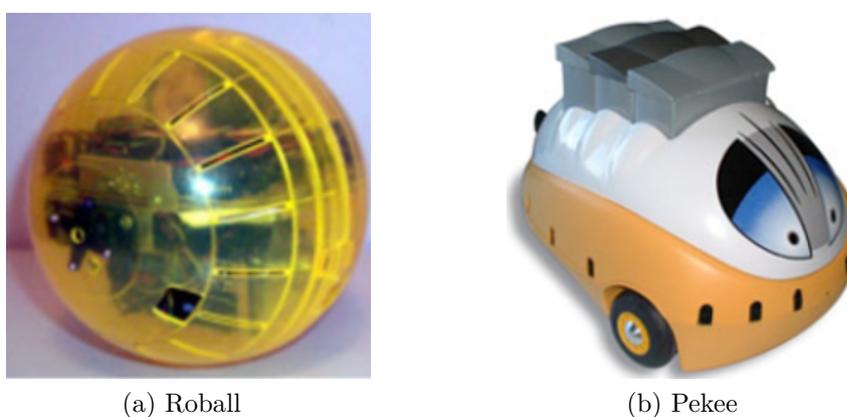


Figura 36 – Exemplos de robôs não biomiméticos (CABIBIHAN et al., 2013).

NADEAU, 2003; SALTER; DAUTENHAHN; Te Boekhorst, 2006) mostrados na Figura 36.

Todos estes tipos de robôs podem ser utilizados em terapias com crianças com TEA para estimulá-las e assisti-las no desenvolvimento de suas capacidades sociais. Devido à possibilidade de utilização desses robôs para aplicações sociais, estes são conhecidos dentro do campo da robótica como “robôs de assistência social”, uma vez que podem ser usados para auxiliar pessoas através de interação humano-robô (SCASSELLATI; HENNY; MATARIĆ, 2012).

3 Plataforma para Interação Humano-Robô

Neste capítulo, é mostrada a adaptação de uma plataforma robótica para que a mesma funcione tanto como andador robótico como robô para interação social com crianças com TEA. São mostradas, de forma detalhada, as modificações e adaptações feitas na plataforma robótica para o encaixe de um andador convencional (para criar o andador robótico) e de uma fantasia (para criar o robô para interação com as crianças com TEA). Em ambos os casos é utilizada a plataforma robótica Pioneer 3-DX como elemento principal. A Figura 37 mostra a plataforma robótica, juntamente com o sensor laser, o qual é utilizado tanto para detectar a posição e orientação das pernas do usuário do andador robótico, quanto a distância à criança com TEA.

A ideia de colocar duas funcionalidades para a plataforma robótica é mostrar a versatilidade do sistema, em especial do núcleo que se mantém o mesmo nos dois modos de operação. Além disso, prova-se que é possível um mesmo núcleo robótico auxiliar dois tipos de necessidades especiais, sendo uma de caráter físico (mobilidade reduzida nos membros inferiores) e outro de caráter cognitivo-comportamental (transtorno do espectro autista).

3.1 Adaptação do andador convencional à plataforma robótica

Para que a plataforma robótica funcione como andador robótico, foi feita uma estrutura mecânica para encaixar o andador no robô. Tal estrutura foi construída a partir de um andador convencional. A adaptação foi feita para permitir a usabilidade do andador com o cotovelo a 90° e para fazer com que a estrutura do andador tivesse baixa influência sobre a dinâmica do robô, facilitando o seu controle. A adaptação, que está detalhada na Figura 38, consistiu nos seguintes passos:



(a) Plataforma robótica Pioneer 3-DX



(b) Sensor laser SICK LMS 200

Figura 37 – Plataforma robótica e sensor laser utilizados nesta pesquisa.

- Mudança da posição do suporte de borracha que vem com o andador para o apoio do braço (Figura 38, item 1).
- Inclusão de suporte de braço com espuma para garantir conforto do usuário (o qual irá utilizar o andador com os cotovelos apoiados em 90° com relação a este suporte) (Figura 38, item G).
- Inclusão de manoplas para que o usuário apoie as mãos enquanto anda (Figura 38, item 2).
- Substituição dos apoios de contato com o chão (rodas e patas) por apoios com rodas loucas (rodas castor), de forma a proporcionar ao andador uma natureza holonômica, a qual é compensada pela plataforma robótica (que possui restrições não-holonômicas). Além disso, as furações das “patas” que regulam a altura do andador foram trocadas para posições mais altas para permitir que o usuário fique com os cotovelos a 90° em relação ao tronco (Figura 38, item D).
- Adaptação de barras laterais entre os apoios frontal e traseiro para garantir maior estabilidade. Para prender as barras foram utilizados grampos em U e porcas (Figura 38, itens 3 e 4, respectivamente).
- Adaptação de uma barra entre as partes esquerda e direita do andador. Isso foi necessário, pois, como o andador possui certa flexibilidade, a não colocação da barra poderia fazê-lo ceder durante sua utilização. Em outras palavras, esta barra garante a rigidez da estrutura do andador enquanto está sendo utilizado (Figura 38, item 5).
- Suporte para adaptar o andador modificado à plataforma robótica. Foi construído um suporte que conecta os apoios frontais do andador a uma barra chata, a qual, por sua vez, se conecta à plataforma robótica por meio da chapa superior que o andador adaptado possui. Já existem dois furos na parte superior do robô, os quais foram aproveitados para não ser necessário fazer outras alterações no chassi da plataforma robótica. A conexão entre a barra chata e o robô é feita por meio de parafuso e porca borboleta. Com isso, o andador fica preso, sob pressão, ao chassi da plataforma robótica (Figura 38, item 6).
- Na Figura 38, o item A representa o andador convencional; o item B, a plataforma robótica; o item C, o sensor laser; e os itens E e F, um suporte de madeira para alojar as baterias do sensor laser e um conversor WiFi-Ethernet para conexão remota.

Como mencionado anteriormente, o andador robótico desenvolvido possui quatro rodas loucas (rodas tipo castor) do andador convencional modificado, além de uma roda louca e um par de rodas diferencial tracionadas da plataforma robótica. As quatro rodas loucas do andador fazem com que não se altere de forma significativa a dinâmica do

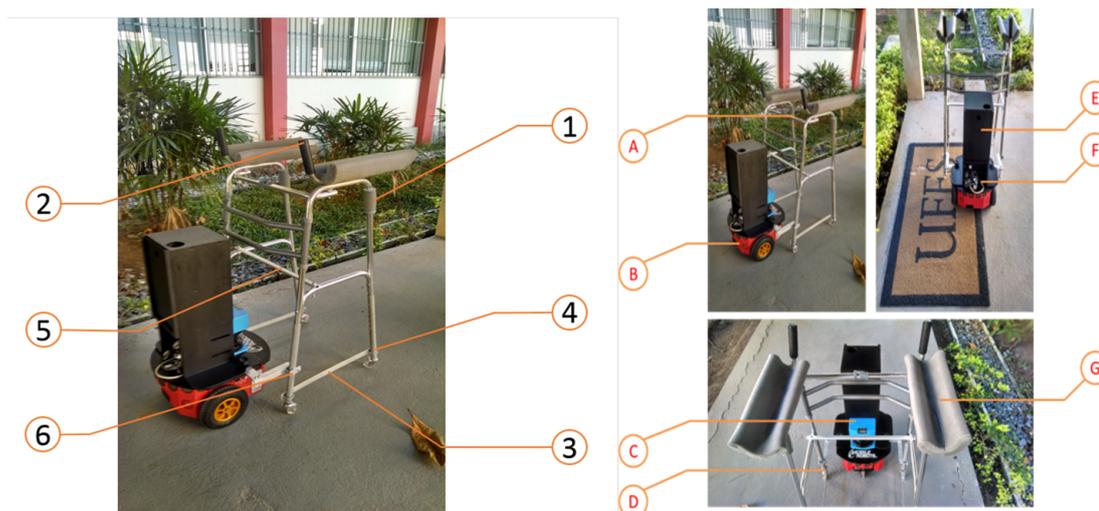


Figura 38 – Detalhes da adaptação do andador à plataforma robótica.

robô. Desta forma, isso proporciona ao sistema um formato adequado e compatível com o andador original e ainda faz com que o robô tenha que suportar menos carga, já que esta é distribuída entre a plataforma robótica e a estrutura do andador adaptada. Não ocorre sobrecarga do robô, pois o mesmo não carrega parte significativa do peso do usuário. A maior parte fica a cargo da estrutura mecânica do andador, fazendo com que o robô fique dentro do limite de carga que pode suportar. Além disso, a própria pessoa também contribui para o suporte de peso, já que parte do peso continua sendo suportado pelas pernas do usuário.

3.2 Robô para interação com crianças com TEA

A configuração da plataforma robótica para transformar-se em um robô para interação com crianças com TEA tem como princípio entreter e interagir com a criança por meio de um sistema lúdico. Assim, foi adaptada uma fantasia à plataforma robótica, a qual foi construída de forma bem colorida, com molas nos braços, detalhes no rosto (cílios) e cabelo (peruca), para que, apesar de ter aspecto semelhante a um robô, tivesse uma aparência amigável feminina e chamasse a atenção das crianças. O robô desenvolvido pode ser visto na Figura 39, sendo denominado MARIA (*Mobile Autonomous Robot for Interaction with Autistics*). Este robô, apesar de ter algumas características humanas, mais se assemelha a um brinquedo do que a um robô propriamente dito, sendo classificado como não-biomimético.

Nesta configuração, a plataforma robótica e a estrutura de madeira utilizada para dar suporte mecânico aos dispositivos multimídia ficam ocultos dentro da fantasia. Tal fantasia possui uma abertura superior, para alojar o monitor, o qual exibe as animações de vídeo, e uma abertura inferior para alojar o sensor laser.



Figura 39 – Robô MARIA para interação com crianças com TEA.

Para realizar os experimentos com as crianças com TEA, o robô utiliza três computadores: um interno, próprio da plataforma robótica, um sobre a plataforma robótica (embutido) e um computador externo para gerenciamento do robô. O computador embutido controla tanto o áudio (através de alto-falantes), quanto o vídeo exibido no monitor. Já o computador interno do robô processa os comandos de velocidade enviados pelo gerenciador (computador externo) e também envia dados do sensor laser para serem processados pelo gerenciador, o qual possui maior capacidade computacional. É importante comentar que as conexões são feitas por meio de um roteador ao qual os três computadores estão conectados. Para isso é utilizado um conversor WiFi-Ethernet ligado à entrada de rede do robô, o qual possibilita à MARIA possuir conexão WiFi.

Dentro da interface computacional desenvolvida existe uma entrada para indicar ao robô qual é o comportamento a ser realizado com as crianças. Foram propostos os comportamentos de “Apresentação da MARIA” e “Brincando com a MARIA”. Todos os comportamentos foram propostos com base em estudos de (CABIBIHAN et al., 2013), os quais mostram alguns tipos de comportamentos importantes para serem utilizados na terapia de crianças com TEA de forma a melhorar sua interação social, e que são:

- Imitação: a imitação é um processo importante na aprendizagem. Crianças aprendem por meio de imitação e exploração do meio em que vivem (COOK et al., 2005). Por

isso, atividades de interação que se baseiam na imitação são importantes para o desenvolvimento cognitivo e comportamental das crianças.

- Contato visual: o contato visual é uma ferramenta importante no diagnóstico de crianças com TEA, já que elas possuem dificuldade em manter contato visual com outras pessoas, pois isso representa uma interação e estabelece um contato mútuo. O robô MARIA, nestes casos, entra então como intermediário no processo de interação das crianças com outras pessoas. Além disso, o robô MARIA não apresenta tanta riqueza de detalhes e expressões, o que faz com que o mesmo seja mais simples de ser compreendido pela criança com TEA em comparação com outros humanos.
- Atenção conjunta: as crianças com TEA têm dificuldades em manter ações conjuntas, já que o foco de tais crianças são em ações que não necessitam da participação de terceiros. Nas terapias propostas que trabalham a ação conjunta, o terapeuta conduz a criança e o robô MARIA a olharem e a terem atenção em um foco específico. Ao fazer isso, trabalha-se a habilidade de atenção conjunta da criança com TEA.
- Atividade de turnos: atividades que requerem turnos, isto é, em que a criança tem que compartilhar ações, podem ser desafiadoras para crianças com TEA. Por isso, essa atividade faz com que elas pensem nas ações coletivamente ao invés de ficar apenas nos “pensamentos internos”, característica marcante no Transtorno do Espectro Autista (TEA).
- Reconhecimento de expressões e emoções: a percepção e expressão de emoções são tarefas difíceis para crianças com TEA. Por isso, o robô MARIA foi configurado com uma única expressão, tornando-se algo menos estressante para as crianças compreenderem.
- Interações iniciais por iniciativa própria: crianças com TEA têm dificuldades de iniciar a interação por conta própria, até mesmo para pedir algo que necessitem. O terapeuta, nas sessões, procura fazer com que a criança tenha que pedir o brinquedo com o qual quer brincar, ao invés de deixá-lo facilmente ao alcance da mesma. Isso faz com que a habilidade de iniciar a interação seja desenvolvida, ajudando a tratar possíveis comportamentos agressivos que possam surgir quando a criança quer algo, mas não consegue se comunicar para pedir o que necessita.
- Interações com três agentes: considera-se interação com três agentes, quando, além da criança e do robô, tem-se a participação de uma outra pessoa, que pode ser inclusive o pesquisador ou o terapeuta. Desta forma, o robô MARIA funciona como intermediário e como participante da sessão, fazendo com que haja interação entre as três partes.

3.3 Funcionamento do sistema

O funcionamento do sistema é baseado em oito partes: (1) Dados de entrada via interface; (2) Aquisição dos dados pelos sensores; (3) Comportamento desejado do robô; (4) Processamento dos dados; (5) Controle; (6) Regras de Segurança; (7) Envio dos comandos para o robô e (8) Relatório do experimento. A Figura 40 mostra as partes em que se divide o funcionamento geral do robô. Ressalta-se que os controles possíveis, bem como as regras de segurança, variam de acordo com o modo de operação do robô (em modo “andador” ou modo “interação social”). Cada um destes itens será explicado nas seções subsequentes.

3.3.1 Interface

A interface do robô consiste em um software desenvolvido em MATLAB que funciona para ambos os modos de operação do robô. A interface desenvolvida permite ao terapeuta determinar parâmetros importantes de usabilidade do usuário, os quais estão listados a seguir.

1. Comportamento do robô: é possível definir, na interface desenvolvida, qual será o comportamento do robô. As possibilidades são para o robô no modo de interação social: (1) “Apresentação da MARIA”; (2) “Brincando com a MARIA”. Já no modo andador o comportamento do robô é “Guia”.
2. Tipo de controlador: pode ser escolhido entre diferentes tipos de controladores pré-programados. São eles: o controlador PID, cinemática inversa e controle de formação. Este último, em especial, é aplicado ao modo andador robótico e imita a formação entre dois robôs, porém o robô líder da mesma é o humano sendo que o robô faz todo o sensoriamento e projeta os dados no referencial do humano para calcular sua velocidade. Mais detalhes podem ser vistos na seção 4.6. Além do controlador, também há a possibilidade de ativar o desvio de obstáculos se o sistema estiver no modo “andador robótico”.
3. Tempo do experimento: os experimentos são marcados por tempo, e um cronômetro determina o momento em que o experimento irá acabar. A interface permite o robô se movimentar durante o período determinado de tempo e depois o para.
4. Parâmetros: de acordo com o tipo de controlador escolhido, podem-se definir alguns parâmetros, tais como os ganhos do controlador e velocidades máximas permitidas. Velocidades negativas não são permitidas dentro do controle automático para o modo “andador robótico”, já que podem atropelar o usuário. Contudo, para o modo de “interação social com crianças com TEA”, velocidades negativas são permitidas, pois pode ser necessário ao robô tanto se aproximar como se afastar da criança.

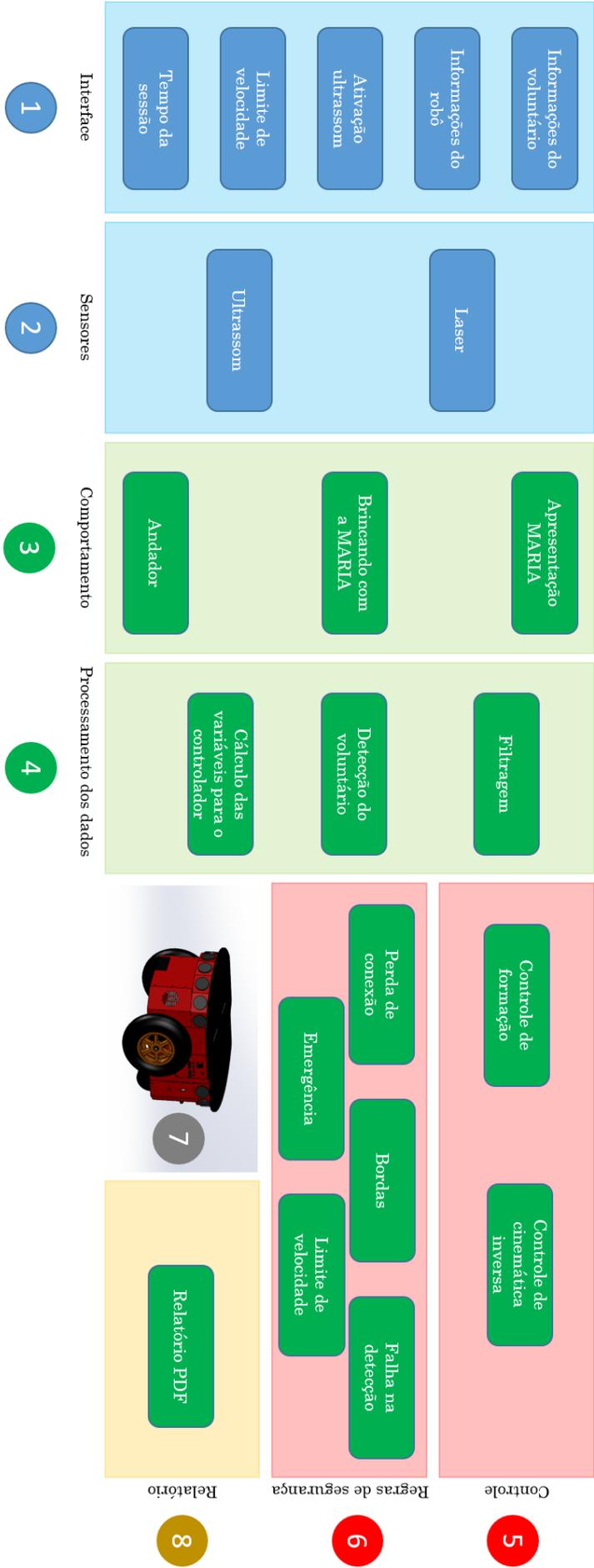


Figura 40 – Diagrama de blocos mostrando as partes do sistema.

The image shows a software interface titled "ROBOT CONTROL INTERFACE". It is divided into two main sections: "Experiment Information" and "Robot Information" on the left, and a "Control Panel" on the right.

Experiment Information: Includes input fields for Name, Age, Height, and Weight. Gender is a dropdown menu set to "Male". Education is a dropdown menu set to "01 - Special Education".

Robot Information: Includes a dropdown menu for Mode set to "01 - MARIA: Self-presentation" and another for Control set to "01 - PID". There are input fields for "Max. Lin." and "Max. Ang.", and a "Duration" field. A "START" button is located to the right of the Duration field. A checkbox labeled "Turn on ultrasound sensors for obstacle avoidance" is at the bottom.

Control Panel: Displays three status indicators: "WiFi", "Borders", and "Detection". Each has a dashed line above it and a unit below: "[m/s]" for Borders and "[deg/s]" for Detection. A "Clock" is displayed below these indicators. At the bottom of the panel is a prominent red button labeled "EMERGENCY STOP".

Figura 41 – Interface para o controle do robô.

5. Botões de segurança: são os botões de emergência que podem ser utilizados para ambos os modos de operação, além dos botões de emoções, disponíveis apenas no modo “interação social com crianças com TEA”. Fora esses botões que auxiliam na segurança do usuário, ainda há outras regras de segurança internas já embutidas dentro do algoritmo de controle do robô.

Além de configurar o robô, o terapeuta pode inserir os dados dos voluntários, tais como nome, idade, enfermidade e gênero. Tais informações são úteis para gerar o relatório posterior ao experimento. Na Figura 41 é mostrada a interface durante uma simulação de teste.

A interface ainda informa dados sobre a sessão (velocidades linear e angular do robô e o tempo da sessão), além de indicar se há perda de conexão, se o robô sair do espaço permitido para o experimento ou se não detectar o usuário, alertando o terapeuta por meio de um alarme sonoro.

3.3.2 Aquisição dos dados dos sensores

Os dados dos sensores de ultrassom e laser são adquiridos durante o experimento. O sensor de ultrassom é responsável por detectar os obstáculos, quando ativado no modo “andador robótico” e o sensor laser é responsável por detectar a pessoa dentro do ambiente. A aquisição dos dados é feita por meio de um software desenvolvido na Universidade Nacional de San Juan (UNSJ), Argentina.

Por meio de um servidor que é executado no robô, é possível ler os dados dos sensores, através da rede WiFi, no computador mestre. Da mesma forma, com o mesmo software que permite a leitura e comunicação do robô com o computador mestre, é possível

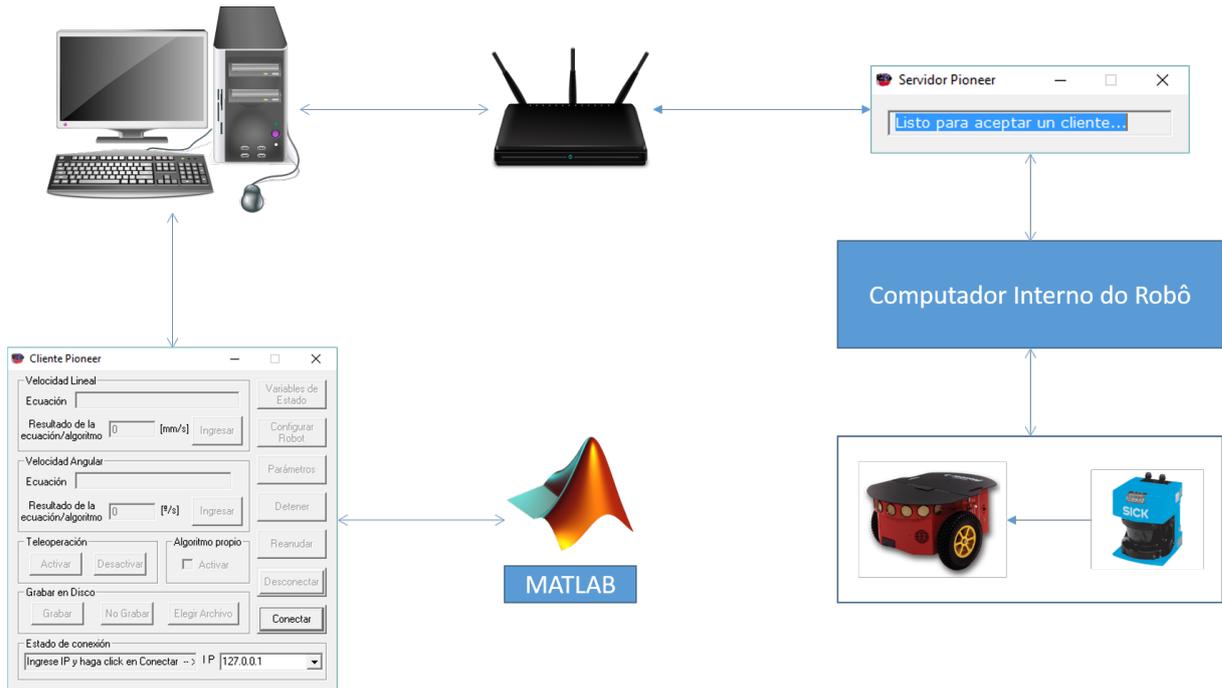


Figura 42 – Interface para o controle do robô.

enviar os comandos de velocidade para o robô. Assim, o computador mestre pode comandar o robô à distância, lendo os dados dos sensores e transmitindo as ações de controle. A Figura 42 mostra um diagrama da comunicação PC-Robô.

3.3.3 Comportamento desejado do robô

O comportamento desejado para o robô é inserido na interface, informando ao sistema como o robô deve interagir com a criança com TEA ou com a pessoa com mobilidade reduzida.

Como mencionado anteriormente, há quatro comportamentos possíveis: no modo de “interação social”, há a possibilidade dos comportamentos: “Apresentação da MARIA” e “Brincando com a MARIA”. Já para o modo andador, há o comportamento “Guia”, com o qual se pode utilizar ou não a detecção de obstáculos (a função de desabilitar a detecção de obstáculos reduz a segurança, porém como o ambiente de testes era estreito não era possível fazer curvas sem que o ultrassom detectasse a parede do local e, por isso, foi criada esta opção de desabilitar a detecção de obstáculos - ainda que tal opção não seja segura). No caso da detecção de obstáculos, os sensores de ultrassom são ativados, sendo que o andador é travado caso o usuário esteja em rota de colisão com algum objeto.

O comportamento “Apresentação da MARIA” não envolve a utilização de controlador. É um *script* pré-programado para movimentar o robô e exibir as animações no monitor de vídeo. A criança deve ficar em uma região marcada (região de segurança), na qual o robô é impedido de entrar.

Já o comportamento “Brincando com a MARIA” leva em conta a utilização do robô em uma brincadeira como “pega-pega”. Neste caso, o robô se afasta quando a criança se aproxima, e se aproxima quando a criança se afasta. Na realidade, o controle tenta manter a criança a uma distância de 70 centímetros e à 90° em relação ao robô (linha do eixo central do robô), ou seja, o robô sempre tenta ficar de frente para a criança.

Por fim, no modo “andador robótico”, o comportamento “Guia” faz com que a pessoa seja guiada pelo andador robótico, sendo que o robô irá manter uma distância de 70 centímetros e 90° em relação à pessoa. Neste modo de operação, não é permitido que o robô se movimente para trás, pois isso atropelaria o usuário, que está em contato com o suporte do andador.

3.3.4 Processamento de dados dos sensores

O processamento dos dados é responsável por juntar as informações dos sensores e processá-las para fornecer os dados necessários para detectar a localização da pessoa. Neste caso, é feita a filtragem e a análise dos sinais enviados pelos sensores, de forma a localizar a pessoa (usuário do andador robótico ou criança com TEA). Para tal processamento, é levado em conta o comportamento desejado do robô, pois para cada modo de operação há *setpoints* diferentes de distância e ângulo do usuário em relação ao robô. Os movimentos permitidos para o robô também são em função do modo de operação.

Primeiramente, é necessário filtrar os dados do sensor laser, o qual envia para o computador mestre 181 medidas, contendo a distância e o ângulo referente a cada medida. O alcance total do laser é de 30 metros e ângulo de abertura de 180° com 1° de resolução (SICK, 2006). Esses valores são filtrados para limitar a área segura dentro do andador, e o alcance da detecção da criança quando o robô está no modo “interação social”.

No caso do robô no modo “andador”, é utilizada uma zona de segurança que restringe essa leitura entre os ângulos 68° e 112° e, portanto, há somente 45 pontos de leitura. Além disso, a distância é saturada em 1 metro, isto é, caso o sensor laser detecte algo além disso, o computador mestre irá ignorar. A área que compreende os ângulos entre 68° e 112° e distância de até 1 metro é a área considerada segura na parte posterior do andador (mostrada na Figura 43a). O usuário, portanto, deve ficar dentro desta área e, caso o mesmo não seja detectado, há regras de segurança que irão parar o andador.

Já no caso do robô no modo “interação social”, o robô utiliza ângulo de visão de 180°, porém, com alcance limitado a 2 metros. A distância de 2 metros é suficiente para que o robô detecte apenas a criança no ambiente. Como mostra a Figura 43b, este ambiente deve conter apenas a criança e o robô.

Uma vez capturado o sinal do sensor laser, há a opção de detectar a criança pelo ponto mais próximo ao robô (aplicável ao modo “interação social”) ou pela detecção

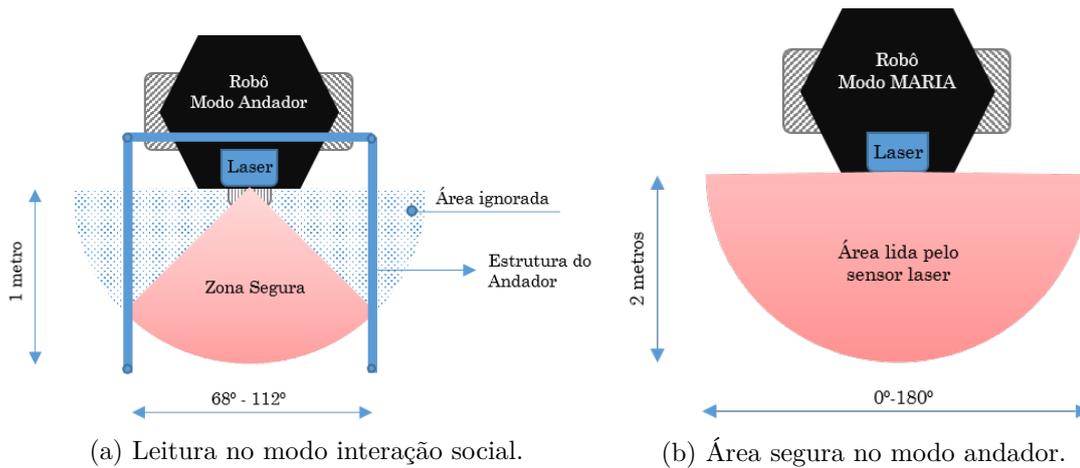


Figura 43 – Leitura do robô em cada um dos modos de operação.

das pernas do usuário, através de busca de padrões dentro do sinal enviado pelo sensor laser. Esta última opção está disponível apenas quando o robô está no modo “andador” e utilizando o processamento desenvolvido por (Schneider Junior et al., 2012). Este algoritmo procura padrões de pernas dentro das medidas realizadas pelo sensor laser e determina a posição das pernas por meio das transições ocorridas no sinal. Mais detalhes podem ser vistos na seção 4.1.

A detecção do usuário pelo ponto mais próximo considera que não há nada mais próximo do sensor laser do que a própria criança. A região considerada é aquela já limitada pelo processamento do sinal do sensor laser. Neste modo, é importante não haver nenhum objeto que possa ser confundido com a criança dentro da área de busca do sensor laser. É importante ressaltar ainda que este método é utilizado para detectar a criança quando o robô está no modo “interação social”. Isso se deve ao fato que, neste modo, as crianças podem estar sentadas, o que não permitiria a detecção das pernas, como mostrado na Figura 44.

3.3.5 Controle

O controle desenvolvido para este robô determina como o mesmo irá se mover durante os experimentos, para cada tipo de comportamento. As leis de controle calculam a velocidade necessária (linear e angular) para manter a distância e o ângulo desejado do robô em relação à pessoa. O Capítulo 4 trata exclusivamente dos tipos de controle utilizados na plataforma robótica e das formas de detecção do usuário/criança.

3.3.6 Supervisor de Segurança

O supervisor de segurança atua diretamente no robô e limita as velocidades linear e angular do robô, caso as saídas de controle gerem valores incompatíveis com a segurança



Figura 44 – Criança sentada interagindo com o robô MARIA.

da tarefa que está sendo realizada. Por se tratar de um tópico importante, o supervisor de segurança está detalhado no seção 4.8.

3.3.7 Relatório da Sessão

Após o termino do experimento, todos os dados de velocidade e posição do robô são mostrados em um gráfico. Além disso, as escalas GAS, SUS e Likert também são exibidas neste relatório. Tais relatórios (gerados em PDF) podem ser uma ferramenta útil para o terapeuta analisar os dados do experimento. Esta parte do projeto será modificada devido à aquisição de novos sensores (como será mostrado na seção 6.3).

4 Aquisição de dados e controle

Para o funcionamento do sistema, é necessário a detecção das pernas do usuário no modo “andador” e da detecção da criança, no modo “interação social”. Tais informações são necessárias para inferir a posição dos usuários dos sistemas. Neste capítulo, são mostradas tanto as técnicas de detecção das pernas do usuário do andador quanto da criança interagindo com o robô, bem como a arquitetura de controle.

4.1 Detecção de pernas

Para detectar as pernas do usuário do andador é utilizado um algoritmo desenvolvido com base no algoritmo de (Schneider Junior et al., 2012). A partir desse algoritmo, são feitos pré-processamentos dos dados oriundos do sensor laser, detecção de transições, extração de padrões para análise e, por fim, estimativa das coordenadas das pernas. As principais modificações com relação ao algoritmo de (Schneider Junior et al., 2012) foram a simplificação do mesmo, utilizando menos filtros, o fato de ignorar as leituras quando há mais de cinco transições e uma forma diferente de visualizar as pernas sobrepostas ou “escondidas”. As Figuras 45 e 46 mostram um fluxograma que explica o funcionamento da detecção de pernas para o andador.

4.1.1 Pré-processamento dos dados

Inicialmente delimita-se a região onde os dados do laser são válidos. Com isso, é possível determinar uma zona onde deve estar o usuário sem interferência da estrutura do andador que possa ser confundida com pernas. Assim, é possível determinar o ângulo e a distância de cada ponto dentro desta área. No caso do robô no modo “andador”, é limitada uma faixa angular entre 68° e 112° , sendo 90° o centro do sensor laser. A distância máxima entre o sensor laser e as pernas do usuário está configurada, neste trabalho, para 1 metro, embora o sensor laser consiga alcançar mais de 30 metros de distância, de acordo com o manual do fabricante (SICK, 2006).

A Figura 47 ilustra o alcance do sensor laser em distância e ângulo dentro do andador adaptado ao robô. Esta região é compreendida como zona segura, pois dentro dela o usuário consegue apoiar as mãos no andador robótico.

A limitação da área de interesse do laser reduz a quantidade de dados a serem processados, facilita a análise e a torna mais precisa, já que elimina a possibilidade de haver elementos que podem ser confundidos com as pernas do usuário. Matematicamente,

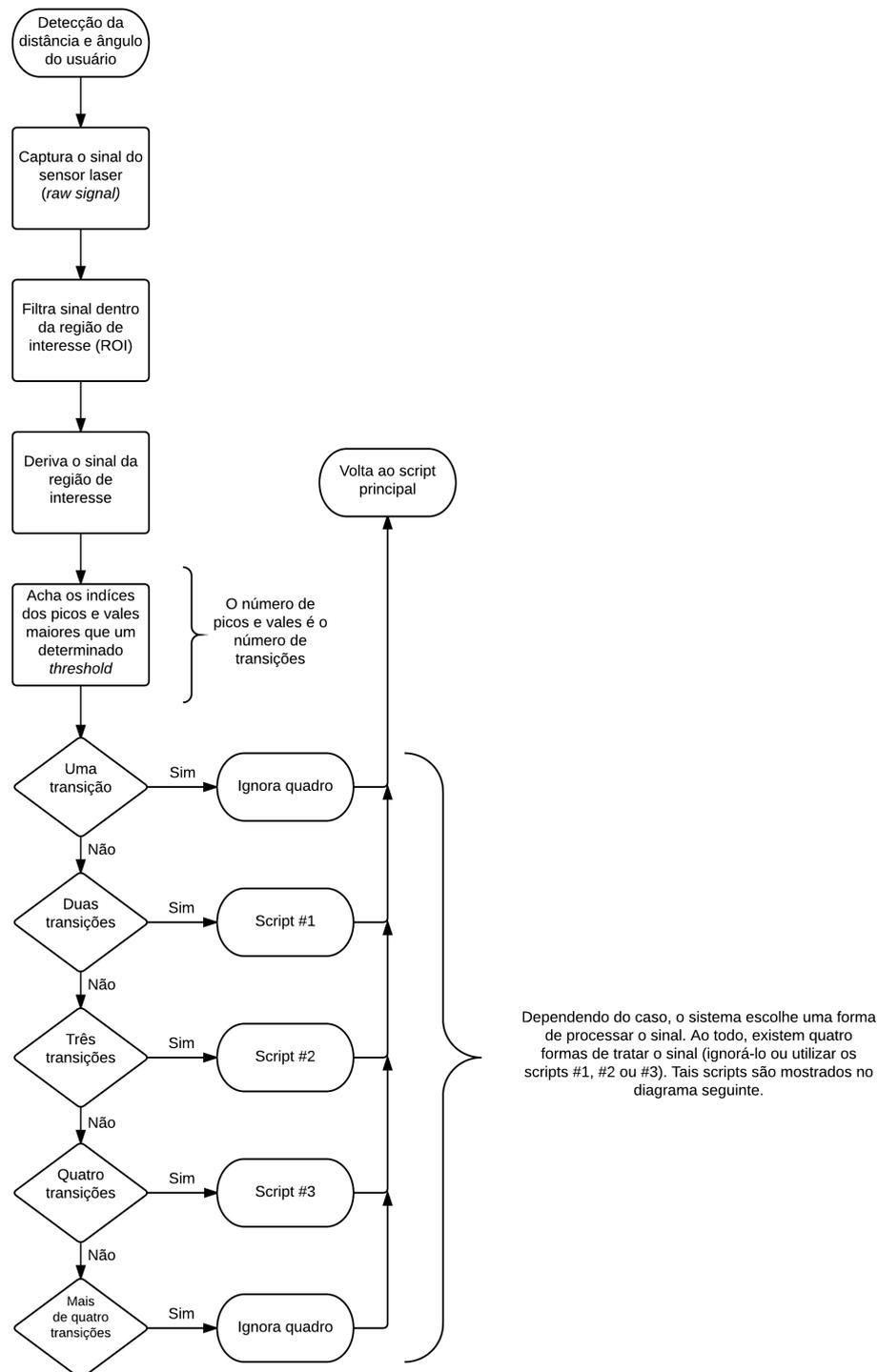


Figura 45 – Posturas possíveis das pernas sob o ponto de vista do número de transições do sinal do sensor laser.

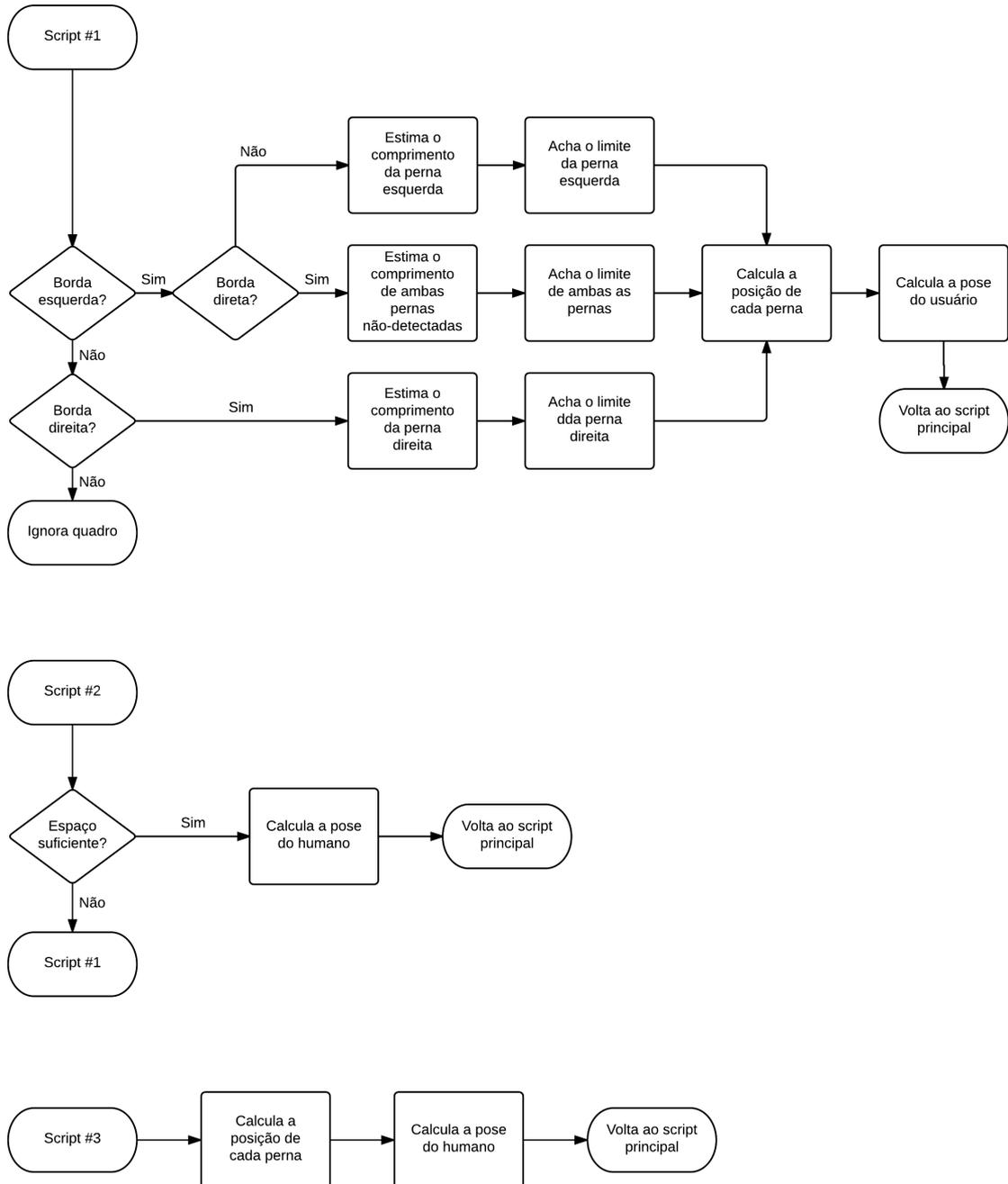


Figura 46 – Lógica usada para achar a posição de cada perna.

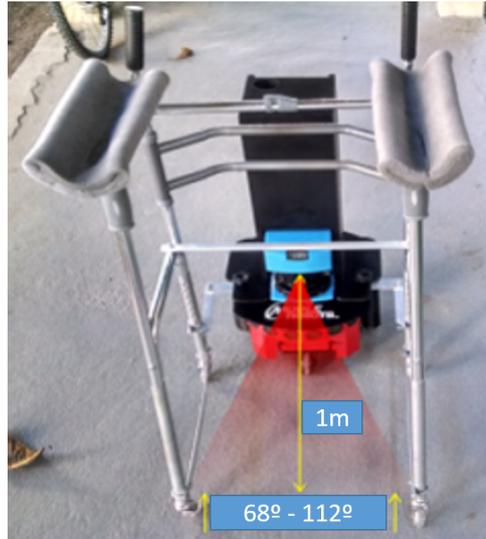


Figura 47 – Área de abrangência do sensor laser.

a partir dos dados do sensor laser, se tem um vetor de pontos, cujo índice é o ângulo, e o valor presente neste índice é a distância detectada pelo sensor laser, como demonstrado em

$$r_i = [r_{68}, r_{69}, r_{70}, \dots, r_{110}, r_{111}, r_{112}], \quad (4.1)$$

onde r_i representa a distância medida e o índice i representa o ângulo (em graus, com variação de 1° de um ângulo para o outro).

4.1.2 Detecção de transições

Uma vez adquirido os dados do sensor laser dentro da região delimitada, é feita a detecção das transições dos dados. Para encontrar as transições, o sinal capturado pelo sensor laser é derivado, desta forma, as transições tornam-se muito evidentes, deixando bem marcado onde as pernas estão localizadas. Há uma tendência de haver maiores transições onde existem as pernas, já que o sensor laser irá detectar a presença de um “obstáculo” na região das pernas. A Equação

$$\Delta r_i = \frac{r_i - r_{i-1}}{\Delta i} \quad (4.2)$$

mostra como é a derivada do sinal vindo do sensor laser, onde Δr_i é a variação do sinal do sensor laser e Δi é a variação da amostragem, que é constante ($\Delta i = 1$) e corresponde a variação da leitura angular do sensor (este gera um vetor de 181 pontos para uma varredura entre 0° e 180° , logo a variação entre um ponto e outro é de 1°). Desta forma, pode ser feita a simplificação para uma diferença, mostrada na Equação

$$\Delta r_i = r_i - r_{i-1}. \quad (4.3)$$

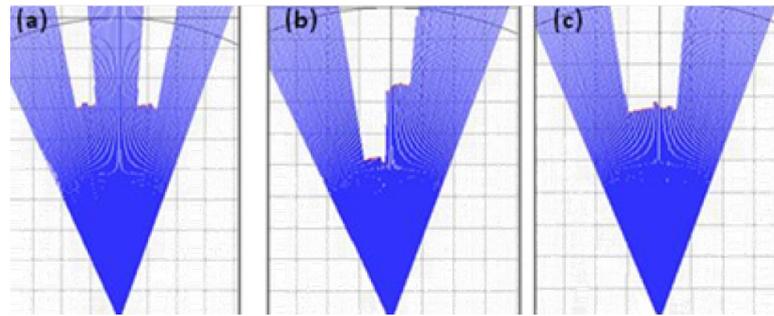


Figura 48 – Posturas possíveis das pernas sob o ponto de vista do sensor laser.

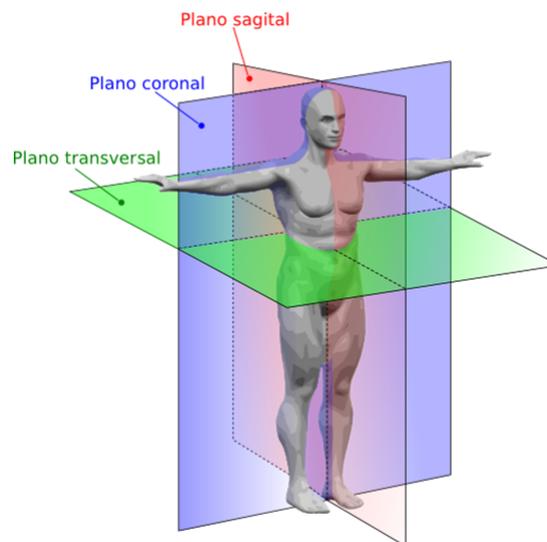


Figura 49 – Planos sagital, coronal e transversal. Fonte: [WikiCommons](#)

Os dados desta diferença fazem com que seja possível a extração dos padrões de análise, que é o próximo passo do algoritmo, como descrito em (Schneider Junior et al., 2012).

4.1.3 Extração de padrões de análise

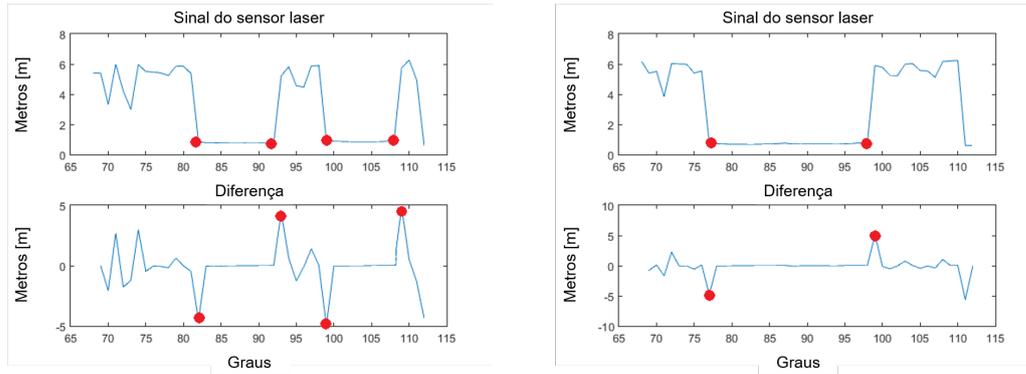
Para analisar onde podem estar as pernas, é feita uma classificação prévia com base nas possíveis posturas das pernas durante a caminhada. De acordo com (BELLOTTO; Huosheng Hu, 2009), existem três padrões diferentes de postura das pernas, as quais são mostradas na Figura 48, que também mostra como elas são detectadas por meio dos dados do sensor laser.

Para analisar a possível posição das pernas, é necessário inferir valores de sua largura e espaçamento entre pernas no plano frontal, também conhecido como plano coronal. A Figura 49 mostra os planos frontal (ou coronal), sagital e transversal.

O vetor de transições é utilizado para identificar o tipo de postura que as pernas podem ter. A Tabela 9 mostra a relação da postura das pernas com o número de transições.

Tabela 9 – Número de transições para cada configuração de pernas.

Configuração	Sigla	Transições
Pernas juntas	PJU	2
Pernas sobrepostas	PSO	3
Pernas separadas	PSE	4



(a) Exemplo de pernas separadas (PSE).

(b) Exemplo de pernas juntas (PJU).

Figura 50 – Exemplos de transições de pernas.

Para ser considerada uma transição, é necessário que se tenha uma distância mínima (previamente definida) no plano sagital. A Figura 50 mostra exemplos de transições sob o ponto de vista do sensor laser.

4.1.4 Coordenadas das pernas

Uma vez obtido o número de transições, é possível estimar a posição das pernas do usuário, baseando-se na sua configuração. Apesar de existirem três configurações básicas de pernas, há 5 modos de estimar a sua posição, tal como mostrado na Tabela 10. Isso ocorre, pois, quando há três transições, há a possibilidade da perna esquerda estar na frente ou da perna direita estar na frente. Além disso, ainda existe a possibilidade de haver mais de quatro transições ou menos de duas transições, o que faz com que o quadro (*frame*) seja ignorado.

Com os dados obtidos anteriormente, é possível estimar a posição das pernas do usuário, e assim encontrar um ponto médio que representa o usuário em relação ao andador.

Para o cálculo da posição das pernas utilizando os dados do sensor laser, é necessário analisar a derivada do vetor informado pelo sensor laser a cada leitura. Desta forma, considerando que k_n seja a n -ésima transição no vetor da derivada, θ o vetor de ângulos, ϕ o diâmetro pré-definido da perna e d o vetor de distâncias, é possível calcular a posição das pernas por meio da análise do número de transições e espaçamento entre as mesmas no plano frontal. A Tabela 10 mostra como são calculadas a posição e orientação do usuário dado o número de transições.

Tabela 10 – Modos de estimar a posição das pernas

Transições	Configuração	Ponto 1 (p_1)	Ponto 2 (p_2)
<2	Ignorado	Ignorado	Ignorado
2	Pernas Juntas	$k_1 + 1$	k_2
3	Pernas Esquerda Frente	$\frac{k_1+k_2}{2}$	$k_3 - \arctan\left(\frac{\phi}{d(k_3)}\right) \cdot \left(\frac{n}{\pi}\right)$
3	Pernas Direita Frente	$k_1 + 1 + \arctan\left(\frac{\phi}{d(k_1+1)}\right) \cdot \left(\frac{n}{\pi}\right)$	$\frac{k_2+k_3}{2}$
4	Pernas Separadas	$\frac{k_1+k_2}{2}$	$\frac{k_3+k_4}{2}$
>4	Ignorado	Ignorado	Ignorado

É importante enfatizar que as transições pequenas, abaixo do limiar mínimo para ser considerado transição, não são contabilizados como transições válidas e, portanto não são consideradas pernas. Desta forma têm-se uma espécie de filtro que identifica apenas as transições válidas por meio do tamanho desta transição. Como a região atrás do andador é controlada e só deve ter as pernas do usuário, esse sistema consegue detectar satisfatoriamente apenas as pernas do voluntário.

A variável n se refere ao número de pontos dentro da mesma leitura (*scan*) e ϕ é o diâmetro da perna pré-estabelecido. No caso desta tese de doutorado adotou-se o valor de 9 centímetros, com base na média do diâmetro das pernas das pessoas do laboratório a 30 centímetros de altura do chão (onde fica o sensor laser).

É importante ressaltar que, na Tabela 10, a configuração da perna com três transições é detectada por meio da transição de maior distância. Considera-se a transição de maior distância a mais longe, e portanto, a perna que está a frente é a oposta.

Desta forma, é possível determinar qual é a configuração (dentre as duas possíveis para três transições) e prosseguir com os cálculos dos pontos p_1 e p_2 e, em sequência, da distância e orientação do usuário. Outra ressalva importante, quanto à Tabela 10 é que os casos especiais ocorrem quando há mais de quatro transições (ou quando há quatro transições, mas a distância entre as pernas está muito próxima) ou quando há menos de duas transições. Nesses casos, o quadro é ignorado.

Por fim, para encontrar um único ponto que representa o usuário, faz-se a média das distâncias à cada perna, isto é, utilizam-se as Equações

$$d = \frac{d(p_1) + d(p_2)}{2}, \quad (4.4)$$

$$\theta = \frac{\theta(p_1) + \theta(p_2)}{2}. \quad (4.5)$$

Vale a pena lembrar que, como o sistema é relativo, a medição tem como referência o próprio andador.

Neste modo, quando se tem mais de quatro transições ou menos de duas transições,

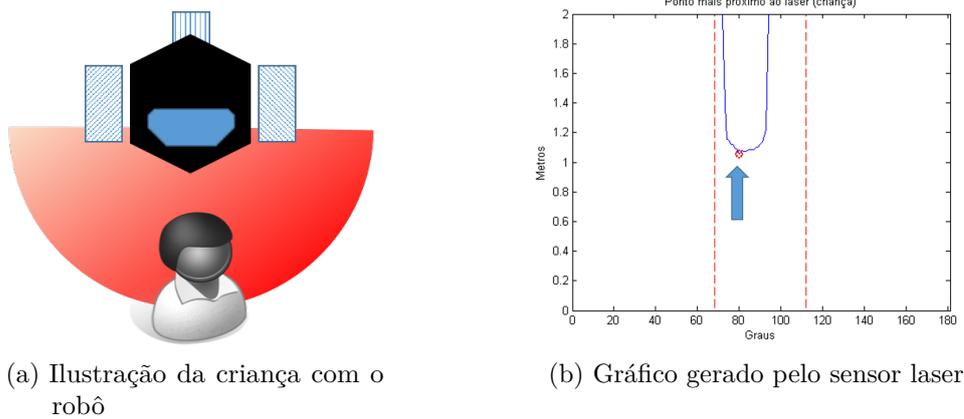


Figura 51 – Detecção do ponto mais próximo ao sensor laser. Dentro do ambiente controlado este ponto será a criança.

os valores são ignorados. O sistema de segurança conta quantas vezes consecutivas houve quadros ignorados do sensor laser e, dependendo da quantidade, ele para o andador, como será visto nas regras de segurança (seção 4.8).

4.2 Detecção da criança

A detecção da criança através da busca pelo ponto mais próximo é usada quando o robô está no “modo de interação social”. Esta forma de detectar a criança é mais simples e não exige a análise do sinal do laser, exceto por encontrar o ponto mais próximo ao sensor, considerando que no ambiente somente encontra-se a criança e o robô.

Caso o robô não encontre a criança dentro dos 180° (a varredura do laser ocorre em 180° , como mostrado na Figura 51a), o mesmo para. Dentro de ambientes em que a área não está controlada (como ambientes que possuem cadeiras), o robô pode ser programado para delimitar uma região de interesse como mostrado na Figura 51b. Contudo, essa medida só deve ser tomada caso a varredura de 180° do robô encontre muitos obstáculos que possam fazê-lo confundir com uma criança, já que o terapeuta deve ficar sempre orientando a criança a ficar dentro da zona de leitura limitada do sensor laser.

4.3 Arquitetura de controle

A arquitetura de controle desenvolvida neste trabalho é responsável por analisar os dados que vêm dos sensores e processá-los, a fim de gerar a saída (ação de controle) para o robô. A plataforma robótica possui três controladores de movimento, os quais são responsáveis por calcular as velocidades angular e linear que devem ser requisitadas ao robô para garantir a distância e o ângulo desejado em relação ao humano.

Dentro do modo de “interação social”, o robô pode utilizar o controlador PID ou o controlador de formação. Já no modo “andador”, o robô pode utilizar tanto o controlador PID, o controlador de posição baseado em cinemática inversa e o controlador de formação, por isso, nas seções subsequentes, serão explicados os três controladores responsáveis pela movimentação do robô: (1) controlador PID; (2) controlador de posição baseado em cinemática inversa; e (3) controlador de formação.

4.4 Controlador PID

O controlador PID usa o erro de distância e de ângulo do usuário referente ao andador e tenta corrigi-lo. Da forma como foi projetado este controlador, tem-se a vantagem de que a variável do erro de distância altera apenas a velocidade linear, enquanto o erro de ângulo altera apenas a velocidade angular, não sendo necessário cálculos intermediários de velocidade do usuário. Matematicamente, o controlador é definido pelas equações:

$$v_d = k_{d_1} \cdot \tilde{d}(t) + k_{d_2} \cdot \frac{\Delta \tilde{d}(t)}{\Delta t} + k_{d_3} \cdot \sum_0^t \tilde{d}(t) \cdot \Delta t, \quad (4.6)$$

$$\omega_d = k_{\theta_1} \cdot \tilde{\theta}(t) + k_{\theta_2} \cdot \frac{\Delta \tilde{\theta}(t)}{\Delta t} + k_{\theta_3} \cdot \sum_0^t \tilde{\theta}(t) \cdot \Delta t. \quad (4.7)$$

e os valores dos ganhos utilizados durante os testes foram de 0.5, 0.1 e 0.1 para os ganhos proporcional, integral e derivativo (modo “interação social”). Já no modo “andador”, os ganhos foram de 0.7, 0.3 e 0.3 (proporcional, integral e derivativo). Vale a pena citar que o controlador era discreto e possuía tempo de amostragem de 100ms, que era o ciclo de leitura e processamento do sensor laser e do algoritmo de controle.

Os valores dos controladores PID foram feitos de forma empírica, após várias tentativas com diversos valores e ajustando-os de forma fina, a fim de obter uma melhor combinação dos ganhos. Tais testes para avaliar os ganhos foram feitos com as pessoas do próprio laboratório e não diretamente com os voluntários.

4.5 Controlador de Posição Baseado em Cinemática Inversa

A cinemática direta do sistema humano-robô é descrita por equações que englobam a posição do robô e do usuário, dadas as velocidades linear e angular do sistema. Tais equações não são lineares e, portanto, é necessária a utilização de técnicas de controle capazes de lidar com as não-linearidades do modelo cinemático direto. Dentro deste contexto, o controlador baseado em cinemática inversa é muito útil, pois através de sua utilização é possível fazer com que o sistema se comporte como um sistema linear quando se fecha a malha de controle. A Figura 52 mostra a ideia de linearização através de *feedback*, onde as velocidades linear v_d e angular ω_d são as velocidades enviadas do controlador para o robô.

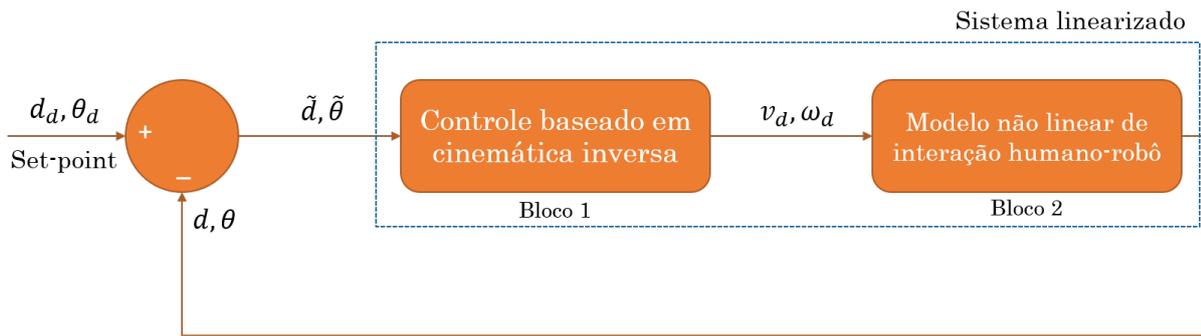


Figura 52 – Diagrama do sistema utilizando controlador de cinemática inversa, onde d_d e θ_d são a posição e ângulo desejados, e \tilde{d} e $\tilde{\theta}$ são os erros de posição e ângulo.

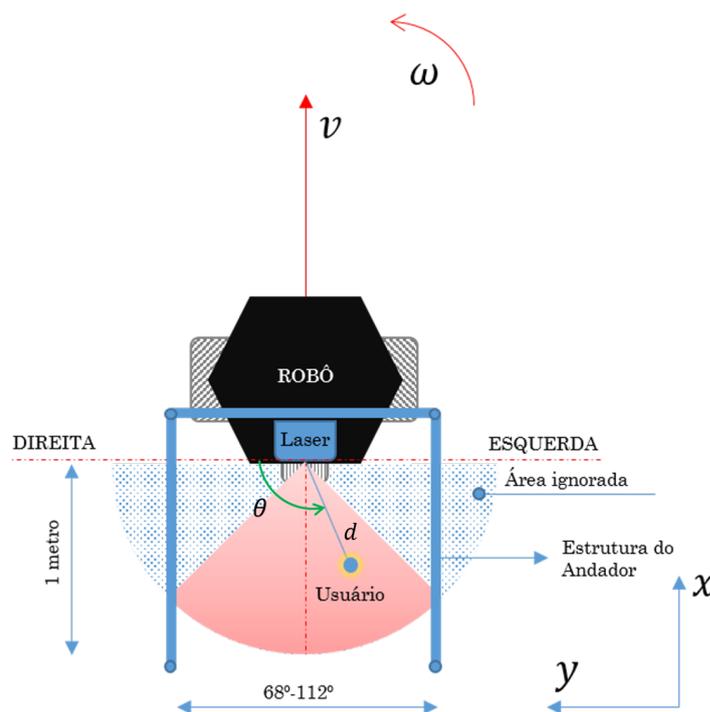


Figura 53 – Diagrama do andador robótico. Os lados “direita” e “esquerda” são sob o ponto de vista do sensor laser.

O Bloco 2 da Figura 52 é o modelo não linear de interação humano-robô, o qual é modelado analisando como cada componente do sistema (usuário e andador) se movimenta, e como o movimento mútuo afeta a distância e os ângulos entre o usuário e o robô. Já o Bloco 1 é o controlador que usa o erro de distância e ângulo, o qual ajusta as velocidades que serão as entradas do Bloco 2 para garantir a distância e o ângulo desejados entre o humano e o robô. Na Figura 53 são mostradas as variáveis consideradas no movimento do usuário e do andador.

Por meio da contribuição de cada uma das velocidades no movimento e na variação da distância e ângulo, é possível fazer a modelagem do funcionamento do sistema. Para modelá-lo, é necessário, em primeiro lugar, estabelecer os sentidos positivo e negativo, tanto nos eixos de coordenadas, como na rotação. Desta forma, adota-se como positivo tanto o

sentido rotacional anti-horário, quanto os eixos para a direita e para cima (representados por x e y , respectivamente).

Analisando-se a Figura 53, é possível inferir a contribuição da velocidade linear, v , na variação da distância, \dot{d} . Como o sistema é totalmente relativo, todas as variáveis devem ser projetadas no eixo longitudinal do andador, que é a referência do sistema. Desta forma, é possível encontrar a relação entre a velocidade e a variação da distância, a qual é denotada por:

$$\dot{d} = -v \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right). \quad (4.8)$$

Utilizando a identidade $\cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) = \sin \theta$, é possível simplificar a Equação 4.8 para a Equação:

$$\dot{d} = -v \sin \theta \quad (4.9)$$

Quanto ao ângulo θ , este é influenciado tanto pela velocidade linear como pela angular. A relação entre a variação do ângulo θ e as velocidades é dada pela Equação:

$$\dot{\theta} = \omega + \frac{v \cdot \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)}{d} \quad (4.10)$$

Desenvolvendo esta Equação e utilizando a identidade $\sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) = -\cos \theta$, é possível simplificar a Equação 4.10 para a Equação

$$\dot{\theta} = \omega - \frac{v \cdot \cos \theta}{d}. \quad (4.11)$$

Os erros de distância e ângulo são dados pela diferença entre o *set-point* desejado e o valor da leitura dos sensores, os quais estão representados, respectivamente, pelas equações:

$$\tilde{d} = d_d - d \quad (4.12)$$

$$\tilde{\theta} = \theta_d - \theta \quad (4.13)$$

As derivadas dos erros, por sua vez, representam o espaço de estados e são dadas pelas equações:

$$\dot{\tilde{d}} = -\dot{d} \quad (4.14)$$

$$\dot{\tilde{\theta}} = -\dot{\theta} \quad (4.15)$$

As constantes k_d e k_θ são os ganhos do controlador que multiplicam respectivamente o erro de distância e ângulo. Elas devem possuir sempre valores positivos, a fim de garantir a estabilidade como mostrado mais adiante.

Para calcular as saídas de velocidades que devem ser geradas pelo controlador, são feitos os seguintes cálculos, mostrados nas equações:

$$v = \frac{-k_d \tilde{d}}{\sin \theta} \quad (4.16)$$

$$\omega = -k_\theta \cdot \tilde{\theta} + \frac{v \cdot \cos \theta}{d} \quad (4.17)$$

Para provar a estabilidade, basta substituir o controle dentro da cinemática direta. Ao simplificar o resultado, chega-se às seguintes expressões:

$$\tilde{d} = d(0) \cdot e^{-k_d t} \quad (4.18)$$

$$\tilde{\theta} = \theta(0) \cdot e^{-k_\theta t} \quad (4.19)$$

Com isso, é possível verificar que, a partir de um erro inicial, o sistema sempre tende à estabilidade exponencial, e, conseqüentemente, o erro converge para zero. Se o usuário muda de posição, o erro volta a subir (pela movimentação do usuário), mas o controle irá outra vez fazê-lo tender para zero. É importante ressaltar, contudo, que os ganhos k_d e k_θ devem ser, obrigatoriamente, positivos. Caso contrário, o sistema divergirá e não alcançará a estabilidade.

A única diferença entre os modos de operação “andador” e “interação social” quando se utiliza o controle de posição baseado em cinemática inversa é o fato da velocidade linear, no modo de interação social ter o sinal invertido em relação ao modo andador. Portanto a velocidade de saída do controlador no modo de “interação social” utilizando a cinemática inversa é $-v$ em relação a Equação 4.16.

4.5.1 Ajuste nas variáveis de distância e ângulo

Outro fator importante a ser considerado é a posição do laser, o qual não está exatamente no centro de rotação dos eixos dos motores. Isso faz com que sejam necessários cálculos adicionais para determinar distância e ângulo reais, isto é, vistos a partir do centro de rotação dos motores. A Figura 54 mostra a diferença entre distância e ângulo reais e os que são informados pelo processamento do sinal enviado pelo sensor laser.

Na Figura 54, a constante a é a distância (fixa) entre o laser e o eixo de rotação dos motores; as variáveis g e h representam as projeções (nos eixos longitudinal e transversal

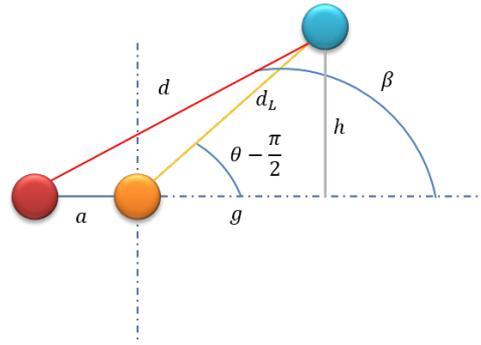


Figura 54 – Simplificação do modelo humano-robô.

do robô) da distância do usuário medida pelo sensor laser. θ_{real} é o ângulo real entre o eixo de rotação dos motores e o usuário, enquanto $\theta - \frac{\pi}{2}$ representa o ângulo medido pelo laser.

Com isso, pode-se calcular a distância real do robô com relação ao usuário, isto é, a distância referente ao centro de rotação do robô, onde são aplicadas as leis de controle. Para calcular a distância real, é necessário obter a distância d_L (distância medida pelo sensor laser) e, sabendo-se de antemão o ângulo entre o laser e o eixo principal (marcado com a linha pontilhada horizontal da Figura 54), pode-se calcular os catetos g e h do triângulo menor que envolve o usuário e o laser. Matematicamente, isto é representado pelas equações:

$$g = d_L \cdot \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.20)$$

$$h = d_L \cdot \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right). \quad (4.21)$$

Por fim, para completar o ajuste dos valores, deve-se calcular a distância real entre o robô e o usuário. Para isso, basta calcular a hipotenusa do triângulo maior. Isso pode ser visto na Equação:

$$d_{real} = \sqrt{(a + g)^2 + h^2}. \quad (4.22)$$

O ângulo real θ_{real} pode ser calculado pela função arco-tangente, como mostrado na Equação

$$\theta_{real} = \arctan \frac{h}{g + a}. \quad (4.23)$$

Este ângulo é o que será utilizado no lugar do θ . Por conveniência, será retirado o subíndice *real* nas próximas equações. Como pode ser visto, caso o valor de a seja muito pequeno, o valor de $\theta_{real} = \theta$, bem como a distância será $d_{real} = d$.

4.6 Controle de Formação

É possível também utilizar um controle de formação de robôs baseado no seguimento de um robô líder, conhecendo-se a distância e orientação do robô seguidor (ROBERTI et al., 2011). No caso desta tese de doutorado, pode-se adaptar e aplicar este controlador, visto que o usuário pode funcionar como o robô líder, devido à forma como o controlador foi construído.

No trabalho (ROBERTI et al., 2011), o robô líder possui seu próprio algoritmo de controle, e ambos os robôs possuem sensores. Já nesta tese de doutorado, tem-se a inovação que o robô seguidor será responsável por fazer todas as medições, projetando as informações como se o “robô líder” (representado pelo humano), que não possui qualquer sensor, estivesse fazendo as medições. Por fim, será necessário fazer outra projeção de volta para o robô seguidor com os valores corretos das ações de controle no sistema de referência absoluto.

A Figura 55 mostra os eixos, os ângulos e as distâncias usadas no cálculo, além da posição do robô e do usuário. Baseando-se neste diagrama é possível começar os cálculos para chegar às velocidades necessárias para que o robô mantenha a distância e o ângulo desejado. Primeiramente, é necessário se basear no modelo cinemático do robô representado na referência do humano, utilizando dados na referencial global (as variáveis estão detalhadas na lista de símbolos), nas equações

$$\dot{x}_r^h = v_r^0 \cdot \cos \alpha + \omega_h^0 \cdot d \cdot \sin \theta \quad (4.24)$$

$$\dot{y}_r^h = v_r^0 \cdot \sin \alpha + \omega_h^0 \cdot d \cdot \cos \theta \quad (4.25)$$

$$\dot{\alpha} = \omega_r^0 - \omega_h^0. \quad (4.26)$$

A Figura 56 mostra o fluxograma completo do código que o modo “andador” utiliza para o controle de formação.

Voltando ao modelo da Figura 55, todas as variáveis com subíndice h são relativas ao usuário, enquanto as variáveis com subíndice r são relativas ao robô, e as variáveis com subíndice L são relativas ao eixo do sensor laser. A partir deste modelo define-se o vetor de posições de referências \mathbf{h} , mostrado na Equação

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} x_r^h \\ y_r^h \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

e também a matriz de valores desejados é dada pela Equação

$$\mathbf{h}_d = \begin{bmatrix} x_r^h|_d \\ y_r^h|_d \end{bmatrix}. \quad (4.28)$$

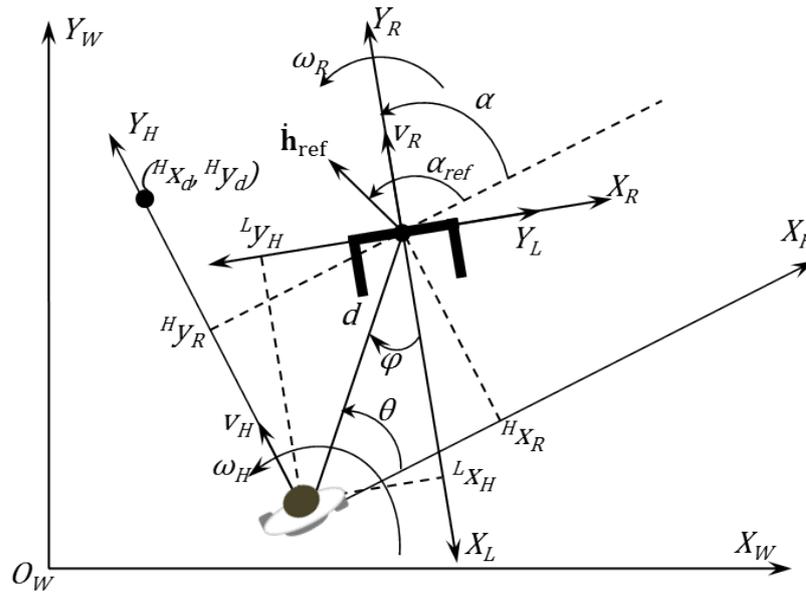


Figura 55 – Diagrama do andador. As variáveis estão detalhadas na lista de símbolos no apresentado no início do texto.

Finalmente, pode-se, então, calcular o vetor de erros, mostrado na Equação

$$\tilde{\mathbf{h}} = \mathbf{h} - \mathbf{h}_d. \quad (4.29)$$

Utilizando o modelo cinemático inverso, pode-se calcular o vetor de velocidades de referências e fechar a malha com um ganho proporcional multiplicando os erros, como mostrado na Equação

$$\dot{\mathbf{h}}_{ref} = -\mathbf{K}\tilde{\mathbf{h}} - \dot{\mathbf{h}}_r^H, \quad (4.30)$$

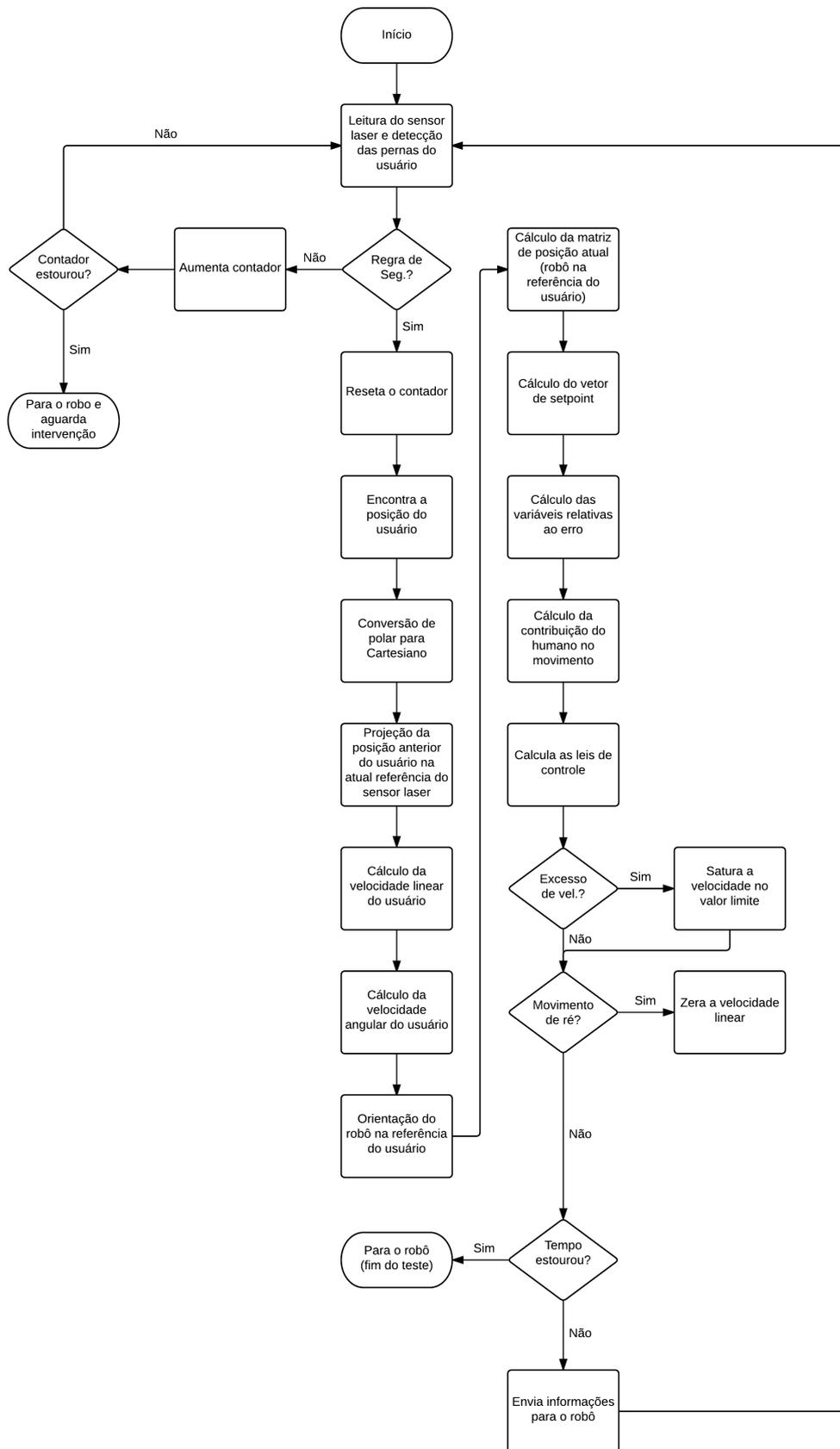
onde a variável $\dot{\mathbf{h}}_r^H$ se refere à contribuição do movimento do usuário do andador nos cálculos intermediários para o vetor de referência que será utilizado no controlador, como mostrada na Equação

$$\dot{\mathbf{h}}_r^H = \begin{bmatrix} \omega_h \cdot d \cdot \sin \theta \\ -\omega_h \cdot d \cos \theta - v_h \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

O funcionamento do controle de formação está descrito na Figura 57. Há a obtenção dos dados do laser e posterior medições, além de projeções em diferentes referenciais (planos absoluto, do usuário, do robô e do laser), sendo que, no final, a referência utilizada é a do usuário. Na aplicação das leis de controle, as velocidades já estão na referência global.

Os passos a seguir mostram como são calculadas as leis de controle:

1. Cálculo da posição do humano em relação ao laser:



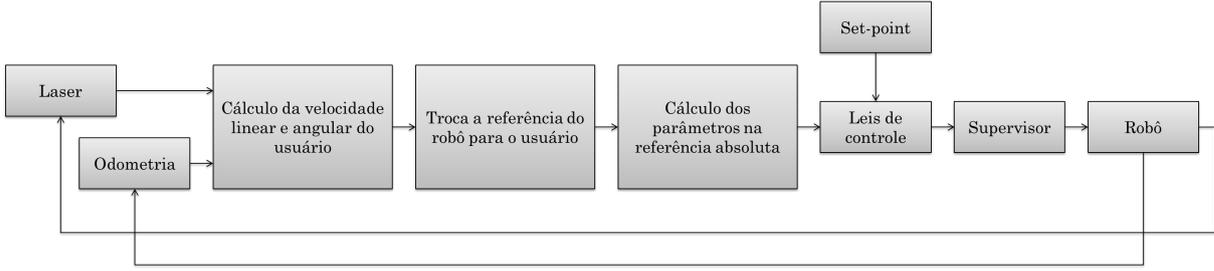


Figura 57 – Fluxograma do funcionamento do controle de formação

$$\begin{bmatrix} x_h^L(k) \\ y_h^L(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d(k) \cos \varphi(k) \\ d(k) \sin \varphi(k) \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

2. Cálculo da variação do ângulo de rotação do robô:

$$\Delta\alpha_r(k) = \alpha_r(k) - \alpha_r(k-1) \quad (4.33)$$

3. Transformação da posição da pessoa do instante anterior para a referência atual:

$$\begin{bmatrix} x_h^L(k) \\ y_h^L(k) \end{bmatrix}_{k-1|k} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\alpha_r(k)) & \sin(\Delta\alpha_r(k)) \\ -\sin(\Delta\alpha_r(k)) & \cos(\Delta\alpha_r(k)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_h^L \\ y_h^L \end{bmatrix}_{k-1} - \begin{bmatrix} v_r \cdot T_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

4. Cálculo da orientação do usuário na referência do laser (mostrado na Figura 58):

$$\beta(k) = \arctan \frac{y_h^L(k) - y_h^L(k-1/k)}{x_h^L(k) - x_h^L(k-1/k)} \quad (4.35)$$

5. Cálculo da velocidade linear global do usuário para x e y , e para o valor absoluto da velocidade linear (ilustrado na Figura 59):

$$v_{h_x}(k) = \frac{x_h^L(k) - x_h^L(k-1/k)}{T_0} \quad (4.36)$$

$$v_{h_y}(k) = \frac{y_h^L(k) - y_h^L(k-1/k)}{T_0} \quad (4.37)$$

$$v_h(k) = \sqrt{v_{r_x}(k)^2 + v_{r_y}(k)^2} \quad (4.38)$$

6. A partir da orientação do usuário na referência do laser é possível encontrar a orientação do laser na referência do usuário (ilustrado na Figura 60):

$$\alpha(k) = -\left(\beta(k) + \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.39)$$

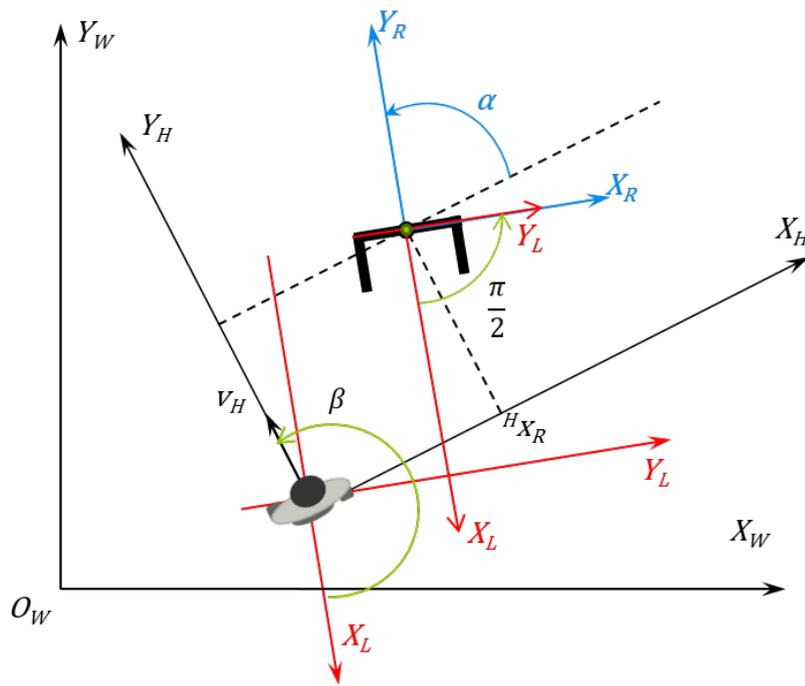


Figura 58 – Cálculo do ângulo β .

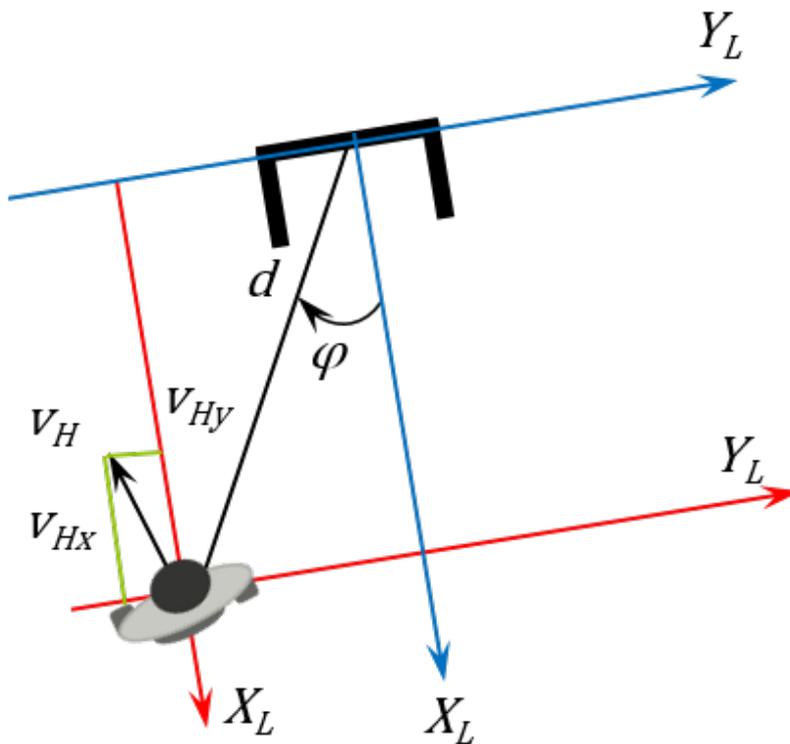


Figura 59 – Cálculo das componentes da velocidade do usuário.

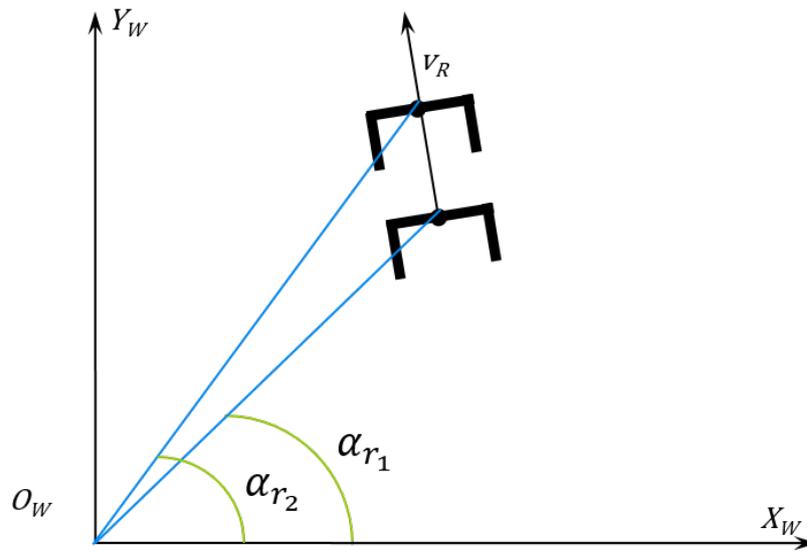


Figura 60 – Variação do ângulo do robô (α_r) no plano absoluto.

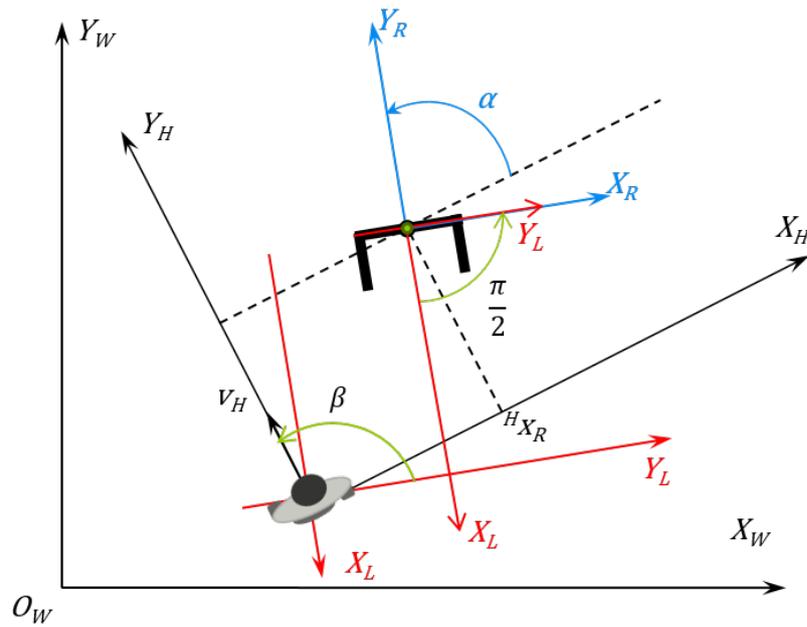


Figura 61 – Rotação do plano do laser para o plano do robô (90°).

7. Agora é necessário encontrar o vetor de deslocamento \mathbf{T} para passar da referência do laser para a referência do robô (mostrado na Figura 61):

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos(\frac{\pi}{2}) & \sin(\frac{\pi}{2}) \\ -\sin(\frac{\pi}{2}) & \cos(\frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_h^L \\ y_h^L \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

8. Cálculo da posição do robô no referencial do usuário:

$$\begin{bmatrix} x_r^h \\ y_r^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\alpha_r(k) + \frac{\pi}{2}) & \sin(-\alpha_r(k) + \frac{\pi}{2}) \\ -\sin(-\alpha_r(k) + \frac{\pi}{2}) & \cos(-\alpha_r(k) + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \cdot [\mathbf{0} - \mathbf{T}] \quad (4.41)$$

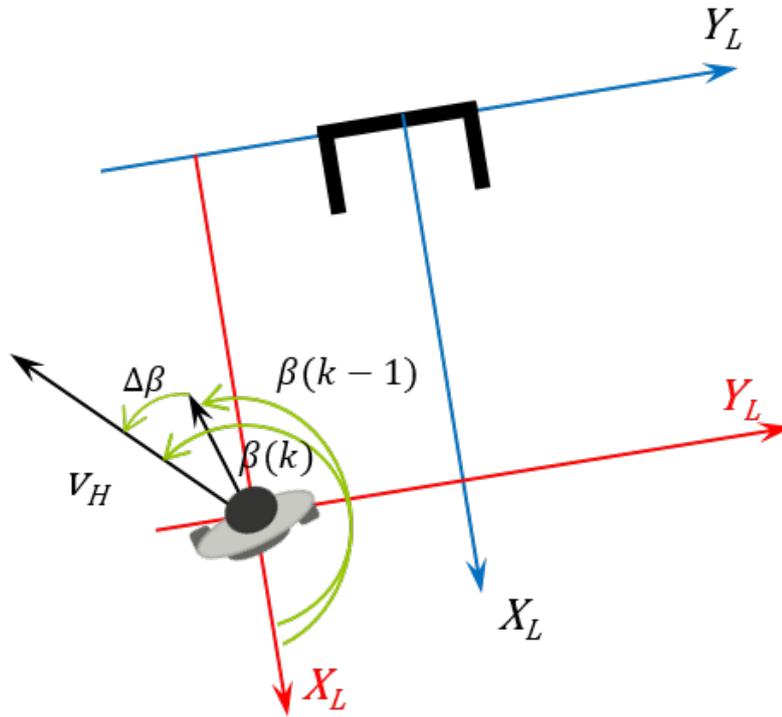


Figura 62 – Cálculo da variação do ângulo beta ($\Delta\beta$).

9. Cálculo da velocidade angular do humano no novo referencial global (detalhado na Figura 62):

$$\omega_h = \frac{\beta(k) - \beta(k-1)}{T_0} + \omega_r = \frac{\Delta\beta(k)}{T_0} + \omega_r \quad (4.42)$$

10. Finalmente, calcula-se a lei de controle que vai ser inserida no robô. Internamente, por meio de um controlador PID interno, o robô garante as velocidades linear e angular requisitadas. As saídas do controlador para a velocidade linear e angular estão representadas nas equações:

$$v_c = |\dot{\mathbf{h}}_{ref}| \cos \tilde{\alpha} \quad (4.43)$$

$$\omega_c = k_\omega \tilde{\alpha} + \dot{\alpha}_{ref} + \omega_h. \quad (4.44)$$

A estabilidade do sistema pode ser provada pelo Método Direto de Lyapunov. Para isso, escolhe-se uma função candidata e analisa-se a função propriamente dita e sua derivada.

Para provar a estabilidade do sistema foi utilizada a função candidata de Lyapunov, mostrada na Equação

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{h}}^T \tilde{\mathbf{h}}. \quad (4.45)$$

É possível verificar que esta função é definida positiva¹, o que significa que o seu valor na origem é zero ($\mathbf{V}(\mathbf{h} = \mathbf{0}) = \mathbf{0}$) e fora da origem, todos os valores da função assumem valores positivos ($\mathbf{V}(\mathbf{h} \neq \mathbf{0}) > \mathbf{0}$).

Já a derivada temporal da Equação 4.45, é descrita pela Equação

$$\dot{\mathbf{V}} = \tilde{\mathbf{h}}^T \dot{\tilde{\mathbf{h}}}. \quad (4.46)$$

Ao considerar nulo o movimento do humano em um intervalo de tempo pequeno, isto é, considerando $\dot{\tilde{\mathbf{h}}} = \dot{\mathbf{h}}_{ref} = -\mathbf{K}\tilde{\mathbf{h}}$, é possível encontrar que a derivada da função candidata é definida negativa. O conceito da função definida negativa é o oposto da definida positiva, isto é, quando a a variável dependente é igual a zero, o valor da função é zero e nos outros pontos a função assume um valor negativo. Isto está representado na Equação:

$$\dot{\mathbf{V}} = -\tilde{\mathbf{h}}^T \mathbf{K}\tilde{\mathbf{h}} < \mathbf{0}. \quad (4.47)$$

Ao utilizar o mesmo método para provar a estabilidade da variável α , chega-se à Equação:

$$V = \frac{1}{2} \tilde{\alpha}^2 > 0, \quad (4.48)$$

que é definida positiva

Ao derivar a Equação 4.48, é possível observar que a derivada desta função é definida negativa:

$$\dot{V} = \tilde{\alpha} \dot{\tilde{\alpha}} \quad (4.49)$$

Para provar que a Equação 4.49 é definida negativa, é necessário fechar a malha de controle e isolar o termo $\dot{\tilde{\alpha}}$. Desta forma, considerando que a velocidade do robô é a mesma velocidade enviada pelo controlador, chega-se à:

$$\dot{\alpha} = k_\omega \tilde{\alpha} + \dot{\alpha}_{ref} + \omega_h - \omega_h \quad (4.50)$$

$$0 = k_\omega \tilde{\alpha} + \dot{\alpha}_{ref} - \dot{\alpha} \quad (4.51)$$

$$0 = k_\omega \tilde{\alpha} + \dot{\tilde{\alpha}} \quad (4.52)$$

¹ Função definida positiva é aquela cuja variável dependente, quando zero, resulta em um valor da função igual a zero e, em todos os outros pontos, onde a variável dependente não é zero, a função assume o valor positivo. Matematicamente, pode ser representado por $f(x = 0) = 0$ e $f(x \neq 0) > 0$.

$$\dot{\tilde{\alpha}} = -k_w \tilde{\alpha} \quad (4.53)$$

As Equações 4.50, 4.51 e 4.52 são os passos necessários para encontrar o resultado mostrado na Equação 4.52, que será substituída na Equação 4.49 para provar que esta é definida negativa. Ao fazer isso, é possível encontrar a Equação

$$\dot{V} = -K_w \tilde{\alpha}^2 < 0, \quad (4.54)$$

a qual mostra que a Equação 4.49 é definida negativa.

Ambas as funções candidatas foram definidas positivas, e suas respectivas derivadas definidas negativas. Essa é uma condição suficiente para que se tenha estabilidade de acordo com o Método Direto de Lyapunov.

4.7 Controle Manual

Também há a possibilidade de controlar o sistema por meio de controle manual. Esta funcionalidade pode ser utilizada para posicionar o robô para começar os testes (se desejado), bem como trazer o robô para o local onde deve ser guardado. Além disso, o controle manual pode ser utilizado para realizar alguns testes preliminares e verificar o funcionamento do sistema e conexão do computador mestre com o computador embutido do robô. O software que faz a comunicação entre o computador mestre e o computador do robô já possui esta funcionalidade de teleoperação.

Vale ressaltar que em (CABIBIHAN et al., 2013) é mostrado que, além dos testes com robôs autônomos, é importante que hajam testes teleoperados com crianças com TEA, visto que a participação do terapeuta (ainda que por meio de teleoperação) tem uma grande importância para a socialização da criança e é uma forma de interação social.

A Figura 63 mostra o funcionamento do sistema de controle manual. O pesquisador aciona os motores do robô por meio das setas do teclado. Tais comando são interpretados pelo cliente e passados pela estrutura Wi-Fi para o robô via teleoperação.

4.8 Sistema de Segurança

De forma a minimizar os riscos de acidentes durante o uso do robô, foi desenvolvido um supervisor de segurança para o modo “andador”, o qual monitora a situação do usuário com relação ao andador, além das velocidades que estão sendo geradas pelo próprio andador. Através de um conjunto de regras de segurança, é possível garantir ao usuário mais estabilidade, conforto e, obviamente, segurança ao utilizar o andador.



Figura 63 – Funcionamento do sistema de controle manual.

Tabela 11 – Regras de segurança para o robô no modo “andador”.

Situação	Ação
Só detecta uma perna	Para imediatamente
Não detecta perna	Para imediatamente
Velocidade linear negativa	Para imediatamente
Velocidade acima do permitido	Limita no valor máximo permitido
Pernas muito próximas	Aumenta a velocidade para se afastar do usuário
Pernas muito afastadas	Reduz lentamente até parar

As regras de segurança baseiam-se nas informações de distância ao andador e ângulo de orientação do usuário, detecção ou não das pernas, e também da velocidade do andador. A reação para cada uma dessas situações podem ser as mais diversas, desde parar totalmente o andador, de forma abrupta, ou reduzir lentamente a velocidade do mesmo até pará-lo totalmente. A Tabela 11 mostra as regras de segurança desenvolvidas para garantir ao usuário mais conforto e facilidade de uso do andador.

Basicamente, há quatro regras de segurança para o andador. Se há alguma situação de risco iminente de queda do usuário ou de já ter ocorrido a queda, que pode ser inferida pela detecção de apenas uma perna ou se uma das pernas estiver saindo do campo de visão do laser, o andador para imediatamente. Isso deve ser feito para evitar uma possível queda. As outras regras são relativas à velocidade, limitando seu valor em um valor máximo

quando o controle demandar velocidades acima das que são seguras (pré-determinadas) ou limita a saída em zero quando a velocidade requerida pelo controlador é negativa, pois, senão, o andador pode atropelar o usuário (caso se desloque de ré). Vale a pena lembrar que algumas regras de segurança, como diminuir a velocidade quando o usuário se afasta do laser e aumentar a velocidade quando o mesmo se aproxima, já estão embutidas na função do controle de garantir a distância e o ângulo do usuário em relação ao andador.

Para complementar, o andador também possui botão de parada de emergência, o qual para imediatamente o robô, caso haja algum problema. Adicionalmente, em caso de perda de conexão, o robô emite um alarme para que o terapeuta possa pressionar o botão para parar os motores do robô.

De forma similar ao “modo andador”, o robô no modo “interação social” também possui algumas regras de segurança que envolvem a posição da criança em relação ao robô e às informações de emoções que são externas ao sistema (Tabela 12).

Neste caso, a interface desenvolvida possui botões que permitem ao terapeuta, durante o experimento com o robô, modificar o comportamento do mesmo de acordo com a emoção que a criança apresenta. Uma vez que o terapeuta identifica o tipo de emoção, ele pode clicar no botão correspondente e o sistema de controle troca os ganhos dos controladores, fazendo com que o comportamento do robô se torne mais suave ou enfático.

Se a criança sentir medo, o terapeuta possui a opção de marcar “medo” dentro do conjunto de emoções, o que faz o robô se deslocar de forma mais lenta. De forma análoga, caso a criança tenha uma boa receptividade ao robô e se sinta feliz, o terapeuta pode pressionar o botão “alegria”, o que faz o robô se comportar de forma mais enfática. Desta forma, a velocidade do robô é modificada em função da distância e ângulo, e também em função das emoções da criança. Isso garante maior versatilidade ao sistema e uma melhor experiência de usabilidade do mesmo. Em termos de controle, cada emoção corresponde a um ganho diferente no robô, tanto para o controle da velocidade angular como para a velocidade linear. Caso nenhuma “emoção” seja escolhida, o controlador fica com valores pré-determinados.

Tabela 12 – Regras de segurança para o robô no modo “interação social”.

Situação	Ação
Muito próximo da criança	Robô dá ré
Não detecta a criança	Robô para
Mudança de modo de operação (via terapeuta)	Troca ganhos do controlador

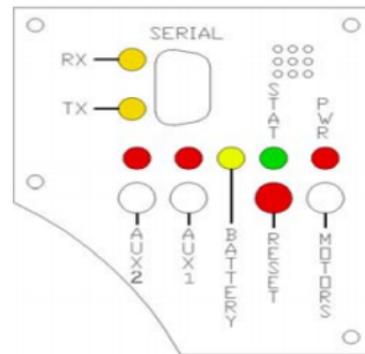
No modo “interação social”, o botão de emergência também está disponível, o qual

para o robô caso haja problemas inesperados. Se houver perda de conexão, o sistema emite um “beep” para que o terapeuta aperte o botão de parar o robô.

Em caso de perda de conexão com o computador mestre, o robô continua a se mover com o último comando de velocidade. Isso pode gerar um problema de colisão, visto que o robô perde o controle. Como não há como enviar comandos de velocidade para o robô quando o mesmo se encontra nesta situação, um alarme é emitido pelo computador mestre, que serve de alerta para o terapeuta ou pesquisador acionar o botão de parada do robô (botão *reset*) que está localizado na lateral do robô (Figura 64).



(a) Foto do botão *reset*



(b) Desenho do painel lateral do robô

Figura 64 – Detalhe da lateral do robô com o botão *reset*.

5 Experimentos

Ambos os modos da plataforma robótica foram validados usando os possíveis modos de operação. No modo “andador” foi utilizado o modo de detecção do usuário por meio da localização de suas pernas e o controlador de formação. Já no modo “interação social” foi utilizado o controlador de posição baseado em cinemática inversa e o algoritmo de detecção do usuário pelo ponto mais próximo informado pelo sensor laser. Além dos respectivos controladores, as respectivas regras de segurança foram aplicadas aos dois modos de operação da plataforma robótica.

De forma complementar, foram realizados experimentos no modo “andador” no modo “interação social”, com a finalidade de obter resultados qualitativos e quantitativos. A medição da eficácia e usabilidade da plataforma robótica foi feita por meio de três métricas: *Goal Attainment Scale* (GAS); *System Usability Scale* (SUS); e escala de Likert. As três escalas transformam dados qualitativos em quantitativos, sendo assim mais fácil de mensurar e visualizar a avaliação do sistema.

A validação experimental é essencial para avaliar o sistema, pois os testes ajudam a verificar possíveis problemas, bem como verificar a usabilidade e conforto do mesmo. Por isso, a fim de testar a plataforma robótica, foram feitos alguns experimentos envolvendo as duas configurações possíveis. Em ambas as configurações foi utilizada a métrica de avaliação SUS e GAS. No caso do robô para “interação social”, ainda foi utilizada a escala de Likert, que será mostrada na seção 5.4. É importante ressaltar que para a realização dos testes foi seguido um protocolo definido passo-a-passo como os mesmos são realizados. Além disso, testes preliminares foram realizados a fim de verificar o funcionamento do robô, com os controladores disponíveis.

5.1 Testes preliminares

As validações foram feitas com pessoas do próprio laboratório, que testaram o sistema de controle autônomo do robô no modo “andador” por meio do controle de formação e o sistema do controle do robô no modo “interação social”. Dentro deste último modo havia a possibilidade de alterar a velocidade de reação do robô, através da alteração do ganho do controlador de formação. Esses ganhos podem ser futuramente usados pelo terapeuta para deixar o robô mais rápido ou mais lento, de acordo com o comportamento observado da criança.

5.1.1 Modo andador com controlador de formação

A primeira parte dos testes com o andador utilizando o controlador de formação consistia no usuário seguir um caminho reto diagonal sem obstáculos e, posteriormente com obstáculos. Os resultados a seguir mostram o experimento para uma linha reta de aproximadamente 6,4 metros. O caminho em diagonal facilitou que o teste fosse feito dentro do laboratório, permitindo que houvesse uma boa distância para o mesmo, sem que fosse necessário transportar a infra-estrutura já montada para auxiliar nos testes.

Na primeira parte do teste, o caminho era sem obstáculos (mostrado na Figura 65) e os resultados podem ser vistos na Figura 66. A velocidade do robô se manteve baixa e oscilatória na saída do controlador (devido ao movimento das pernas que se afastavam e se aproximavam, alterando o erro ao longo do tempo). Contudo, o controlador, por meio destas ações de controle, pode garantir um erro baixo (0,0009m e -0,04rad) e a dinâmica do robô conseguiu absorver de forma satisfatória as oscilações que aparecem nas ações de controle de forma a deixá-la muito suave. Tal efeito de suavização ocorreu tanto na velocidade linear como na angular do robô, as quais nas ações de controle aparecem oscilatórias, porém em torno de valores baixos, já que o erro estava também se mantendo baixo, tanto em relação à distância, como em relação ao ângulo.

Já as Figuras 67 e 68 mostram os testes realizados com alguns obstáculos colocados no percurso feito pelo usuário. Da mesma forma que os gráficos da série de experimentos anterior, as saídas de controle foram satisfatórias, além do fato das regras de segurança terem zerado a velocidade no momento em que encontraram o obstáculo e retomado o movimento assim quando tal obstáculo não era mais visível. Nesta série de experimentos, o erro médio foi de 0,05m e -0,02rad para a distância e o ângulo, respectivamente. De forma similar ao experimento anterior, a dinâmica do robô auxiliou a suavizar o efeito das oscilações das saídas de controle, além das velocidades terem ficado próximo a um valor constante (exceto quando havia obstáculo). Em especial a velocidade angular ficou muito próximo a zero na sua média, pois o caminho era reto.

A fim de verificar se o controlador era de fato capaz de responder a modificações bruscas no ângulo e na velocidade também foi realizado um caminho utilizando a curva Lemniscata. Esta curva é muito usada para testar a robustez dos controladores, já que é uma das curvas que mais excita a dinâmica do robô devido a troca rápida de ângulos.

Esta curva é matematicamente descrita pelas equações paramétricas

$$x(\theta) = a \cdot \frac{\cos \theta}{\sin^2 \theta + 1} \quad (5.1)$$

$$y(\theta) = a \cdot \frac{\sin \theta \cdot \cos \theta}{\sin^2 \theta + 1} = x(\theta) \cdot \sin \theta \quad (5.2)$$

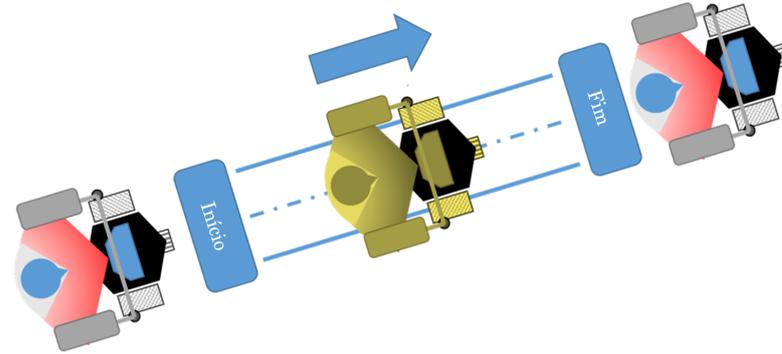


Figura 65 – Caminho em linha reta sem obstáculos.

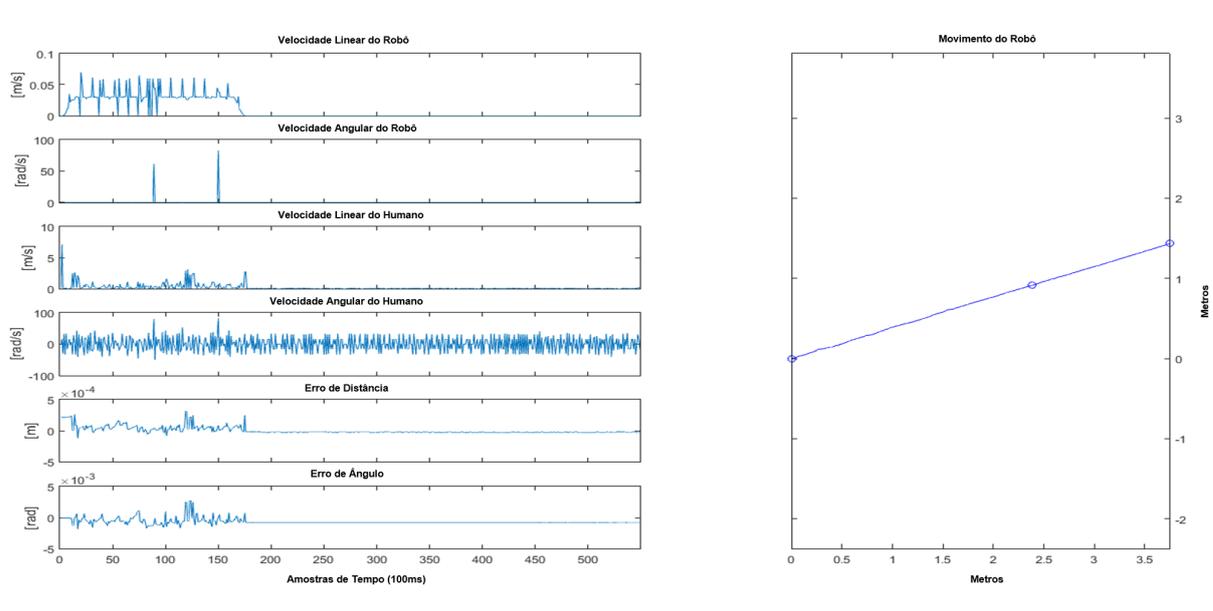


Figura 66 – Fotos dos testes realizados no caminho reto sem obstáculos.

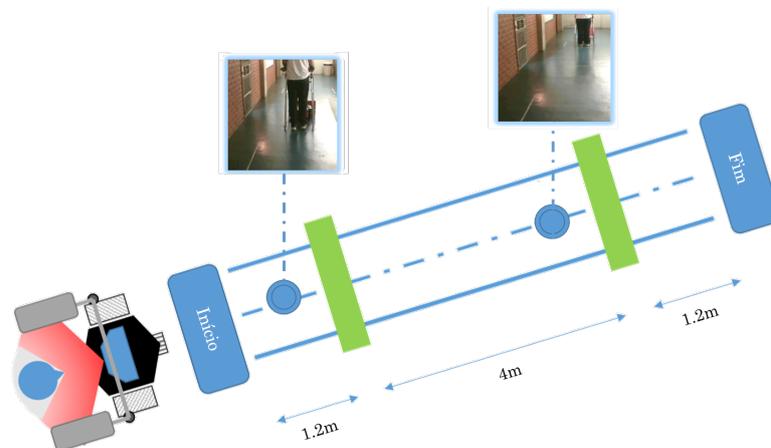


Figura 67 – Diagrama dos testes realizados no caminho reto com obstáculos.

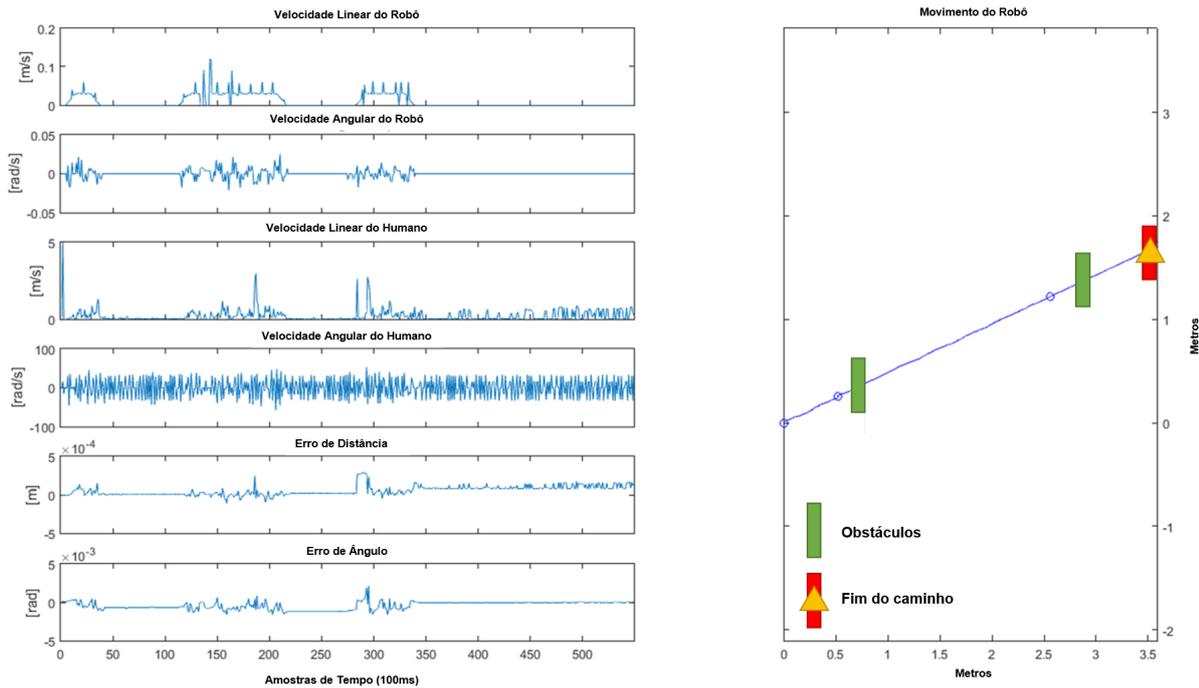


Figura 68 – Fotos dos testes realizados no caminho reto com obstáculos.

O termo a é uma constante que altera o tamanho da curva. Em coordenadas polares a curva pode ser representada pela Equação

$$r(\theta) = a \cdot \sqrt{\cos(2\theta)} \quad (5.3)$$

O controlador não segue diretamente a curva, mas segue a pessoa, que, por sua vez, usa a curva para se guiar. O erro, neste experimento, não é medido em relação a curva propriamente dita, mas com relação à distância e ao ângulo do robô em relação à pessoa. Isso ocorre, pois, dificilmente, a pessoa vai andar exatamente no caminho da curva proposta e o objetivo do controle é garantir a orientação e posição do robô em relação à pessoa. Portanto, a validação do controlador é feita baseada na capacidade do mesmo em fazer com que o robô se posicione na frente da pessoa, isto é, na distância determinada (70 centímetros) e no ângulo desejado (90° - ângulo central do sensor laser).

A Figura 69 mostra como deve ser a curva Lemniscata feita pelo usuário juntamente com o andador e a Figura 70 exhibe os dados de velocidades, erros e curva gerada pelo movimento do andador. O erro médio para a distância foi de 0,02m e para o ângulo de -0,08rad. Mais uma vez, a dinâmica do andador pôde absorver as bruscas ações de controle e o caminho ficou suave. O controlador, mesmo enviando ações de controle oscilatórias, pode garantir os erros baixos e uma movimentação suave.

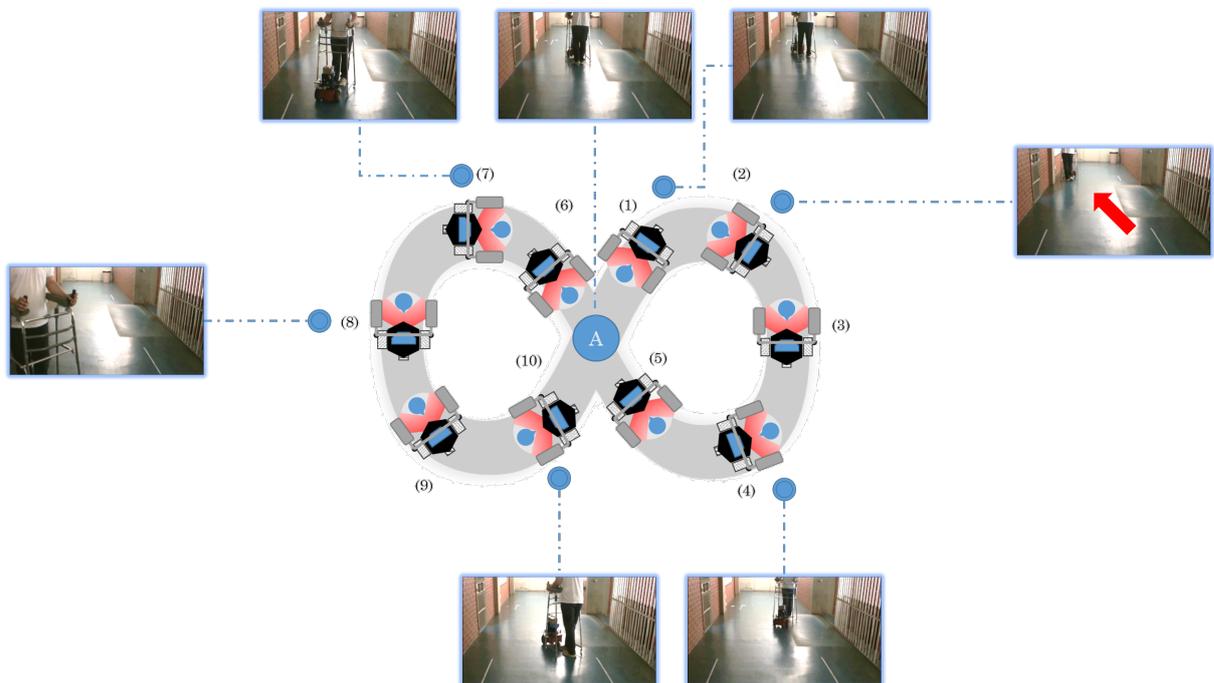


Figura 69 – Experimento da curva de Lemniscata com fotos de alguns instantes.

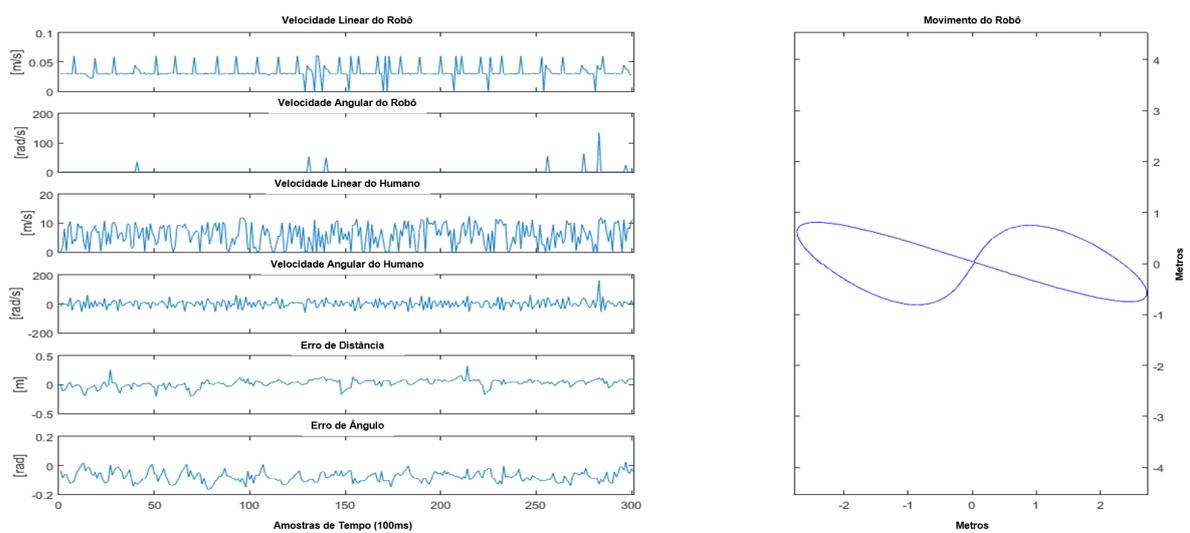


Figura 70 – Resultados para o teste utilizando a curva de Lemniscate.

5.1.2 Modo Interação Social Autônomo

Os testes no modo “interação social” utilizando controlador autônomo compreendem aqueles em que o controlador de cinemática inversa apresentado na seção 4.5 foi utilizado. Estes testes visam mais verificar o comportamento do robô dada a movimentação da pessoa. Desta forma, não havia a necessidade de serem crianças e tampouco necessitavam ter diagnóstico de TEA.

A Figura 71 mostra a parte da interface responsável pela alteração no comportamento do robô, o que é feito variando o ganho dos controladores.

O controlador podia variar os ganhos durante a interação, por meio da intervenção do pesquisador e, mesmo ao variar tais ganhos, o controlador continuou estável. Os ganhos são utilizados para modificar a velocidade de reação do robô.

Nos testes realizados havia quatro velocidades de reação: muito lenta ($K = 0,25$), lenta ($K = 0,5$), neutra ou padrão ($K = 1$), rápida ($K = 1,5$) e muito rápida ($K = 2$). Dentro de um mesmo experimento as velocidades podem variar diversas vezes de acordo com a intervenção do pesquisador, que é feita por meio de botões na interface. O controlador continua sendo automático, porém o ganho das leis de controle podem ser mudados manualmente. O gráfico da Figura 72 mostra a variação dos ganhos e a linha de tendência do erro que converge para zero, mesmo com as variações nos ganhos.

5.2 SUS - *System Usability Scale*

O SUS (*System Usability Scale*) é um questionário com 10 perguntas que é usado para medir a usabilidade de um equipamento ou sistema, o qual contém várias perguntas padronizadas, cujas respostas possíveis variam em uma escala entre “discordo plenamente” até “concordo plenamente”. Esta escala foi desenvolvida em 1986 por John Brooke, um Engenheiro da Digital Equipment Corporation do Reino Unido, para determinar se softwares e sistemas eram facilmente usáveis, baseando-se em princípios de eficiência, eficácia e satisfação (BROOKE, 2013). Portanto, esta escala mede a experiência do usuário com o dispositivo ou sistema.

Após responder às perguntas, tais informações qualitativas são convertidas em uma pontuação que varia entre 1 e 5 (relativa a “discordo plenamente” até “concordo plenamente”). As perguntas se complementam em pares, sendo que uma está na forma afirmativa e outra na negativa (veja o questionário na Tabela 13), de forma a dar mais credibilidade na validação das perguntas, fazendo uma espécie de verificação cruzada.

Uma vez com a pontuação de cada pergunta, a Equação

$$SUS = 2,5 \cdot \left[\sum(5 - par) + \sum(impar - 1) \right] \quad (5.4)$$

Tabela 13 – Questionário da escala de usabilidade SUS.

Nº	Opinião
1	Eu acho que eu gostaria de usar este sistema com frequência
2	Eu acho o sistema desnecessariamente complexo
3	Eu acho que o sistema foi fácil de usar
4	Eu acho que seria necessário o apoio de uma pessoa técnica para ser capaz de usar este sistema.
5	Eu acho que as diversas funções deste sistema foram bem integradas
6	Eu acho que haviam muitas inconsistências no sistema
7	Eu imagino que a maioria das pessoas iria aprender a usar este sistema muito rapidamente
8	Eu acho o sistema muito complicado de usar
9	Eu me sinto muito confiante com o sistema
10	Eu preciso aprender um monte de coisas antes que eu possa levar para casa este sistema

é aplicada para calcular a pontuação final do questionário. As perguntas pares recebem o valor 5 menos a pontuação do número da questão e, em contrapartida, as perguntas ímpares recebem a pontuação da questão menos 1. Em seguida, é feita a soma das pontuações, e o valor encontrado é multiplicado por 2,5. Desta forma, se obtém um valor de 0 a 100 para o questionário SUS, que apesar da faixa de valores, não representa dados percentuais. Mais informações podem ser obtidas em (LEWIS; SAURO, 2009).

Nesta pesquisa, o questionário SUS compreende as perguntas feitas aos (pais/responsáveis de voluntários, no caso das crianças com TEA) após a realização dos testes. As perguntas contidas no questionário SUS estão descritas na Tabela 13. Vale a pena citar que o SUS é uma escala de que reflete a usabilidade de cada participante. Dentro deste trabalho foi feito um questionário SUS para cada teste e voluntário, sendo que posteriormente, para se ter uma ideia melhor foram feitas médias dos resultados. Contudo, é importante ressaltar que devido a amostra pequena de voluntários a utilização da média pode não refletir de forma adequada na real usabilidade do sistema. Desta forma, é importante fazer a análise por voluntário e utilizar a média apenas como uma informação adicional. Por isso análises observacionais e perguntas pós-testes foram feitas aos voluntários (como será mostrado mais adiante) a fim de complementar a análise dos resultados sobre a utilização do sistema.

5.3 GAS - Goal Attainment Scale

O GAS (*Goal Attainment Scale*) é uma métrica utilizada para medir o cumprimento ou não de objetivos dentro de uma tarefa. Nesta métrica, é utilizada uma Tabela de objetivos que devem ser cumpridos dentro de uma determinada tarefa. Se os objetivos forem realizados da forma esperada, eles recebem a pontuação 0. Caso o objetivo não tenha sido alcançado de forma adequada, recebe pontuações negativas, sendo que significa -1 “*pior que o esperado*” e -2 “*muito pior que o esperado*”. Por outro lado, se o objetivo é cumprido e isso supera a expectativa média, ele recebe notas positivas +1 ou +2, sendo,

respectivamente, “*melhor que o esperado*” e “*muito melhor que o esperado*” (COOK; HOWERY, 1999).

Por exemplo, se a criança teve que interagir com o robô (modo “interação social”), mas ficou com medo e nem olhou para ele, neste objetivo a nota foi -2. Em contrapartida, se a criança tocou o robô e ficou visivelmente animada, a nota é +2. Caso a criança reaja como esperado, apenas olhando para o robô, a nota é 0. A pontuação é dada, portanto, tanto pelo comportamento como pela forma de realizar os objetivos. Os objetivos dos testes com o robô no modo “interação social” e sua respectiva pontuação estão representados na Tabela 14.

No caso dos experimentos relativos ao modo “andador”, se o usuário mantém velocidade de marcha próxima a qual tinha quando estava em marcha livre e demore entre um e dois minutos para se adaptar ao andador, ambas as tarefas receberão valor zero. Porém, se a adaptação for mais rápida e o usuário caminhar mais rápido, a pontuação aumenta, caso contrário diminui, de forma similar ao modo “interação social”. Os valores para os objetivos dos testes no modo “andador” estão mostrados na Tabela 15.

Para calcular a pontuação final do GAS, é utilizada a Equação

$$T = 50 + C_n \sum_{i=1}^n g_i, \quad (5.5)$$

onde todos os objetivos g possuem o mesmo peso para a tarefa T , que contém n objetivos (KRASNY-PACINI et al., 2013). Nesta equação, a variável g_i é a pontuação de cada objetivo e C_n é o coeficiente relativo ao número de tarefas. Em relação aos testes do robô no modo de “interação social”, como haviam três tipos distintos de tarefas (olhar, toque e imitação), o coeficiente utilizado foi de $C_3 = 4,56$ (KRASNY-PACINI et al., 2013). Já no modo “andador”, como são duas tarefas, o valor de C_n passa a ser 6,2 (KRASNY-PACINI et al., 2013). Como mostrado na Equação 5.5, em qualquer modo de operação o valor 50 é a média para a pontuação total do GAS, já que as tarefas teriam sido realizadas conforme o esperado. É possível observar que o valor máximo e mínimo do GAS depende, na realidade do número de objetivos, sendo que a pontuação de cada objetivo individualmente varia de -2 a +2, como dito anteriormente.

Outra informação importante é com relação ao valor de C_n . Este valor reflete a correlação entre os n objetivos do testes e, no caso da fórmula apresentada no estudo (KRASNY-PACINI et al., 2013), este valor simplifica a fórmula original do GAS que pode ser visualizada no estudo (TURNER-STOKES, 2009).

Tabela 14 – GAS para interação social.

Qualidade	Valor	Olhar	Tocar	Imitar
Muito pior	-2	Olhar o robô por menos de 30 segundos e sentir medo	Ficar longe do robô e não tocá-lo	Se mantém sentado, ainda que o mediador o encoraje a interagir
Pior	-1	Olhar para o robô por menos de 30 segundos e não apresentar reação	Tocar o robô por menos de 5 segundos	Levantar e não demonstrar nenhum interesse em mover-se, mesmo encorajado pelo mediador
Esperado	0	Olhar para o robô por mais de 30 segundos e manter-se olhando para o monitor sem interesse	Tocar o robô por mais de 5 segundos	Fazer o movimento de interação mostrado pelo mediador por menos de 20 segundos
Melhor	+1	Olhar para o robô por mais de 30 segundos e prestar atenção ao monitor	Tocar o robô por mais de 5 segundos e prestar atenção ao monitor	Fazer os movimentos de interação com o robô, como mostrados pelo mediador por mais de 20 segundos.
Muito melhor	+2	Olhar para o robô por mais de 30 segundos e mover em direção ao robô	Tocar o robô por mais de 5 segundos e tentar brincar com o mesmo	Fazer o movimento de interação com o robô, como mostrado pelo mediador e imitar o robô ao seu lado

Tabela 15 – GAS para o andador.

Qualidade	Valor	Adaptação ao Andador	Compatibilidade de Velocidade
Muito pior	-2	Mais de dois minutos para adaptação e uso incorreto do andador	Marcha descontínua durante o uso do andador
Pior	-1	Mais de dois minutos para adaptação e uso correto do andador	Velocidade da marcha assistida menor do que a velocidade da marcha livre
Esperado	0	Menos de dois minutos de adaptação e uso correto do andador	Velocidade da marcha assistida igual à velocidade da marcha livre
Melhor	+1	Menos de um minuto para adaptação e uso correto do andador	Velocidade da marcha assistida maior que a velocidade da marcha livre
Muito melhor	+2	Menos de 30 segundos para adaptação e uso correto do andador	Velocidade da marcha assistida atinge a velocidade limite do andador

Tabela 16 – Questionário usando a escala de Likert

Afirmações	TEA1	TEA2	TEA3	TEA4	TEA5
A criança atendeu aos comandos do mediador	2	5	4	3	4
A criança apresentou medo durante a sessão	5	1	3	3	2
A criança sentiu repulsão pelo robô	5	1	2	3	1
A criança demonstrou agitação	1	3	4	2	4
A criança demonstrou alegria	1	4	5	2	5
A criança se comunicou verbalmente	3	3	2	4	1

5.4 Likert

A escala de Likert foi utilizado para os testes realizados com as crianças com TEA. Tal escala é normalmente usada para transformar uma ideia subjetiva em objetiva, através dos parâmetros “Nunca”, “Raramente”, “Ocasionalmente”, “Frequentemente” e “Sempre”. Essa escala é similar ao SUS, porém com perguntas mais abertas, isto é, não padronizadas. Desta forma, é possível transformar informações qualitativas em quantitativas e mais fáceis de serem entendidas e mensuradas.

A Tabela 16 mostra o resultado do uso da escala de Likert para as crianças com TEA (também mostrados na Figura 73). De acordo com os resultados mostrados, é possível inferir que 4 das 5 crianças aceitaram o robô (valores superiores a 3 na escala Likert). Apenas 1 de 5 crianças com TEA que participaram do experimento teve medo do robô, não querendo interagir de forma alguma com o mesmo. Já outras quatro crianças seguiram as orientações do mediador e não tiveram medo do robô.

Um item importante a ser ressaltado é o fato de que este estudo possui um caráter de avaliação do sistema de funcionamento do robô, bem como os controladores. O número de crianças com o TEA é relativamente baixo para pesquisas que envolvam a evolução das mesmas a longo prazo durante um tratamento psicológico ou pedagógico, porém é satisfatório para responder a questões sobre a recepção e usabilidade do robô, principalmente dentro do contexto da Engenharia. Além disso, foi possível traçar um estudo piloto por meio da comparação entre as crianças em si, bem como das mesmas com o grupo controle que também possuía cinco voluntários (sem TEA).

5.5 Experimentos com voluntários

Nesta tese de doutorado, foram feitos experimentos com a participação de voluntários, ou seja, experimentos nos quais o sistema não foi testado apenas por participantes do laboratório (como os mostrados anteriormente), mas também com pessoas que são potenciais usuárias da plataforma robótica.

Antes de serem feitos os testes com a plataforma robótica, todos os protocolos e procedimentos foram aprovados pelo Comitê de Ética e Pesquisa da UFES, pela Plataforma Brasil, pelo CREFES (Centro de Reabilitação Física do Espírito Santo), pela AMAES (Associação dos Amigos dos Autistas do Espírito Santo) e pela EMEF-UFES (Escola Municipal de Ensino Fundamental - UFES). Os números dos experimentos no Comitê de Ética são #214/10 para os testes de mobilidade envolvendo pacientes hemiparéticos pós-acidente vascular cerebral e #1.101.769 para os teste com crianças com TEA. No caso específico das crianças com TEA, era exigida a presença de pelo menos um dos pais ou responsáveis pela criança e quem assinava os termos era o responsável legal. Além disso, havia o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido que devia ser aceito e assinado pelos voluntários/responsáveis antes dos testes (ver anexos A e B).

Quanto ao número de voluntários, dentro dos testes utilizando o modo de interação social foram 10 crianças, sendo metade do grupo controle e a outra metade com TEA. Já para os testes no modo “andador”, foram quatro voluntários no grupo controle e dois voluntários que possuíam a marcha hemiparética pós-AVC.

Em ambos os experimentos (no modo “interação social” e “andador”), os protocolos foram utilizados para garantir a consistência dos experimentos e a validação do funcionamento do sistema. Para realizar os experimentos com os voluntários, foram feitos os seguintes procedimentos:

- Antes do teste: acolhimento do voluntário e explicação de todo o experimento, além do pedido de permissão para realizar os testes (assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido).
- Início do teste: o voluntário já fica em uma posição marcada dentro da sala, onde será o ponto inicial (referência).
- Durante o teste: enquanto estiver realizando o teste, o voluntário deve estar concentrado no mesmo, porém, qualquer dúvida pode ser perguntada e, caso haja algum problema, desconforto ou desejo de desistência, o teste será interrompido.
- Após o teste: será pedido ao usuário para preencher uma ficha de avaliação sobre o teste, incluindo informações sobre como se sentiu antes, durante e após o teste. Tais informações são úteis para analisar como os experimentos são aplicados, como foi a utilização do sistema, em termos de conforto e sensação de segurança e, inclusive, para analisar se o protocolo está adequado aos experimentos. Por fim, tais dados são utilizados, junto com os resultados dos experimentos, para a obtenção de uma análise numérica sobre o funcionamento do sistema como um todo, o que inclui as métricas SUS, GAS e Likert (quando aplicável). Quando os testes são relativos às crianças (de ambos os grupos), os pais/responsáveis preenchem os questionários.

De acordo com o modo de operação do robô, existe um protocolo e testes específicos. Tais testes são detalhados na seção 5.5.3. A plataforma robótica foi avaliada em 4 etapas principais, sendo que os focos das avaliações eram o controle e as regras de segurança, além da usabilidade do sistema. A seguir são mostradas as etapas dos testes com o controlador:

1. Teste no modo “andador” com controlador PID (experimento)
2. Teste no modo “andador” com controlador de formação (validação)
3. Teste no modo “interação social” com controle manual (experimento)
4. Teste no modo “interação social” com controle baseado em cinemática inversa (validação)

5.5.1 Critérios de inclusão e exclusão

É importante definir os critérios de inclusão e exclusão para os testes citados anteriormente, a fim de padronizar os experimentos. No modo andador participaram pessoas com mais de 50 anos, que possuíam marcha hemiparética devido a acidente vascular cerebral e que necessitavam de suporte de andador. Para o grupo controle, a idade era o único critério exigido, além de não possuir problemas na marcha.

Quanto aos testes realizados no modo interação social, as crianças deveriam ter entre 6 e 11 anos em ambos os grupos. Dentro do grupo das crianças com o transtorno do espectro autista, as mesmas não deveriam utilizar medicação de ação central (um dos itens mais complicados dentro da seleção das crianças, já que a maioria utiliza remédios de ação central para controlar alguns sintomas do TEA), não ter tendência a agressividade ou agitação extrema, já que a mesma poderia perder o controle durante e querer ir em direção ao robô, podendo se machucar. Além disso, outro critério de exclusão foi a ausência de movimentos estereotipados, exatamente para a criança poder interagir sem a influência deste sintoma que atinge algumas crianças com TEA, mas que não refletem a intenção real da criança, o que dificultaria a análise dos testes.

5.5.2 Modo andador com controlador PID

Testes preliminares envolveram o controlador PID para auxiliar as pessoas a caminharem com o dispositivo. Neste teste, o voluntário tinha que caminhar três vezes um percurso de 10 metros, podendo descansar caso sentisse fadiga. Inicialmente, este caminho era feito sem o andador e, posteriormente, era feito com auxílio do mesmo. O caminho realizado pelo voluntário está representado na Figura 74.

O controlador PID foi utilizado para um estudo piloto e avaliar a usabilidade dos sistema por meio das escalas SUS e GAS para dois grupos de voluntários: o grupo controle

e o grupo pós acidente vascular cerebral (fase subaguda segundo a *Functional Ambulation Category*). As fotos presentes na Figura 75 mostram algumas fotos dos testes feitos com pacientes de ambos grupos.

O maior interesse neste teste era verificar a usabilidade por meio das escalas SUS e GAS, já que o controlador principal desta aplicação é controlador de formação, que foi mostrado na seção 5.1.1. Ao avaliar as escalas SUS e GAS para os dois grupos os resultados encontrados foram positivos, com a escala GAS 68,55 e 59,4 para os grupos controle e pós acidente vascular cerebral. Já a escala SUS foi avaliada em 96,25 e 73,75 para os respectivos grupos.

Tabela 17 – Escalas GAS e SUS para o experimento com o andador (grupo controle).

Voluntário	GAS	SUS
GCW1	74,8	92,5
GCW2	62,4	97,5
GCW3	68,6	97,5
GCW4	68,3	97,5
<i>Média</i>	68,5	96,2
<i>Desvio Padrão</i>	5,1	2,5

Tabela 18 – Escalas GAS e SUS para o experimento com o andador (voluntários com hemiparesia).

Voluntário	GAS	SUS
VH1	62,6	72,5
VH2	56,2	75,0
<i>Média</i>	59,4	73,7
<i>Desvio Padrão</i>	4,5	1,8

Os resultados deste pré-teste mostraram que a plataforma robótica no modo “andador” foi útil para ambos os casos (SUS com valores superiores a 68). Quanto a condição de andar com a marcha igual ou superior a que andavam naturalmente o grupo controle conseguiu controlar melhor a velocidade e se mantiveram dentro do limite 0,5 m/s do andador, apresentando um GAS de 68,55. Já o grupo com hemiparesia, muitas vezes conseguia andar de forma mais rápida do que o limite máximo permitido pelo andador e foi necessário reduzir a velocidade, gerando uma marcha mais lenta e, por isso, avaliaram a escala GAS em 59,4.

Em um questionamento feito com os voluntários após os testes, a fim de ter um *feedback* do experimento, ambos os grupos relataram maior facilidade de locomoção

utilizando o andador. Em especial o grupo com pós-AVC relatou melhor equilíbrio e balanço ao utilizar o sistema, sentindo-se mais seguro quando comparado à marcha livre (sem o andador). A avaliação da qualidade da caminhada e da utilização do sistema foi feita pelos próprios voluntários.

O grupo sem hemiparesia conseguiu utilizar o andador de forma satisfatória e na velocidade máxima, devido a ausência de problemas de mobilidade, como esperado. Contudo, voluntários com hemiparesia também relataram poder andar mais rápido que o limite máximo do andador e ter que reduzir sua velocidade para ficar dentro da velocidade máxima permitida do robô. Apesar de terem que reduzir a velocidade, relataram ter gostado de utilizar o andador, pois se sentiram mais seguros e com mais equilíbrio.

5.5.3 Modo Interação Social com Controle Manual

Os testes da plataforma robótica no modo “interação social” com controle manual foram feitos para verificar se a criança teria ou não medo do robô, além de avaliar sua interação por meio das escalas SUS, Likert e GAS, verificando a interação por meio do toque e do olhar (em relação ao robô) e da imitação do mediador.

Os testes consistiam em verificar como as crianças de ambos os grupos (TEA e controle) reagiriam ao interagir com o robô. Esse teste foi dividido em duas fases: a primeira era a auto-apresentação do robô e a segunda era a interação da criança com o robô e com o mediador. Os itens a seguir explicam de forma mais detalhada cada uma dessas fases.

- Fase 1 - Auto-apresentação: consistia na criança ficar em um local considerado “seguro” (um tapete localizado em uma região fora do alcance do robô) e assistir a auto-demonstração do mesmo. Essa auto-demonstração era composta pela movimentação do robô juntamente com a exibição de duas animações mostradas no monitor do próprio robô. O que era analisado nesta fase era se a criança ia ou não ter medo do robô e se desviaria ou não o olhar. A movimentação do robô está mostrada na Figura 76
- Fase 2 - Interação com o robô: nesta fase a plataforma robótica interagia diretamente com a criança e o mediador (Figura 77). Dentro desta fase já era possível analisar outros itens comportamentais importantes para crianças com TEA, como tocar o robô e imitar o mediador. Tais tarefas são complexas para uma criança com TEA, visto que normalmente elas tendem a ficar reclusas ou simplesmente não interagem, saindo completamente do contexto em que estão.

Dentro da Fase 1 havia um protocolo fechado de movimentação do robô, que está descrito a seguir:

- A criança, inicialmente, estava posicionada a três metros do robô e sentada em um tapete. Havia marcações no chão para saber as posições de 90, 180 e 270 centímetros em relação ao ponto inicial do robô. Essas posições serviam para guiar o pesquisador que estava teleoperando o robô;
- O robô se movia 90 centímetros em linha reta em direção à criança. Antes de iniciar a movimentação, os itens multimídia já haviam sido iniciados, exibindo os vídeos que são utilizados para chamar a atenção da criança;
- Depois disso, o robô para a movimentação linear e começa a girar no sentido anti-horário, para exibir todos os lados de si próprio para a criança e, desta forma, tentar atrair mais sua atenção;
- Então o robô move mais 90 centímetros até a próxima marcação. Chegando lá se repete a rotação, porém no sentido horário.
- Finalmente, o robô anda mais 90 centímetros e para a 30 centímetros da criança e do tapete. Esta etapa é o fim da Fase 1.

Após esta etapa de auto-apresentação, iniciava-se a Fase 2, que é de interação com o robô e com o mediador. A planta baixa da sala de testes pode ser vista na Figura 78, sendo que a área de interação era de 7,5m por 4m (30m²).

O robô tinha uma zona de interação, onde a criança deveria ir para começar a interagir. As regiões fora desta área eram as “zonas seguras” ou “zonas de observação”, regiões onde o robô não poderia entrar. No total, a área de interação tinha 30m².

As crianças que participaram do teste, de ambos os grupos, tiveram as mais diversas reações. Inicialmente, a maioria delas começou tímida ou com medo, mas posteriormente, interagiram com o robô.

Os resultados dos testes com o robô mostraram que o grupo de crianças com autismo conseguiu interagir de forma satisfatória. A Tabela 19 mostra os resultados para as crianças com autismo. Na Tabela 20 pode-se ver os resultados dos mesmos objetivos para as crianças sem autismo. Por questões éticas e em conformidade com os regulamentos que tratam de pesquisas envolvendo humanos, em todas as tabelas do GAS, SUS e Likert são apresentadas siglas representando os voluntários, de forma a não ser possível a sua identificação, mas permitindo o entendimento do texto. As sigla “TEA” se refere a uma criança com o transtorno do espectro autista, logo após a sigla vem um número que representa a mesma criança dentro de todas as tabelas. De forma similar, a sigla “GCM” se refere ao grupo controle para o modo de operação “interação social” e “GCW” se refere ao grupo controle para o modo “andador” e, por fim, “VH” se refere ao voluntário com marcha hemiparética.

Tabela 19 – Pontuação GAS para as crianças com TEA

Objetivos	TEA1	TEA2	TEA3	TEA4	TEA5
#1	+1	+1	+2	+1	-1
#2	-2	+2	+2	+2	0
#3	-1	+2	+2	+2	-1
GAS (Média: 60,94; $\delta = 18,41$)	40,88	72,8	77,36	72,8	40,88

Tabela 20 – Pontuação GAS para as crianças do grupo controle

Objetivos	GCM1	GCM2	GCM3	GCM4	GCM5
#1	+1	+2	+1	+1	+1
#2	+2	+2	+2	+2	-1
#3	+2	+2	+2	+2	+2
GAS (Média: 70,98; $\delta = 6,92$)	72.8	77.36	72.8	72.8	59.12

Dentro da escala GAS, ambos os grupos ficaram acima da média, com o grupo de crianças com TEA pontuando 60,94 contra 70,94 do grupo controle. Como esperado, as crianças do grupo controle conseguiram entender melhor o experimento e alcançar melhor os objetivos, porém ambos os grupos se mantiveram acima da média esperada, cujo valor é 50.

O resultado SUS para as crianças com TEA foi de 62, enquanto para as crianças do grupo controle foi de 63,5. Com isso, pode-se verificar que, em termos de usabilidade ambos os grupos obtiveram valores próximos entre si (diferença de 1,5 entre os grupos) e da média, que é 68 (SCHAEFER et al., 2009). A média na escala SUS é 68, pois as perguntas não tem o mesmo peso e é feita uma correlação entre as mesmas para verificar a qualidade das respostas do questionário (há perguntas cruzadas, sendo uma na forma afirmativa e outra na negativa para verificar se a pessoa está respondendo de forma coerente.)

Tabela 22 – Pontuação SUS para as crianças do grupo controle.

Questão	GCM1	GCM2	GCM3	GCM4	GCM5
#1	3	5	5	5	2
#2	3	1	2	1	2
#3	2	5	5	5	4
#4	5	3	4	4	5
#5	4	5	4	5	5
#6	3	1	3	1	2
#7	2	2	4	2	4
#8	5	1	2	2	2
#9	3	5	4	5	2
#10	5	1	3	4	5
SUS (Média: 63,5; $\delta = 21,4$)	32,5	87,5	70,0	75,0	52,5

Tabela 21 – Pontuação SUS para as crianças com TEA.

Questão	TEA1	TEA2	TEA3	TEA4	TEA5
#1	3	5	3	3	3
#2	3	1	3	2	2
#3	2	5	2	5	5
#4	5	1	4	1	1
#5	4	5	4	3	3
#6	3	1	3	3	3
#7	2	5	2	4	4
#8	5	1	4	2	2
#9	3	5	3	3	3
#10	5	1	5	2	2
SUS (Média: 62; $\delta = 27,58$)	32,5	100,0	37,5	70,0	70,0

Ambos os valores médios das escalas citadas anteriormente foram calculados com o valor médio dos resultados dos voluntários. Embora o número de crianças seja pequeno pode-se observar que no grupo controle todas as crianças atingiram o valor acima da média para o GAS e no grupo com TEA 3 de 5 crianças superaram a média. De forma complementar, o SUS acima da média foi atingido por 3 em 5 crianças nos dois grupos. Desta forma, como a amostra é pequena, utilizando os valores individuais podemos ver que parte significativa de ambos os grupos conseguiu utilizar bem o robô.

Estes experimentos verificaram em especial o contato visual, algo que notavelmente é deficiente em crianças com TEA (SCASSELLATI; HENNY; MATARIĆ, 2012), já que elas possuem ausência, redução ou contato visual atípico, o que representa um déficit na comunicação não-verbal e impacta a interação social (American Psychiatric Association, 2013). Além do contato visual, o toque também foi analisado, pois também é uma forma de comunicação não-verbal às quais as crianças com TEA normalmente apresentam grande resistência. De acordo com (KNAPP, 1978; COSTA et al., 2015), isto representa uma forma básica de comunicação sendo importante para a formação de laços afetivos entre os pais e as crianças. Por fim, o terceiro aspecto analisado foi a habilidade de imitar o mediador, o que é algo também faltante nessas crianças e é importante para o desenvolvimento cognitivo, linguagem e habilidades sociais (INGERSOLL, 2012; BEKELE et al., 2013).

Durante os experimentos foram feitas gravações em vídeo. Desta forma, além das análises feitas através das escalas SUS e GAS, alguns comportamentos foram observados nas imagens gravadas. A descrição dos comportamentos observados das crianças com TEA estão mostrados na Tabela 23.

Tabela 23 – Dados de comportamento observados durante os experimentos com crianças com TEA.

Vol.	Comportamento Observado
TEA1	As animações exibidas durante a Fase 1 atraíram a atenção e o interesse da criança. Quando o robô e as animações pararam, ela foi encorajada a se levantar para olhar o robô mais de perto, além de tocá-lo e brincar com ele (Fase 2). Contudo, ela demonstrou um pouco de medo e apresentou resistência para interagir com o robô.
TEA2	Durante a exibição das animações (Fase 1), ele gostou dos vídeos, uma vez que exibiu expressões faciais de alegria. Na Fase 2, ele respondeu aos comandos do mediador relativos a tocar o robô, olhá-lo de perto e brincar com o mesmo. Ele brincou várias vezes com o robô, se aproximando e se afastando do mesmo, como foi demonstrado anteriormente pelo mediador. Além disso, houve interação entre a criança e o robô ao mesmo tempo, uma vez que a criança segurou a mão do robô, junto com o mediador e os três “passearam” juntos. Quando perguntada, a criança falava o nome das partes do corpo do robô (nariz, olho, boca, etc.)
TEA3	Quando o robô se aproximou na Fase 1, ele ficou com um pouco de medo e tentou se desviar do robô. Contudo, ele foi encorajado pelo mediador a manter-se sentado no tapete (onde o robô não vai). Ele entendeu os comandos do mediador e ficou em pé para interagir com o robô (Fase 2). Inicialmente ele desviou o olhar, mas, posteriormente, após ser encorajado pelo mediador, ele interagiu com o robô e atendeu aos comandos, segurando as mãos do mediador. Além disso, ele também estabeleceu contato físico com outra mediadora, quando ela tocou e brincou com o robô. Ele andou e brincou com o robô e a mediadora e ambos seguraram a mão do robô. A criança indicou as direções que o robô deveria se mover, por meio de gestos. Aparentemente, a criança estava gostando de brincar com o robô, já que apresentava em sua face expressões de alegria. Essa criança, particularmente, tinha dificuldades de comunicação e a avó (que estava acompanhando o experimento) ao ver que ele estava falando partes do corpo do robô, sentiu-se emocionada.
TEA4	Quando o robô começou a se movimentar (Fase 1), a criança demonstrou medo, chamando a mãe. Ela e a mediadora, encorajaram-no a olhar para o robô e manter-se sentado no tapete. Durante a exibição da primeira animação, ele aparentou gostar da mesma, olhando para mãe querendo mostrar o filme. Contudo, na segunda animação (que era um desenho animado e não um filme como a primeira), ele afirmou não gostar de desenhos animados. Na Fase 2, durante a interação com o robô, ele o tocou e quando foi perguntado sobre as partes do robô, ele disse tanto o nome das partes do robô, como suas respectivas cores. Além disso, ele andou e brincou com o robô junto com a mediadora, segurando a mão da mediadora. Depois os dois “passearam” com o robô. A criança indicava as direções que o robô deveria se movimentar, por meio de gestos e de fala.
TEA5	Durante a Fase 1, a criança estava curiosa e interessada, olhando para o robô e assistindo às animações. Na Fase 2, ele atendeu aos comandos do mediador de se levantar e interagir com o robô. Inicialmente, ele olhou o robô à distância. Contudo, encorajado pela mediadora, ele interagiu tocando no robô, olhando-o de perto e caminhando junto com o mesmo, segurando sua mão. Ele também interagiu com a mediadora, ocasionalmente tocando sua mão e imitando-a no jogo de aproximar e se afastar do robô; e de se levantar e se agachar. Apesar dele não falar, balbuciou e apontou para o robô mostrando a direção que queria que a plataforma robótica se movesse e demonstrou que ele gostou do robô, por causa da suas expressões faciais de alegria.

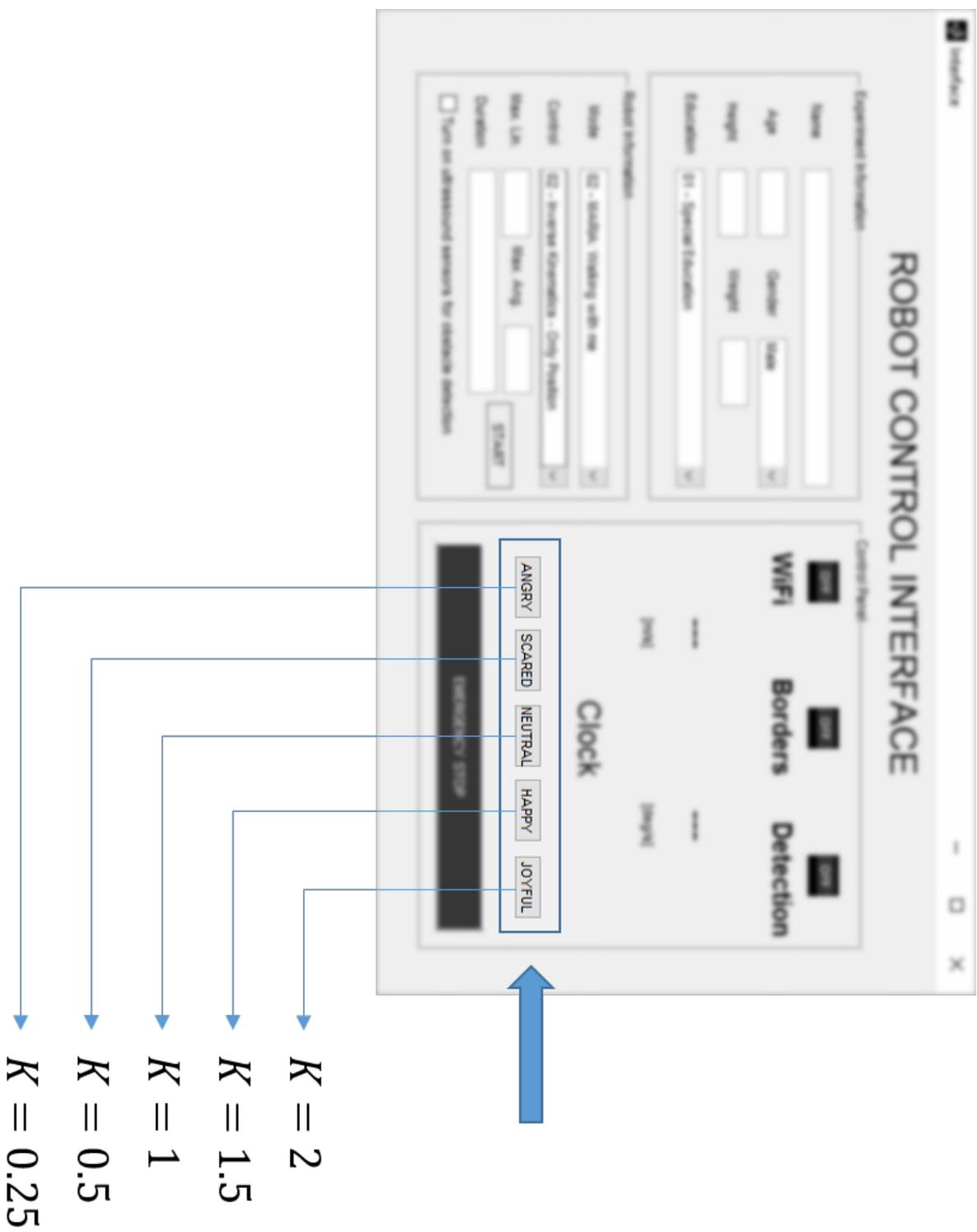


Figura 71 – Parte da interface responsável por alterar a velocidade de reação do robô quando em modo de interação social.

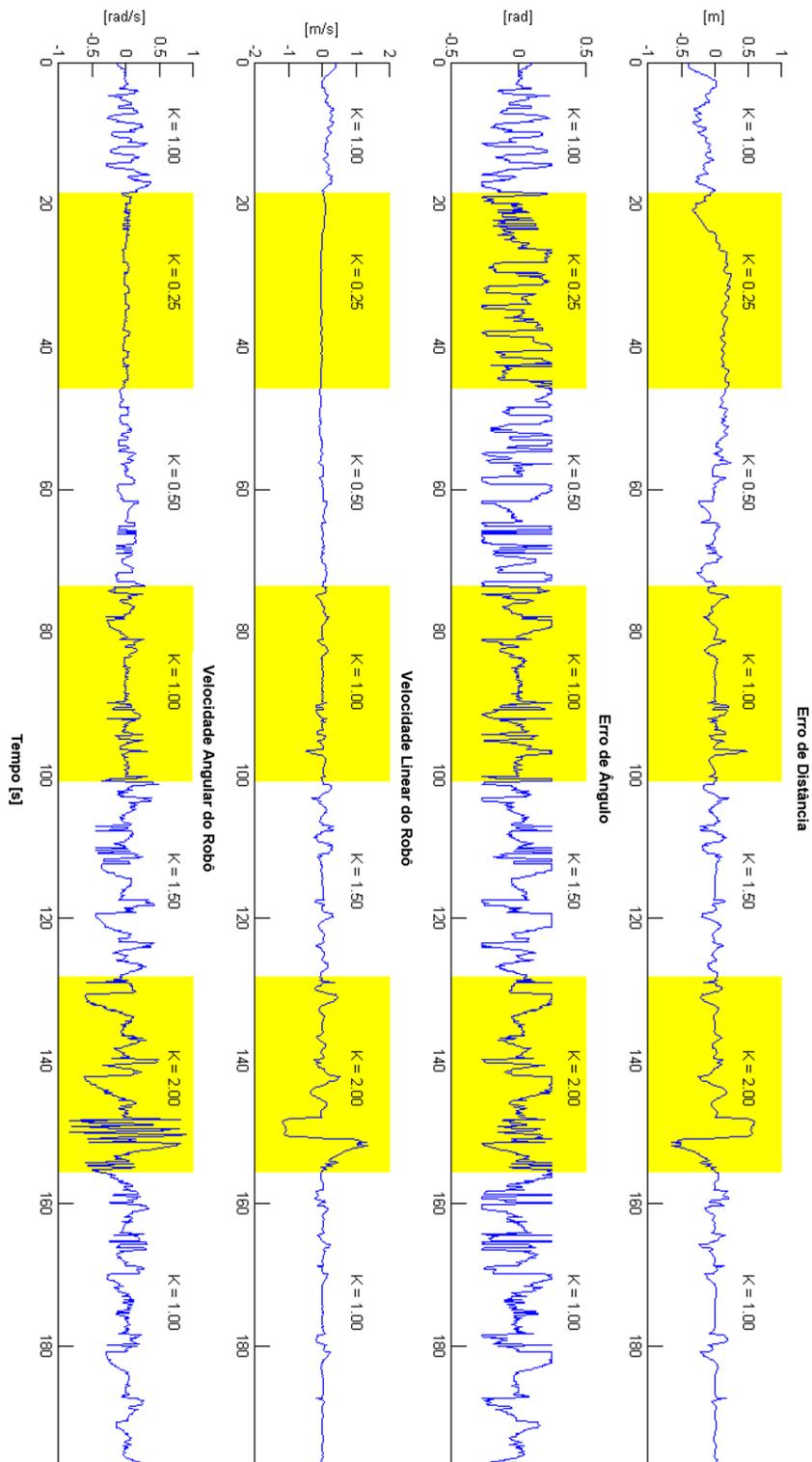


Figura 72 – Controlador de cinemática inversa com variação de ganhos durante o teste.

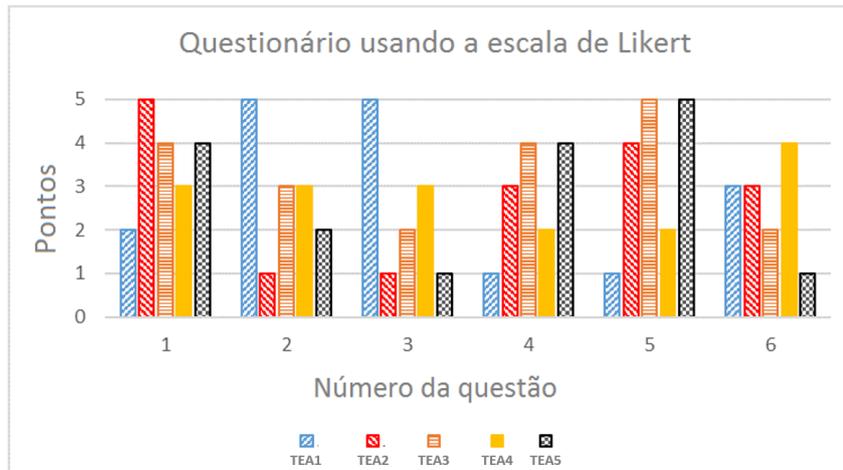


Figura 73 – Gráfico da escala de Likert (dados da Tabela 16)

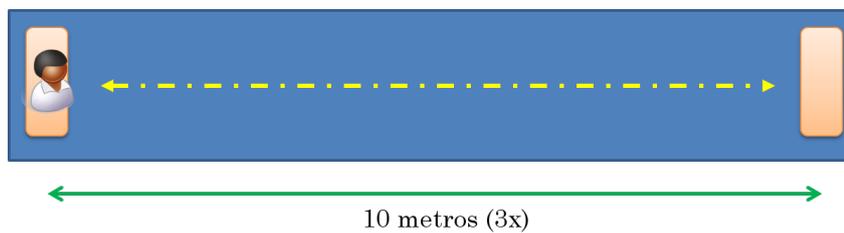


Figura 74 – Caminho feito no experimento do andador

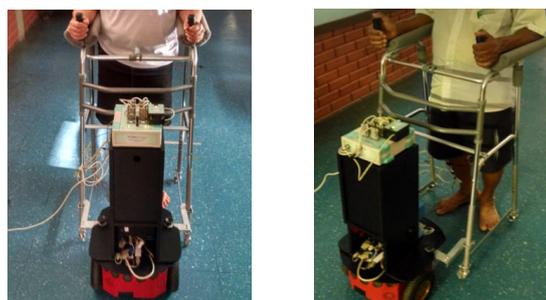


Figura 75 – Fotos do experimento utilizando o controlador PID

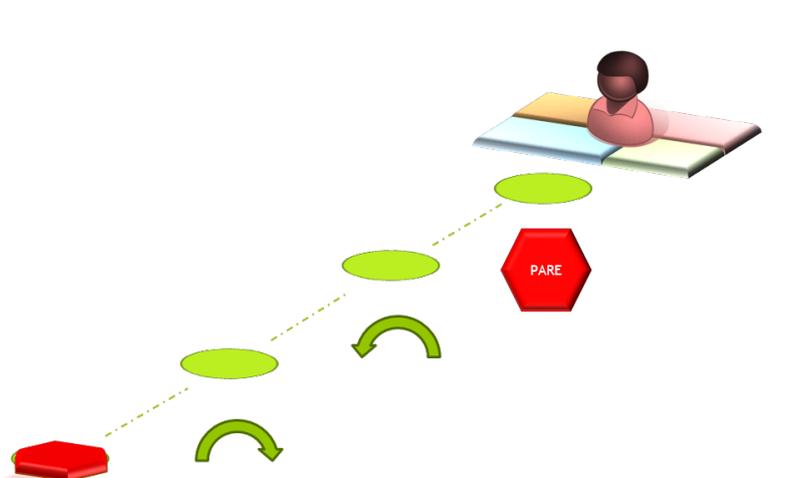


Figura 76 – Movimentação na Fase 1.

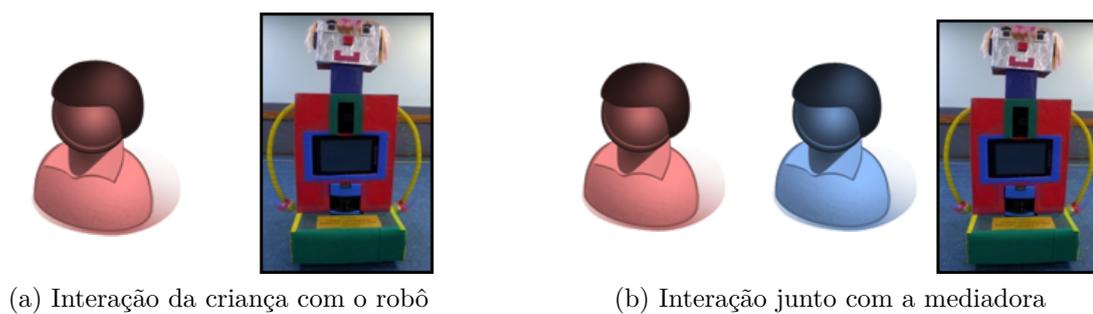


Figura 77 – Tipos de interação na Fase 2.



Figura 78 – Planta Baixa dos Experimentos Realizados com a MARIA.

6 Conclusão

A plataforma robótica desenvolvida nesta tese de doutorado foi útil para dois tipos diferentes de problemas: auxiliar pessoas com problemas de mobilidade nos membros inferiores, funcionando como um andador inteligente (*smart walker*) e auxiliar a interação social com crianças com TEA. Além disso, essa plataforma apresenta a vantagem de exigir poucas mudanças para operar em um modo ou outro, sendo, portanto, versátil.

Nos experimentos realizados, pôde-se verificar que o cumprimento de objetivos pelos usuários foram satisfatórios, sendo que a maioria conseguiu atingir pontuações acima da média para ambos os modos de operação. As escalas SUS, GAS e Likert serviram para provar que a plataforma robótica realmente foi capaz de atender aos objetivos de auxiliar na mobilidade de pessoas e também na interação com crianças com TEA. O sistema de controle e as regras de segurança propostos, também provaram ser eficientes para ambas as tarefas.

Resultados da validação da plataforma robótica, que podem ser vistos na Tabela 24, mostram, de forma simplificada, como o robô conseguiu cumprir a função de auxiliar os usuários, tanto na tarefa mobilidade, como na interação social.

De forma similar, a Tabela 25 sintetiza como os controladores foram úteis durante o processo de validação e experimentos.

Testes feitos com pacientes pós-AVC revelaram que a plataforma robótica no modo “andador” foi capaz de proporcionar mais estabilidade ao usuário, quando comparado com a marcha livre. Os voluntários também relataram mais segurança ao utilizar o andador robótico, exatamente pela estabilidade do balanço que o mesmo proporcionava. Já no modo “interação social”, foi possível implementar diversos tipos de interação entre o robô e crianças com TEA, desde uma interação em que apenas o robô se movia e fazia um

Tabela 24 – Síntese dos resultados da plataforma robótica.

Dados	Observações
Auto-apresentação	O robô atingiu o objetivo de se “auto-apresentar” tornando mais fácil a futura interação para a maior parte das crianças (4 de 5).
Brincando com a MARIA	A maior parte das crianças (4 de 5) conseguiram interagir com o robô, tocando e brincando com o mesmo. Em alguns casos foi necessário encorajamento por parte dos pais ou cuidadores e dos pesquisadores, porém em muitos casos, após encorajamento inicial a criança interagiu por conta própria.
Andador - Modo Guia	O andador trouxe mais conforto para os pacientes pós-AVC, ainda que os tenha feito andar a uma velocidade mais baixa em alguns casos. O balanço foi melhor e também foi relatada uma melhor sensação de segurança.

Tabela 25 – Síntese dos resultados observacionais dos controladores.

Dispositivo	Controlador	Observações
Andador	PID	O controlador PID foi utilizado nos testes com o grupo controle com os voluntários com hemiparesia. O controlador garantiu a distância correta do usuário, que caminhou em uma linha reta. O uso do andador deu ao usuário maior estabilidade e, conseqüentemente, conforto.
MARIA	PID	O controlador PID foi utilizado em testes preliminares antes de ser implementado o controlador baseado em posição. Funcionou de forma satisfatória, mantendo a distância e o ângulo correto com relação ao ponto mais próximo (criança).
Andador	Cinemática Inversa	O controlador de posição baseado em cinemática inversa também funcionou de forma satisfatória, mantendo a distância e o ângulo correto do usuário em relação ao andador
MARIA	Cinemática Inversa	O controlador de posição baseado em cinemática inversa conseguiu manter a criança na distância e ângulos corretos e o robô pode-se mover de forma suave ou de forma mais veloz, de acordo com os ganhos que poderiam variar dentro de um mesmo experimento.
Andador	Formação	O controlador de formação funcionou de forma satisfatória, já que conseguiu realizar curvas complexas como a Lemniscate (curva em forma de oito).

trajeto pré-definido (Fase 1, modo auto-apresentação), até o modo de interação conjunta, envolvendo vários aspectos importantes para a criança com TEA: atenção conjunta, interesse no robô e brincadeiras compartilhadas com os mediadores. Foi possível visualizar que, para a grande maioria das crianças, o robô conseguiu estimular a interação social, fazendo inclusive com que verbalizassem – algo muito incomum em crianças com TEA. Todo esse contexto demonstra que o robô no modo “interação social” foi útil para essas crianças.

Dentro do contexto da interação social, um diferencial em relação a outros robôs da literatura, é o fato de que o robô MARIA possui o tamanho aproximado de uma criança de 7 a 8 anos (1,35m). Isso faz com que a interação seja mais fácil, uma vez que o robô se torna um “amigo” com o qual a criança possa interagir de forma mais igual. Se o robô fosse maior que a criança poderia despertar medo e intimidar, enquanto se fosse menor, poderia despertar pouco interesse e curiosidade na análise das partes mecânicas do robô e não no robô em si (GIULLIAN *et al.*, 2010).

Um outro aspecto importante do projeto do robô é o fato do mesmo possuir características mistas antropomórficas e não-biomiméticas. Isso ajuda a diminuir o nível de complexidade e entendimento necessários para um robô antropomórfico e, ao mesmo tempo, mantém as características social do robô. O aspecto “mecânico” ajuda a deixar a criança mais curiosa. Isso é acentuado pelas cores e formas do robô (PARON-WILDES, 2005).

Com relação ao sistema de controle do robô, os experimentos realizados mostraram que o robô teve um bom funcionamento e, juntamente com a interface, pôde gerar relatórios com informações relativas aos experimentos, os quais podem ser analisados por profissionais da área de saúde. O algoritmo proposto para detectar o usuário (no caso a criança no modo “interação social” ou as pernas do usuário no modo “andador”) também se mostrou eficaz.

A inovação presente nesta pesquisa de doutorado, em comparação com outros trabalhos da literatura, é destacada, porque, para o modo “andador”, não é necessário que o usuário utilize sensores conectados ao corpo, nem que o andador possua sensores de força. Ressalta-se que outros andadores desenvolvidos possuem sensores de forças de alto custo, utilizam mais de um sensor laser, ou usam múltiplos sensores diferentes para a detecção do usuário e controle de movimentos do robô. Também há outros andadores que utilizam IMUs (*Inertial Measurement Units*) – Unidades de Medição Inercial, sobre o corpo do usuário para proporcionar informações sobre a localização do usuário em relação ao andador. Em outras palavras, mostra-se que mesmo sem os sensores mais avançados e ainda sob condições diferentes de construção, o andador apresentado nesta tese também pôde auxiliar as pessoas a fazer pequenas caminhadas, como fariam em ambientes com o fisioterapeuta.

No caso do robô no modo de “interação social”, o robô desenvolvido nesta tese de doutorado difere dos existentes na literatura, tanto pelo seu tamanho (da mesma estatura média das crianças), como pelo fato do robô ser móvel e dotado de sistema de controle. Ressalta-se que a maioria dos robôs existentes para interação com crianças com TEA possuem porte pequeno e utilizam apenas sensores simples (apenas sensores de toque). Outro ponto importante é o fato do robô fazer a auto-apresentação, algo que não é comum nos protocolos de robôs que interagem com crianças com autismo. A auto-apresentação, como foi dito anteriormente, permite à criança ficar mais relaxada e auxilia na fase seguinte de interação direta com o robô.

Por fim, resumindo os testes feitos, os relatos e resultados das escalas dos voluntários, os comportamentos observados e os testes feitos para provar o controle, regras de segurança e interface pode-se dizer que a plataforma robótica pode auxiliar as pessoas nos dois modos de operação (com e sem contato, respectivamente, modo andador e modo interação social) e esta também se mostra como uma potencial ferramenta para utilização das pessoas que trabalham com reabilitação, tanto na parte física, como na parte cognitiva e de desenvolvimento. A seção 6.3 apresenta algumas ideias para futuras pesquisas com vista a fazer com que o robô desenvolvido fique ainda mais adequado e robusto para operação em ambos os modos e, desta forma, traga benefícios mais amplos para os usuários.

6.1 Síntese das contribuições

As contribuições deste projeto são o desenvolvimento de uma plataforma única, com dois propósitos de reabilitação distintos (um com relação à parte motora e outra relativa a parte cognitivo-comportamental), o desenvolvimento de uma interface que faz o gerenciamento do sistema nas duas formas de operação e a contribuição de cunho social, já que o projeto visa atender a pessoas com problemas motores e cognitivo-comportamentais, no caso, o TEA.

Dentro da montagem e desenvolvimento da plataforma, ainda pode-se citar como contribuição um sistema que permite a rápida troca entre os modos de operação, a auto-apresentação para crianças com TEA dentro do modo de interação social e o controle de formação humano-robô, onde o humano é o líder e não possui sensores anexados ao seu corpo. Para que esta última tarefa fosse possível foi necessário desenvolver um controle de formação em que o seguidor projetava os dados no líder (que não possuía sensores) e depois re-projetava os dados em si próprio para manter a formação.

Por fim, a questão estética e ergonômica do robô também foram importantes. No modo andador a adaptação feita permitiu uma distribuição melhor de peso entre as quatro rodas loucas do andador convencional que estava anexado, além das três rodas do robô, fazendo com que o robô não tivesse que carregar peso excessivo. Ao mesmo tempo o usuário poderia se apoiar na estrutura do andador, que possuía as quatro rodas loucas, aliviando assim seu esforço, relativo ao peso do corpo, na hora de caminhar.

Dentro do contexto de interação social, o robô possui uma altura similar a das crianças que participaram dos testes, fazendo com que o robô fosse mais amigável. Trabalhos como (GIULLIAN *et al.*, 2010) e (PARON-WILDES, 2005) mostram que a estética do robô, incluindo sua altura e cores, são importantes para as crianças autistas. De acordo com estes estudos, o robô não deve ser muito parecido com o ser humano, pois pode provocar medo nas crianças e, ao mesmo tempo, não pode ter um estilo muito mecânico, pois a criança pode se interessar mais em examinar o robô do que interagir com o mesmo.

Tais características mostram a inovação desta tese de doutorado em relação aos trabalhos vistos e pesquisados até então, dentro destas duas áreas de reabilitação. A versatilidade do robô, associado ao fato do mesmo poder se aplicado em áreas distintas e com um sistema de controle diferente e integrado a uma interface fazem este trabalho ser distinto dos presentes na literatura até o momento.

6.2 Lista de publicações

Esta seção mostra as publicações realizadas em modo decrescente a partir de 2012, que foi o ano de início desta pesquisa.

Ano 2016

- Valadão, Carlos; Goulart, Christiane; Rivera, Hamilton; Frizera-Neto, Anselmo; Bastos-Filho, Teodiano F., Carelli, Ricardo. Analysis of the Use of a Robot to Improve Social Skills in Children with Autism Spectrum Disorder. *Research on Biomedical Engineering Journal*, 2016. Artigo Aceito. Aguardando publicação final.
- Valadão, Carlos; Caldeira, Eliete M. O.; Frizera-Neto, Anselmo; Bastos-Filho, Teodiano F.; Carelli, Ricardo. A New Controller for a Smart Walker Based on Human-Robot Formation. *Sensors (Basel)*, 2016. Artigo Aceito. Aguardando publicação final.

Ano 2015

- Valadão, Carlos; Goulart, Christiane; Bastos-Filho, Teodiano F.; Frizera-Neto, Anselmo; Carelli, Ricardo. Robotic System to Help Autistic Children Interaction. In: 1st International Workshop on Assistive Technology, 2015, Vitória. *Proceedings of the 1st International Workshop on Assistive Technology*, 2015. p. 209-212.
- Valadão, Carlos; Loterio, Flávia A.; Cardoso, Vivianne; Bastos-Filho, Teodiano F. Bastos-Filho; Frizera-Neto, Anselmo; Carelli, Ricardo. Robotic Walker to Assist and Monitor Physiotherapy Sessions. In: 1st International Workshop on Assistive Technology, 2015, Vitória. *Proceedings of the 1st International Workshop on Assistive Technology*, 2015. p. 82-85.
- Goulart, Christiane; Garcia, Javier F. C.; Valadão, Carlos; Caldeira, Eliete M. O.; Bastos-Filho, Teodiano F. Study of EEG Signals to Evaluate Emotional and Mental States of Children with ASD in the Interaction with Mobile Robot. In: 1st International Workshop on Assistive Technology, 2015, Vitória. *Proceedings of the 1st International Workshop on Assistive Technology*, 2015. p. 217-220.
- Loterio, Flávia A.; Cardoso, Vivianne ; Valadão, Carlos ; Mayor, Jhon. J. V.; Bastos-Filho, Teodiano F.; Frizera-Neto, Anselmo . Analysis of Muscle Activation Patterns in Post-Stroke Individuals During Assisted Gait by Robotic Walker. In: 1st International Workshop on Assistive Technology, 2015, Vitória. *Proceedings of the 1st International Workshop on Assistive Technology*, 2015. p. 11-14.
- Tello, Richard; Valadão, Carlos; Bastos-Filho, Teodiano F. Control de una Silla de Ruedas Robótica de Alto Rendimiento por Medio de Potenciales Evocados Visuales. In: VI International Congress on Design, Research Networks and Technology for All, 2015, Madri. *Proc. of the DRT4ALL2015*, 2015. p. 8 pg.
- Valadão, Carlos; Alves, Silas; Loterio, Flávia A.; Goulart, Christiane; Cardoso, Vivianne; Bastos-Filho, Teodiano F.; Frizera-Neto, Anselmo; Carelli, Ricardo. A Multipurpose Robot for Aiding Mobility and Autistic Children Interaction. In: VI International Congress on De-

sign, Research Networks and Technology for All, 2015, Madri. Proc. of the DRT4ALL2015, 2015. p. 10 pg.

- Goulart, Christiane; Valadão, Carlos; Caldeira, Eliete M. O.; Bastos-Filho, Teodiano F. Maria: Um Robô para Interação com Crianças com Autismo. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2015, Natal. Anais do SBAI2015, 2015. p. 6 pg.
- Tello, Richard; Bissoli, Alexandre; Valadão, Carlos; Müller, Sandra M. T.; Ferreira, André; Carelli, Ricardo; Bastos-Filho, Teodiano F. Performance Improvements for Navigation of a Robotic Wheelchair Based on SSVEP-BCI. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2015, Natal. Anais do SBAI2015, 2015. p. 6 pg.
- Loterio, Flávia; Valadão, Carlos; Bastos-Filho, Teodiano F.; Cardoso, Vivianne; Frizera-Neto, Anselmo. Proposal for a Protocol to Muscle Fatigue Analysis During Gait in Different Speeds. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2015, Natal. Anais do SBAI2015, 2015. p. 6 pg.

Ano 2014

- Goulart, Christiane; Garcia, Javier F. C.; Valadão, Carlos; Bastos-Filho, Teodiano F.; Caldeira, Eliete M. O. EEG analysis and mobile robot as tools for emotion characterization in autism. BMC Proceedings, v. 8, p. P85, 2014.
- Frizera-Neto, Anselmo; Elias, Arlindo; Cifuentes, Carlos; Valadão, Carlos; Schneider-Júnior, Valmir; Rodriguez, Camilo; Carelli, Ricardo ; Bastos-Filho, Teodiano F. Walkers. In: Bastos-Filho, Teodiano F.; Dinesh Kant Kumar; Sridhar Arjunan. (Org.). Devices for Mobility and Manipulation for People with Reduced Abilities (Rehabilitation Science in Practice Series). 1ed.: CRC Press, 2014, v. 1, p. 141-166.
- Valadão, Carlos; Sarmiento, Jhon; Goulart, Christiane; Garcia, Javier F. C.; Bastos-Filho, Teodiano F. Manipulation Technologies for Developing Cognitive Skills. In: Bastos-Filho, Teodiano F.; Dinesh Kant Kumar; Sridhar Arjunan. (Org.). Devices for Mobility and Manipulation for People with Reduced Abilities (Rehabilitation Science in Practice Series). 1ed.: CRC Press, 2014, v. 1, p. 167-178.
- Parra, Ana C. V.; Delisle, D.; Loterio, Flávia A.; Valadão, Carlos; Bastos-Filho, Teodiano F.; Frizera-Neto, Anselmo. Robotic Systems for Gait Rehabilitation. In: Adriano de Oliveira Andrade, Alcimar Barbosa Soares, Alexandre Cardoso, Edgard Afonso Lamounier. (Org.). Tecnologias, Técnicas e Tendências em Engenharia Biomédica. 1ed. Bauru: Canal6 Editora, 2014, v. 1, p. 264-279.
- Goulart, Christiane; Garcia, Javier F. C.; Valadão, Carlos; Caldeira, Eliete M. O.; Bastos-Filho, Teodiano F. Mobile Robotics: A Tool for Interaction with Children with Autism. In: IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics (ISIE 2014), 2014, Istanbul. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2014. p. 1551-1555.

- Valadão, Carlos; Bastos-Filho, Teodiano F.; Frizera-Neto, Anselmo; Carelli, Ricardo. Towards a Smart Walker Controller for Physiotherapy and Rehabilitation Purposes. In: IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2014), 2014, Istambul. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2014. p. 1574-1579.
- Goulart, Christiane; Garcia, Javier F. C.; Valadão, Carlos; Trauernicht Malte; Caldeira, Eliete M. O.; Bastos-Filho, Teodiano F. Proposal of Evaluation Methods of Interaction between a Mobile Robot and Children with Autism Spectrum Disorder. In: 5th IEEE Biosignals and Biorobotics Conference (BRC 2014), 2014, Salvador. Proc. of the 5th IEEE Biosignals and Biorobotics Conference, 2014. p. 6 pg.
- Valadão, Carlos; Loterio, Flávia A.; Cardoso, Vivianne; Bastos, T. F.; Frizera-Neto, Anselmo; Carelli, R. Adaptação de Andador Convencional para Reabilitação e Assistência a Pessoas com Restrições Motoras. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica (CBEB), 2014, Uberlândia. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica (CBEB), 2014. p. 4 pg.
- Goulart, Christiane; Garcia, Javier F. C.; Trauernicht, Malte; Valadão, Carlos ; Caldeira, Eliete M. O.; Bastos-Filho, Teodiano F. Estudo de Estados Emocionais e Mentais de Crianças com Autismo Baseado em EEG na Interação com um Robô Móvel. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica (CBEB), 2014, Uberlândia. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica (CBEB), 2014. p. 4 pg.
- Loterio, Flávia A.; Cardoso, Vivianne; Valadão, Carlos ; Costa, Regina M.; Mayor, Jhon. J. V.; Bastos-Filho, Teodiano F.; Frizera-Neto, Anselmo. Avaliação da Aplicabilidade de Andador Robótico para Indivíduos Hemiparéticos Através de Eletromiografia. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica (CBEB), 2014, Uberlândia. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica (CBEB), 2014. p. 4 pg.
- Loterio, Flávia A.; Cardoso, Vivianne; Valadão, Carlos; Costa, Regina M.; Bastos-Filho, T.; Frizera-Neto, Anselmo; Lima, Eduardo R. Metodologia para Análise de Padrão Muscular de Indivíduos Pós-AVC Durante Marcha Assistida. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica (CBEB), 2014, Uberlândia. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica (CBEB), 2014. p. 4 pg.
- Cardoso, Vivianne; Loterio, Flávia A.; Valadão, Carlos; Frizera-Neto, Anselmo; Bastos-Filho, Teodiano F. Análise Eletromiográfica em Marcha Livre e Marcha Assistida Por Andador Convencional. In: VI Jornadas AITADIS de Rehabilitación y Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad, 2014, Asunción. Memorias de las VI Jornadas AITADIS de Rehabilitación y Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad, 2014. p. 4 pg.

Ano 2013

- Valadão, Carlos; Schneider-Júnior, Valmir; Cifuentes, Carlos; Frizzera-Neto, Anselmo; Bastos-Filho, Teodiano F. Development of a Smart Walker to Assist Human Mobility. In: 4th IEEE Biosignals and Biorobotics conference (ISSNIP), 2013, Rio de Janeiro. Proceedings of the 4th IEEE Biosignals and Biorobotics conference (ISSNIP), 2013. p. 5pg.
- Valadão, Carlos; Bastos-Filho, Teodiano F.; Cifuentes, Carlos; Frizzera-Neto, Anselmo; Carelli, Ricardo. A Smart Walker to Help the Mobility of People with Disabilities and Elderlies. In: V International Congress on Design, Research Networks, and Technology for All, 2013, Madrid. Proceeding of the V International Congress on Design, Research Networks, and Technology for All, 2013. p. 10 pg.
- Valadão, Carlos; Cifuentes, Carlos; Frizzera-Neto, Anselmo; Carelli, Ricardo; Bastos-Filho, Teodiano F. Development of a Smart Walker for People with Disabilities and Elderlies. In: XV Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control - RPIC 2013, 2013, San Carlos de Bariloche. Memorias de la XV Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control - RPIC 2013, 2013. p. 6 pg.
- Goulart, Christiane; Garcia, Javier F. C.; Valadão, Carlos; Bastos-Filho, Teodiano F. EEG Analysis and Mobile Robot as Tools for Emotion Characterization in Autism. In: 5º Congresso Brasileiro de Biotecnologia, 2013, Florianópolis. Anais do 5o Congresso Brasileiro de Biotecnologia, 2013. p. 1.

Ano 2012

- Bastos-Filho, Teodiano F.; Valadão, Carlos; Bôrtole, Magdo. Use of Robotics as a Learning Aid for Disabled Children. *Journal of Accessibility and Design for All*, v. 2, p. 71-93, 2012.
- Elias, Arlindo; Frizzera-Neto, Anselmo; Bastos-Filho, Teodiano F.; Valadão, Carlos. Robotic Walkers from a Clinical Point of View: Feature-Based Classification and Proposal of the UFES Walker. In: 3rd IEEE Biosignals and Biorobotics conference (ISSNIP), 2012, Manaus. Proceedings of the 3rd IEEE Biosignals and Biorobotics conference (ISSNIP), 2012. p. 4pg.
- Schneider-Júnior, Valmir; Frizzera-Neto, Anselmo; Valadão, Carlos; Elias, Arlindo; Bastos-Filho, Teodiano F.; Bento-Filho, Antônio. Detecção de Pernas Utilizando um Sensor de Varredura Laser Aplicado a um Andador Robótico. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2012, Campina Grande. Anais do Congresso Brasileiro de Automática, 2012. p. 6pg.
- Valadão, Carlos; Schneider-Júnior, Valmir; Elias, Arlindo; Frizzera-Neto, Anselmo; Bastos-Filho, Teodiano F.; Carelli, Ricardo. Desarrollo de un Andador Robotizado para Ayuda a la Marcha Humana. In: VII Jornadas Argentinas de Robótica, 2012, Olavarría. Memorias de las VII Jornadas Argentinas de Robótica, 2012. p. 6 pg.



Figura 79 – NUC - computador embutido a ser usado dentro do robô MARIA em sua nova versão.

6.3 Pesquisas futuras

Como propostas futuras a serem realizadas a partir desta tese de doutorado, podem-se citar:

- Integrar mais um processador embarcado no robô, tal como um computador de alto poder de processamento (por exemplo, o NUC S/N:11993063, com processador i5 Dual Core HT, 4GB RAM, 120GB SSD e placa de rede wireless 300 Mbps), a qual permitirá todo o controle ser realizado dentro da própria plataforma robótica. Assim, apenas comandos externos de emergência ou troca manual de comportamento (para o caso do robô no modo “interação social”) necessitarão ser realizados externamente (mostrado na Figura 79).
- Substituir o sensor laser SICK LMS-200 por um sensor laser LIDAR, que é menor, de mais baixo custo, e possui faixa de detecção de 360° (o que facilita as aquisições do robô no modo “interação social”).
- Instalar um dispositivo Kinect 2.0 e uma câmera térmica, os quais possibilitam localizar a criança e detectar seus gestos e expressões faciais e conhecer sua temperatura facial, a qual está associada a emoções, sendo muito útil para o modo “interação social”.
- Substituir a face do robô por um *tablet*, o qual possibilitará que o robô, no modo “interação social”, possa exibir diferentes expressões faciais.
- Haverá uma mudança no formato do robô e na fantasia a ser utilizada, a qual permitirá a incorporação de um *tablet* de 10 polegadas, que servirá como display tátil para jogos, enquanto as crianças interagirem com o robô. Além disso, o *tablet* também será responsável por exibir diferentes expressões faciais no robô.

- Mudança no sistema de geração do relatório em PDF, para agregar informações dos novos sensores.
- Implementar um sistema que permita modificação do comportamento do robô durante o experimento e cuja variação possa ser determinada remotamente pelo terapeuta, deixando assim o sistema mais escalável.
- Instalação de um botão de emergência físico (independente do robô) que corte a energia da bateria do mesmo, fazendo-o parar instantaneamente. Este botão será independente de todo o sistema (inclusive dos *tablets* e do computador presente no robô.)

Na Figura 80 podem ser vistos os outros dispositivos que serão adicionados ao robô (respectivamente Kinect, câmera térmica, Eye-Tracker e LIDAR).



Figura 80 – Equipamentos futuros a serem instalados na nova versão da plataforma robótica para interação social (Kinect, câmera térmica, Eye-Tracker, LIDAR).

Referências

American Psychiatric Association. Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, 5th Edition (DSM-5). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders 4th edition TR.*, p. 280, 2013. ISSN 2317-1782.

Autism Grande Cause. *Autism Grande Cause*. 2012. Disponível em: <<http://www.autismgrandecause2012.fr/>>.

Autism Resource Centre. *Autism Resource Centre*. 2013. Disponível em: <<http://www.autism.org.sg/>>.

BARELA, A. Análise biomecânica do andar de adultos e idosos nos ambientes aquático e terrestre. p. 131, 2005.

BEKELE, E. T. et al. A step towards developing adaptive robot-mediated intervention architecture (ARIA) for children with autism. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, v. 21, n. 2, p. 289–299, 2013. ISSN 15344320.

BELLOTTO, N.; Huosheng Hu. Multisensor-Based Human Detection and Tracking for Mobile Service Robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, v. 39, n. 1, p. 167–181, feb 2009. ISSN 1083-4419.

BRADLEY, S. M.; HERNANDEZ, C. R. Geriatric assistive devices. *American Family Physician*, v. 84, n. 4, p. 405–411, aug 2011. ISSN 0002838X.

Brazilian Health Ministry. *Diretrizes de Atenção à Reabilitação da Pessoa com Transtornos do Espectro do Autismo (TEA)*. [S.l.: s.n.], 2013. ISBN 978-85-334-2089-2.

BROOKE, J. SUS : A Retrospective. *Journal of Usability Studies*, v. 8, n. 2, p. 29–40, 2013. ISSN 1931-3357.

CABIBIHAN, J. J. 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*, v. 5, n. 4, p. 593–618, 2013. ISSN 18754791.

Center for Disease Control and Prevention. *Autism Spectrum Disorders - Data and Statistics*. 2013. Disponível em: <<http://www.cdc.gov/ncbddd/autism/data.html>>.

CHUGO, D. et al. A rehabilitation walker with standing and walking assistance. In: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 260–265. ISBN 9781424420582.

Comitê de Ajudas Técnicas. *ATA VII*. 2007. 18 p.

COOK, A. M. et al. School-based use of a robotic arm system by children with disabilities. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, v. 13, n. 4, p. 452–460, 2005. ISSN 15344320.

COOK, A. M.; HOWERY, K. Robot-Enhance Discovery and Exploration for Very Young Children with Disabilities. 1999.

- COOK, A. M. et al. Development of a robotic device for facilitating learning by children who have severe disabilities. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, v. 10, n. 3, p. 178–187, sep 2002. ISSN 15344320.
- COSTA, S. et al. Using a Humanoid Robot to Elicit Body Awareness and Appropriate Physical Interaction in Children with Autism. *International Journal of Social Robotics*, v. 7, n. 2, p. 265–278, 2015. ISSN 18754805.
- DAUTENHAHN, K. Roles and Functions of Robots in Human Society- Implications from Research in Autism Therapy. *Robotica*, v. 21, n. 4, p. 443–452, 2003. ISSN 02635747.
- DAUTENHAHN, K.; WERRY, I. Issues of Robot-Human Interaction Dynamics in the Rehabilitation of Children with Autism. *Social Dynamics*, v. 6, p. 519–528, 2000.
- DUBOWSKY, S. et al. PAMM - a robotic aid to the elderly for mobility assistance and monitoring: a “helping-hand” for the elderly. In: *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*. [S.l.]: IEEE, 2000. v. 1, n. April, p. 1–7. ISBN 0-7803-5886-4. ISSN 1050-4729.
- DUQUETTE, A.; MICHAUD, F.; MERCIER, H. 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, 2008. ISSN 09295593.
- ELIAS, A. et al. Robotic walkers from a clinical point of view: Feature-based classification and proposal of the UFES Walker. *2012 ISSNIP Biosignals and Biorobotics Conference: Biosignals and Robotics for Better and Safer Living, BRC 2012*, Ieee, p. 1–5, jan 2012.
- ELSABBAGH, M. et al. Global Prevalence of Autism and Other Pervasive Developmental Disorders. *Autism Research*, v. 5, n. 3, p. 160–179, 2012. ISSN 19393792.
- FERASOLI-FILHO, H. et al. Use of myoelectric signals to command mobile entertainment robot by disabled children: Design and control architecture. *2012 ISSNIP Biosignals and Biorobotics Conference: Biosignals and Robotics for Better and Safer Living, BRC 2012*, 2012.
- FRIZERA, A. et al. Estudio y Caracterización de la Cinemática de los Pies en Marcha Asistida con Andadores. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, Elsevier, v. 6, n. 4, p. 69–79, 2009. ISSN 16977912.
- FRIZERA-NETO, A. *Interfaz multimodal para modelado, estudio y asistencia a la marcha humana mediante andadores robóticos*. 270 p. Tese (Doutorado) — Universidad de Alcalá, 2010.
- GIULLIAN, N. et al. Detailed requirements for robots in autism therapy. *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, p. 2595–2602, 2010. ISSN 1062922X.
- GOULART, C. M. et al. Mobile robotics: A tool for interaction with children with autism. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, p. 1555–1559, 2014.

- HIRATA, Y.; HARA, A.; KOSUGE, K. Passive-type intelligent walking support system “RT Walker”. In: *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*. [S.l.]: IEEE, 2004. v. 4, p. 3871–3876. ISBN 0-7803-8463-6.
- HIRATA, Y.; MURAKI, A.; KOSUGE, K. Motion control of intelligent passive-type Walker for fall-prevention function based on estimation of user state. In: *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006*. [S.l.]: IEEE, 2006. v. 2006, n. May, p. 3498–3503. ISBN 0-7803-9505-0. ISSN 10504729.
- HONDA, H.; SHIMIZU, Y.; RUTTER, M. No effect of MMR withdrawal on the incidence of autism: A total population study. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, v. 46, n. 6, p. 572–579, 2005. ISSN 00219630.
- INGERSOLL, B. Brief report: Effect of a focused imitation intervention on social functioning in children with autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, v. 42, n. 8, p. 1768–1773, 2012. ISSN 01623257.
- KAMATA, M.; SHINO, M. MOBILITY DEVICES FOR THE ELDERLY: – “Silver Vehicle” Feasibility–. *IATSS Research*, Tokyo, v. 30, n. 1, p. 52–59, 2006. ISSN 0386-1112.
- KIKUCHI, T. et al. Basic study on gait rehabilitation system with intelligently controllable walker (i-Walker). *2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2010*, p. 277–282, 2010.
- KIM, E. S. et al. 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, 2013. ISSN 01623257.
- KLIN, A. Autismo e síndrome de Asperger: uma visão geral. *Revista Brasileira de Psiquiatria*, v. 28, n. SUPPL. 1, p. s3–s11, may 2006. ISSN 1516-4446.
- KNAPP, E. L. *Nonverbal Communication in Human Interaction*. [S.l.: s.n.], 1978. v. 5. 496 p. ISBN 9780495568698.
- KOZIMA, H.; MICHALOWSKI, M. P.; NAKAGAWA, C. Keepon: A playful robot for research, therapy, and entertainment. *International Journal of Social Robotics*, v. 1, n. 1, p. 3–18, jan 2009. ISSN 18754791.
- KRASNY-PACINI, A. et al. Goal Attainment Scaling in rehabilitation: A literature-based update. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, Elsevier Masson SAS, v. 56, n. 3, p. 212–230, 2013. ISSN 18770657.
- KULYUKIN, V. et al. IWalker: Toward a rollator-mounted wayfinding system for the elderly. *2008 IEEE International Conference on RFID (Frequency Identification), IEEE RFID 2008*, Ieee, v. 60, n. 3, p. 303–311, apr 2008. ISSN 09218890.
- LACEY, G.; DAWSON-HOWE, K. M.; VERNON, D. *Personal Adaptive Mobility Aid for the Infirm and Elderly Blind*. [S.l.], 1998. v. 1458, 211–220 p.
- LEE, G.; OHNUMA, T.; CHONG, N. Y. Design and control of JAIST active robotic walker. *Intelligent Service Robotics*, v. 3, n. 3, p. 125–135, jul 2010. ISSN 1861-2776.

- LEWIS, J. R.; SAURO, J. The factor structure of the system usability scale. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, v. 5619 LNCS, p. 94–103, 2009. ISSN 03029743.
- LORD, C. et al. Autism Spectrum Disorders. *Neuron*, v. 28, n. 2, p. 355–363, nov 2000. ISSN 08966273.
- LOTERIO, F. A. et al. Assessment of applicability of robotic walker for post-stroke hemiparetic individuals through muscle pattern analysis. In: *5th ISSNIP-IEEE Biosignals and Biorobotics Conference (2014): Biosignals and Robotics for Better and Safer Living (BRC)*. Salvador: IEEE, 2014. p. 1–5. ISBN 978-1-4799-5689-0. ISSN 23267844.
- MACNAMARA, S.; LACEY, G. A smart walker for the frail visually impaired. In: *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 2, p. 1354–1359. ISBN 0-7803-5886-4. ISSN 1050-4729.
- MARTINS, M. M. et al. Assistive mobility devices focusing on Smart Walkers: Classification and review. *Robotics and Autonomous Systems*, Elsevier B.V., v. 60, n. 4, p. 548–562, apr 2012. ISSN 09218890.
- MATSUMOTO, Y.; INO, T.; OGASAWARA, T. Development of intelligent wheelchair system with face and gaze based interface. *Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, p. 262–267, 2001.
- MICHAUD, F.; CLAVET, A. RoboToy Contest – Designing Mobile Robotic Toys for Autistic Children. *Artificial Intelligence*, p. 1–4, 2001.
- MICHAUD, F.; DUQUETTE, A.; NADEAU, I. Characteristics of mobile robotic toys for children with pervasive developmental disorders. In: *SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme - System Security and Assurance (Cat. No.03CH37483)*. [S.l.]: IEEE, 2003. v. 3, n. April 2016, p. 2938–2943. ISBN 0-7803-7952-7. ISSN 08843627.
- MIN, J.-W. M. J.-W. et al. Human-friendly interfaces of wheelchair robotic system for handicapped persons. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, v. 2, n. October, p. 1505–1510, 2002.
- MORRIS, A. et al. A robotic walker that provides guidance. In: *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*. [S.l.]: IEEE, 2003. v. 1, p. 25–30. ISBN 0-7803-7736-2. ISSN 1050-4729.
- Noris, S; Pare, JR Starky, S. Childhood Autism in Canada. *Canada Library of Parliament*, PRB 05-93E, n. January, 2006.
- PARON-WILDES, A. J. Sensory Stimulation and Autistic Children. *Implications*, v. 06, n. 04, p. 1–5, 2005.
- ROBERTI, F. et al. Control Estable de Formación Basado en Visión Omnidireccional para Robots Móviles No Holonómicos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, v. 8, n. 1, p. 29–37, jan 2011. ISSN 16977912.

ROBINS, B.; DAUTENHAHN, K. Tactile Interactions with a Humanoid Robot: Novel Play Scenario Implementations with Children with Autism. *International Journal of Social Robotics*, v. 6, n. 3, p. 397–415, 2014. ISSN 18754805.

ROBINS, B. et al. Effects of Repeated Exposure to a Humanoid Robot on Children with Autism. In: *Designing a More Inclusive World*. London: Springer London, 2004. p. 225–236. Disponível em: <[ROBINS, B.; DAUTENHAHN, K.; DICKERSON, P. From isolation to communication: A case study evaluation of robot assisted play for children with autism with a minimally expressive humanoid robot. *Proceedings of the 2nd International Conferences on Advances in Computer-Human Interactions, ACHI 2009*, n. May 2016, p. 205–211, 2009.](http://link.springer.com/10.1007/978-0-85729-372-5{_}.></p></div><div data-bbox=)

ROBINS, B.; DAUTENHAHN, K.; DUBOWSKI, J. Does appearance matter in the interaction of children with autism with a humanoid robot? *Interaction Studies*, v. 7, n. 3, p. 509–542, 2006. ISSN 15720373.

RODRIGUEZ, C. et al. Metodologia para Obtenção de Comandos de Navegação de um Andador Robótico Através de Sensores de Força e Laser. *XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), 2013*, p. 1–6, 2013.

RODRIGUEZ-LOSADA, D. A Smart Walker for the Blind. *Robotics & automation Magazine*, v. 15, n. December, p. 75–83, 2008.

RODRIGUEZ-LOSADA, D. et al. Implementing map based navigation in guido, the robotic SmartWalker. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, v. 2005, n. April, p. 3390–3395, 2005. ISSN 10504729.

RUTTER, M. Aetiology of autism: Findings and questions. *Journal of Intellectual Disability Research*, v. 49, n. 4, p. 231–238, 2005. ISSN 09642633.

SALCEDO, C. M.; de Jesus Cerqueira, J.; LIMA, A. M. N. Sistema Visual para Interação Humano-Máquina. In: *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. Fortaleza: [s.n.], 2013.

SALTER, T.; DAUTENHAHN, K.; Te Boekhorst, R. Learning about natural human-robot interaction styles. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 54, n. 2, p. 127–134, 2006. ISSN 09218890.

SCASSELLATI, B.; HENNY, A.; MATARIĆ, M. Robots for Use in Autism Research. *Annual Review of Biomedical Engineering*, v. 14, n. 1, p. 275–294, aug 2012. ISSN 1523-9829.

SCHAEFER, M. et al. Effects of different viewing perspectives on somatosensory activations during observation of touch. *Human Brain Mapping*, v. 30, n. 9, p. 2722–2730, 2009. ISSN 10659471. Disponível em: <<http://hell.meiert.org/core/pdf/sus.pdf>>.

Schneider Junior, V. et al. Detecção de pernas utilizando um sensor de varredura laser aplicado a um andador robótico v. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. *Congresso Brasileiro de Automática*. Campina Grande, 2012. p. 1364–1370. ISBN 9788580010695.

SHAMSUDDIN, S. et al. Initial Response in HRI- a Case Study on Evaluation of Child with Autism Spectrum Disorders Interacting with a Humanoid Robot NAO. *Procedia Engineering*, v. 41, n. Iris, p. 1448–1455, 2012. ISSN 18777058.

SICK. *Technical Documentation LMS200/211/221/291 Laser Measurement Systems*. Reute: [s.n.], 2006. 1–48 p. Disponível em: <www.sick.com>.

SIMUT, R. E. et al. Children with Autism Spectrum Disorders Make a Fruit Salad with Probo, the Social Robot: An Interaction Study. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, Springer US, v. 46, n. 1, p. 113–126, 2016. ISSN 15733432.

The National Autistic Society. *The National Autistic Society*. 2015. Disponível em: <www.autism.org.uk/communicate>.

TURNER-STOKES, L. Goal attainment scaling (GAS) in rehabilitation: a practical guide. *Clinical rehabilitation*, v. 23, n. 4, p. 362–70, 2009. ISSN 0269-2155.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, P. D. *World Population Ageing*. [S.l.], 2013. 114 p.

VALADÃO, C. et al. A New Controller for a Smart Walker Based on Human-Robot Formation. *Sensors*, v. 16, n. 7, p. 1116, jul 2016. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/16/7/1116>>.

Van Hook, F. W.; DEMONBREUN, D.; WEISS, B. D. Ambulatory devices for chronic gait disorders in the elderly. *American Family Physician*, v. 67, n. 8, p. 1717–1724, apr 2003. ISSN 0002838X.

WADA, K. et al. Effects of robot-assisted activity for elderly people and nurses at a day service center. In: *Proceedings of the IEEE*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 92, n. 11, p. 1780–1788. ISBN 0-7803-7272-7. ISSN 00189219.

WAINER, J. et al. Using the humanoid robot KASPAR to autonomously play triadic games and facilitate collaborative play among children with autism. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, v. 6, n. 3, p. 183–199, 2014. ISSN 19430604.

Apêndices

APÊNDICE A – Adaptação do Andador

Este apêndice mostra a adaptação do andador convencional de quatro patas para uma estrutura adaptável ao andador (Figura 81).

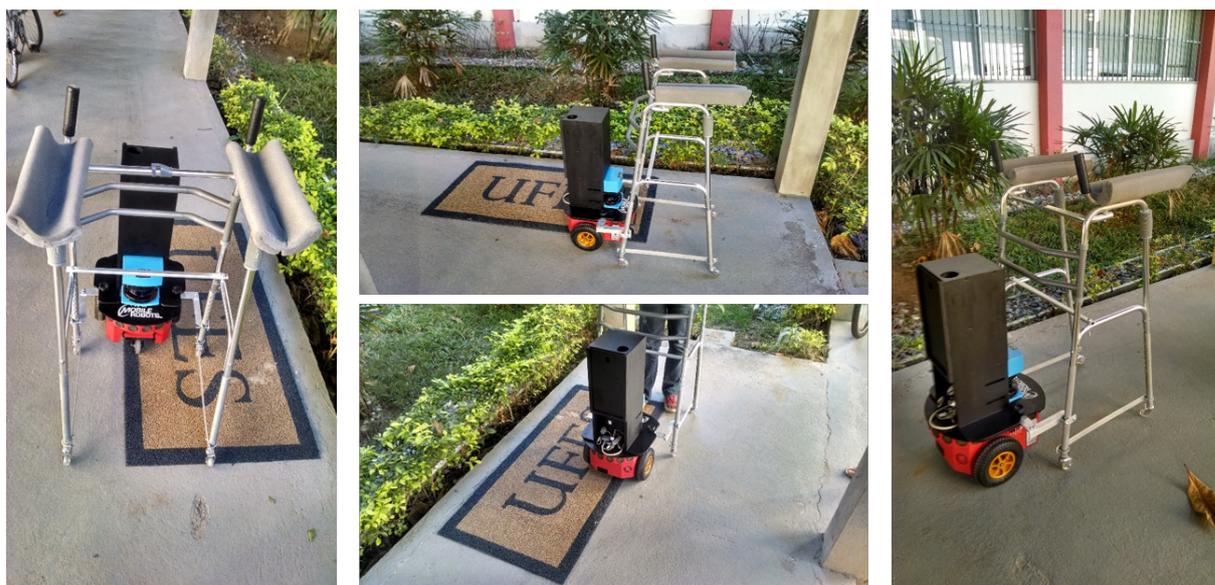


Figura 81 – Diferentes vistas do andador.

Anexos

ANEXO A – Comitê de Ética (Andador)



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA DO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE

Vitória-ES, 09 de dezembro de 2010.

Da: Profa. Dr^a. Ethel Leonor Noia Maciel
Coordenadora do Comitê de Ética em Pesquisa do Centro de Ciências da Saúde

Para: Prof. (a) Teodiano Freire Bastos Filho
Pesquisador (a) Responsável pelo Projeto de Pesquisa intitulado: **“Sistema de avaliação motora baseado em sensores inerciais e bioelétricos”**.

Senhor (a) Pesquisador (a),

Informamos a Vossa Senhoria, que o Comitê de Ética em Pesquisa do Centro de Ciências da Saúde da Universidade Federal do Espírito Santo, após analisar o Projeto de Pesquisa nº. 214/10 intitulado: **“Sistema de avaliação motora baseado em sensores inerciais e bioelétricos”** e o **Termo de Consentimento Livre e Esclarecido**, cumprindo os procedimentos internos desta Instituição, bem como as exigências das Resoluções 196 de 10.10.96, 251 de 07.08.97 e 292 de 08.07.99, **APROVOU** o referido projeto, em Reunião Ordinária realizada em 27 de outubro de 2010.

Gostaríamos de lembrar que cabe ao pesquisador responsável elaborar e apresentar os relatórios parciais e finais de acordo com a resolução do Conselho Nacional de Saúde nº 196 de 10/10/96, inciso IX.2. letra “c”.

Atenciosamente,

Prof^a Dr^a Ethel Leonor Noia Maciel
COORDENADORA
Comitê de Ética em Pesquisa
Centro de Ciências da Saúde/UFES

Comitê de Ética em Pesquisa do Centro de Ciências da Saúde
Av. Marechal Campos, 1468 – Maruípe – Vitória – ES – CEP 29.040-091.
Telefax: (27) 3335 7504

ANEXO B – Comitê de Ética (Interação Social)

CENTRO DE CIÊNCIAS DA
SAÚDE/UFES



PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: ESTUDO DE SINAIS DE EEG DE CRIANÇAS COM TRANSTORNO DO ESPECTRO DO AUTISMO E SUA INTERAÇÃO COM ROBÔ MÓVEL

Pesquisador: Christiane Mara Goulart

Área Temática:

Versão: 2

CAAE: 44191914.0.0000.5060

Instituição Proponente: Centro de Ciências da Saúde

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 1.101.769

Data da Relatoria: 27/05/2015

Apresentação do Projeto:

Projeto de Mestrado irá realizar uma pesquisa observacional com delineamento transversal, cujo objetivo é avaliar sinais cerebrais por eletroencefalografia de crianças com Transtorno do Espectro do Autismo (TEA) para o estudo do reconhecimento de estados emocionais e mentais, além de avaliar a interação de tais crianças com um robô móvel. População alvo: crianças com Transtorno do Espectro do Autismo (TEA), oriundas da Associação dos Amigos dos Autistas do Espírito Santo (AMAES), e crianças com típico desenvolvimento (TD), matriculadas na Escola Municipal de Ensino Fundamental Experimental de Vitória - UFES (EMEF-UFES). Amostra aleatória composta por 2 grupos de crianças. O primeiro será um grupo composto por 7 crianças com TEA e o outro, por 8 crianças com TD, para análise de comparação

Objetivo da Pesquisa:

Detectar sinais cerebrais de crianças com TEA e com típico desenvolvimento (TD), utilizando EEG, a fim de reconhecer seus estados emocionais frente a estímulos visuais e avaliar seus estados mentais durante a interação com um robô móvel. Além disso, será analisada a interação da criança com o robô móvel.

Endereço: Av. Marechal Campos 1468

Bairro: S/N

CEP: 29.040-091

UF: ES

Município: VITORIA

Telefone: (27)3335-7211

E-mail: cep@ccs.ufes.br

CENTRO DE CIÊNCIAS DA
SAÚDE/UFES

Continuação do Parecer: 1.101.769

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Riscos: Psicológicos: Os estímulos visuais podem causar modificações transitórias no estado emocional do participante. A imagem lúdica do robô pode não agradar a criança, desencadeando emoções negativas, como medo. Diante disso, todos os procedimentos experimentais serão acompanhados por um profissional de Psicologia. Físicos: O aparelho de coleta de sinais eletroencefalográfico funciona de modo não invasivo e indolor, porém pode ser que a sua utilização cause um leve desconforto. Com relação ao robô móvel, se manuseado de forma imprópria pela criança, pode ocasionar leves

escoriações na pele. Para evitar tal risco, a criança será acompanhada durante todo o procedimento experimental pelos pesquisadores, um profissional da psicologia e seus responsáveis legais. Além disso, o robô possuirá imagem lúdica composta por materiais leves e maleáveis, como papelão, cartolinas e Espuma Vinílica Acetinada (EVA), se movimentará devagar e conterà dispositivos que garantam a integridade física da criança, como o laser, que proporcionará uma distância mínima da criança, e o botão de segurança, que assegurará sua parada imediata, se necessário.

Benefícios:

Auxílio à compreensão de estados emocionais e mentais de crianças com TEA. Estímulo das habilidades cognitivas e de interação social da criança com TEA através da robótica móvel, para que desenvolva um comportamento socialmente aceitável. Como um trabalho de pós-graduação, a contribuição é acrescentar aos meios científico e acadêmico um estudo de sinais cerebrais de crianças com TEA, através de EEG, uma vez que são poucas as pesquisas existentes nessa área.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

Pesquisa relevante, apresenta metodologia bem descrita.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Folha de rosto- assinada pela pesquisadora e pelo Reitor da UFES

Autorização apresentada da Secretaria de Educação de Vitória.

Autorização anexada da AMAES

Cronograma - apresentado com início da coleta de dados em junho 2015

Orçamento OK

TCLE - apresentado com as adequações sugeridas.

Recomendações:

Todos os projetos de pesquisa devem seguir a Res. CNS 466/2012

Endereço: Av. Marechal Campos 1468**Bairro:** S/N**CEP:** 29.040-091**UF:** ES**Município:** VITORIA**Telefone:** (27)3335-7211**E-mail:** cep@ccs.ufes.br

CENTRO DE CIÊNCIAS DA
SAÚDE/UFES



Continuação do Parecer: 1.101.769

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

Não existem pendências

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

Considerações Finais a critério do CEP:

VITORIA, 10 de Junho de 2015

Assinado por:
Cynthia Furst Leroy Gomes Bueloni
(Coordenador)

Endereço: Av. Marechal Campos 1468

Bairro: S/N

CEP: 29.040-091

UF: ES

Município: VITORIA

Telefone: (27)3335-7211

E-mail: cep@ccs.ufes.br