

Arquitetura de Controle Inteligente para Interação entre Humanos e Robôs

Silas F. R. Alves, Ivan N. Silva, Humberto Ferasoli Filho

Abstract— Due to constant price reduction and miniaturization of the devices that compose a mobile robot, mobile robotics has become increasingly accessible for the public, and it is reasonable to assume that in the near future robots will be "living" among us. To create robots capable of living in human society, various disciplines have contributed to theoretical and technological frameworks, of which two stand out: Control Architectures and Human-Robot Interaction. This paper presents a work in progress that proposes an intelligent control architecture inspired by natural models, whose main purpose is to allow the robot to interact with people intuitively and to motivate collaboration between people and robots.

Resumo— Graças ao constante barateamento e miniaturização dos dispositivos que compõe um robô móvel, a robótica móvel vem ficando cada vez mais acessível para o público geral, e é razoável supor que num futuro próximo os robôs estarão "vivendo" entre nós. Para criar robôs capazes de conviver na sociedade humana, várias disciplinas têm contribuído com fundamentos teóricos e tecnológicos, das quais duas se destacam: as Arquiteturas de Controle e a Interação Humano-Robô. Este artigo apresenta um trabalho em andamento que propõe uma arquitetura de controle inteligente inspirada em modelos naturais cujo objetivo principal é permitir que o robô interaja com as pessoas de forma intuitiva e que motive a colaboração entre pessoas e robôs.

I. INTRODUÇÃO

Graças ao constante barateamento e miniaturização dos dispositivos que compõe um robô, a robótica móvel – campo que estuda os robôs capazes de se mover livremente pelo ambiente, diferente dos braços robóticos – vem ficando cada vez mais acessível para o público geral. De fato, algumas universidades possuem hoje alguma disciplina relacionada à robótica em sua grade curricular, pois há várias empresas que fornecem robôs voltados para a educação e pesquisa. Mesmo escolas de Ensino Fundamental e Médio começam a fazer uso da robótica na sala de aula. Para o mercado doméstico, já se é possível adquirir robôs móveis comerciais capazes de realizar algumas tarefas corriqueiras, como aspirar pó, aparar grama, limpar piscinas e lavar janelas de forma autônoma e

segura. A medicina também tem aplicado com sucesso a robótica em exercícios de reabilitação [1], [2], para a interação com crianças autistas [3], inclusão social para crianças com deficiências motoras severas [4], e robôs de companhia para auxiliar pessoas com deficiência [5].

Visto o potencial da aplicação da robótica em diferentes áreas, é razoável supor que num futuro próximo os robôs estarão "vivendo" entre nós. Esta "coexistência" já é celebrada há décadas pela ficção científica, mas a ciência de fato tem mostrado que o desenvolvimento de robôs com tamanha autonomia e inteligência ainda está longe de ser realidade. Isso se deve a diferentes razões, como a dificuldade em obter uma navegação robótica completamente segura, os desafios da comunicação entre pessoas e robôs, e o fato de que fornecer inteligência aos robôs é mais difícil do que se pensava [6]. Ainda assim, os robôs – e principalmente os robôs móveis – estão vagarosamente entrando em nossos lares, e esta é uma tendência certa de futuro [7].

Para tornar realidade o sonho da criação de robôs capazes de conviver na sociedade humana, várias disciplinas tem contribuído com fundamentos teóricos e tecnológicos. Sendo multidisciplinar, a robótica apropria-se do conhecimento tecnológico das engenharias para construir robôs inspirados nos modelos da biologia, psicologia, etologia, interação homem-computador, ciências cognitivas, dentre várias outras. Destas, duas áreas se destacam: as arquiteturas de controle, responsáveis por organizar e viabilizar o uso dos vários módulos bioinspirados atendendo os requisitos de projeto de sistemas da engenharia e computação; e a interação humano-robô (IHR), que estuda os mecanismos que o robô deve apresentar para que possa comunicar-se de forma engajadora, significativa e eficiente.

Dentre os vários desafios enfrentados pela robótica móvel no contexto da IHR, a concepção da arquitetura de controle do robô é de particular importância, pois é ela quem define e orquestra o funcionamento harmonioso dos diferentes – e, por vezes, contraditórios – módulos que compõem um sistema robótico, fornecendo alguma forma de inteligência ao robô. Neste sentido, motivado pela vasta aplicabilidade da robótica e da necessidade de arquiteturas de controle voltadas à IHR, este projeto de pesquisa propõe uma arquitetura de controle inteligente inspirada em modelos naturais cujo objetivo principal é permitir que o robô interaja com as pessoas de forma intuitiva e que motive a colaboração entre pessoas e robôs. Esta arquitetura deve permitir que o robô: se comunique com uma pessoa, ou usuário, receba comandos ou aprenda informações referentes a uma tarefa; navegue por um ambiente de forma segura para cumprir sua missão; e tome decisões mesmo sem a solicitação do usuário, imitando o comportamento de um animal.

*Pesquisa financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo - FAPESP sob processo de número 2012/12050-0.

Silas F. R. Alves é doutorando em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil (e-mail: silves@sc.usp.br).

Ivan N. da Silva é professor associado do Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil (e-mail: insilva@sc.usp.br).

Humberto Ferasoli Filho é professor assistente do Departamento de Computação, Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Bauri, SP, Brasil (e-mail: ferasoli@fc.unesp.br).

Este artigo apresenta o trabalho em andamento do projeto de doutorado intitulado “Arquitetura de Controle Inteligente para Interação entre Humanos e Robôs”. Na Seção II, é apresentado o método adotado, enquanto a Seção III descreve o robô Pomodoro desenvolvido para efetuar os experimentos. A arquitetura de controle proposta é apresentada na Seção IV, que traz, também, uma proposta preliminar para os experimentos de validação. A Seção V descreve os experimentos preliminares desenvolvidos para a avaliação da proposta. Finalmente, a Seção VI apresenta as conclusões, os trabalhos futuros e as considerações finais.

II. MÉTODO

O método utilizado para a execução deste projeto será composta de quatro módulos que comportarão toda a estrutura a ser desenvolvida. Estes módulos são especificados a seguir.

A. Módulo 1. Preparação do Ambiente

Um sistema robótico móvel para interação com seres humanos é complexo, pois requer de uma variedade de tecnologias diferentes para que se estabeleça o trabalho conjunto. Neste sentido, este módulo compreende o estudo das tecnologias de comunicação que comporão a interface humano-robô; das técnicas de navegação que permitirão o robô se deslocar pelo ambiente; dos robôs móveis que serão empregados para os experimentos; e das possíveis adequações no ambiente de teste para os robôs móveis. Finalmente, o conjunto de tecnologias adotadas comporá o ambiente de experimentação para a arquitetura de controle proposta.

B. Módulo 2. Planejamento da Arquitetura de Controle e Experimentos

Uma vez estabelecido o ambiente de experimentação, será elaborada a arquitetura de controle. Para este fim, serão estudadas as arquiteturas de controle encontradas na literatura. Baseado nos trabalhos de referência e na proposta do projeto, será então elaborada uma arquitetura de controle que propicie a colaboração entre robôs e humanos de forma engajadora. Este módulo também contempla o planejamento dos experimentos que validarão a referida arquitetura, ou seja, como ela pode ser utilizada para descrever o controle de um sistema robótico móvel real.

C. Módulo 3. Desenvolvimento da Arquitetura de Controle

Com a arquitetura de controle elaborada e os experimentos planejados, é iniciada a fase de desenvolvimento da arquitetura de controle. A implementação da arquitetura será realizada em um computador pessoal (PC) por meio de ferramentas de desenvolvimento de software convencionais. É importante salientar que além da preocupação em garantir que o formalismo da arquitetura de controle seja seguida pela implementação, há também o interesse de que a mesma implementação seja facilmente reaproveitada em futuros projetos. Portanto, o desenvolvimento da arquitetura de

controle envolve a modelagem do software e sua implementação.

D. Módulo 4. Ensaios Experimentais e Validação

Finalmente, serão desenvolvidos os experimentos com os componentes de software da arquitetura de controle. Os ensaios serão repetidos com várias configurações diferentes com o fim de avaliar se a arquitetura de controle proposta é capaz de alcançar os objetivos do robô. Além disso, será observada se a colaboração entre o humano e o robô móvel ocorre de forma satisfatória, ou seja, se o humano consegue compreender as intenções do robô e se o robô é capaz de perceber a intenção das pessoas.

III. ROBÔ POMODORO

Algumas das dificuldades enfrentadas no estudo da interação humano-robô são o custo e a experiência necessária para se trabalhar com robôs [8]. Os robôs capacitados para IHR são caros e requerem mão-de-obra especializada, e muitos pesquisadores, principalmente das áreas das ciências cognitivas e interfaces humano-computador, não possuem acesso a eles [6].

Visando fornecer uma plataforma robótica experimental de baixo custo e fácil acesso para o público da HRI, foi desenvolvido um robô de baixo custo, fácil replicação e alta flexibilidade, batizado de Pomodoro. Inspirado por trabalhos anteriores sobre o entretenimento de crianças com deficiência motoras severas desenvolvidos em conjunto com a Universidade Estadual Paulista (Unesp) e a Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes) [9], [10], uma das propostas do robô Pomodoro é se prestar como robô de entretenimento para o público infantil e, portanto, seu projeto considerou alguns aspectos do projeto que tratam das dimensões e forma física apropriadas, as cores e texturas, os materiais, as características de comunicação, o comportamento e assim por diante.

Levando em conta a aplicação para a pesquisa em IHR e para o entretenimento infantil, os requisitos para o projeto do robô são:

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

processamento externo, mas deve apresentar meios para acessar uma base computacional externa quando necessário.

Estes requisitos levaram ao desenvolvimento do robô mostrado pela Figura 1. Suas cores são vivas, para chamar a atenção de usuários infantis, e seu corpo é desenhado com formas arredondadas, que proporcionam uma visão agradável do robô ao mesmo tempo em que evita quinas que podem colocar em risco o usuário. Seu corpo é montado por peças acrílicas planas, que podem ser substituídas por outros materiais, caso necessário, e não requerem maquinário complexo para replicação.



Figura 1. Robô Pomodoro.

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

TABELA I. SENSORES E ATUADORES DO ROBÔ POMODORO.

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

Finalmente, o robô adotou o sistema de tração diferencial, que tem as vantagens de ser fácil de implementar mecanicamente e simples de modelar, mas cujo controle – principalmente para seguir uma linha reta – não é tão trivial [11].

O hardware do robô, mostrado na Figura 2, é composto por dois módulos separados: um hardware integrado, com o circuito para ativar os motores e leitura de sensores, e um smartphone, que irá implementar a arquitetura de controle. O hardware embarcado implementa um sistema supervisor

responsável por: ler oito sensores infravermelhos (IV) reflexivos, utilizados para prevenir acidentes, como quedas, ou detectar a refletância do solo; um sensor de distância infravermelho, usado para detectar obstáculos; ler o nível da bateria; ativar dois motores de corrente contínua (CC) ligados às rodas; e acionar dois servo motores padrão, que estão ligados a um mecanismo que permite que o robô para alterar a inclinação e direção de um suporte que será usado para fixar um telefone celular. O supervisor não é autônomo; ele recebe comandos de uma base computacional através de uma ligação Bluetooth. Neste caso, a base será um smartphone que será embarcado no robô.

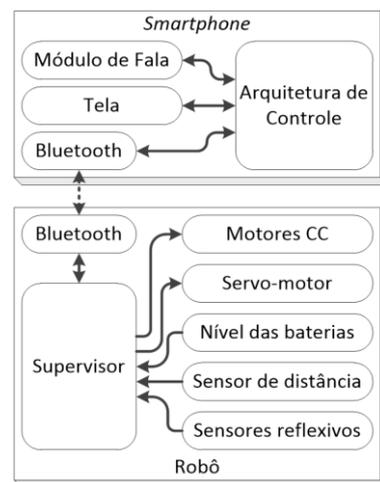


Figura 2. Arquitetura de hardware do robô Pomodoro.

Originalmente criado para ser usado como assistentes pessoais avançados, os smartphones aumentou sua relevância no mercado, expandiu suas funcionalidades, melhorou sua conectividade e eficiência energética, e teve seu custo reduzido. Em geral, os smartphones embarcam um conjunto mínimo de dispositivos e interfaces que podem ser utilizados para a robótica, tais como: unidade de processamento; tela sensível ao toque; câmera; acelerômetro e giroscópio; áudio; e comunicação sem-fio. Por fornecer tais dispositivos, e também pelo baixo custo, o smartphone implementará a arquitetura de controle e será, portanto, responsável pelo acionamento do robô. Além disso, o usuário será capaz de verificar o estado robô através das “faces” exibidas na tela e dos sons emitidos pelos alto-falantes. O usuário também será capaz de interagir com o robô através de toques na tela. A câmera robô será utilizada para reconhecer objetos e a face do usuário, enquanto o acelerômetro será usado para auxiliar na navegação.

IV. ARQUITETURA DE CONTROLE INTELIGENTE

A arquitetura de controle fornece um método formal para a organização de um sistema de controle, impondo-lhe regras e restrições [12], determina como se dá o fluxo de informação dentro de um sistema robótico móvel [13].

A arquitetura proposta por este trabalho pode ser entendida sob dois pontos de vistas diferentes. O *ponto de vista operacional* organiza a arquitetura de acordo com a hierarquia de hardware dos vários dispositivos que compõem

o sistema robótico móvel. Ele determina a relação espacial entre os vários módulos, ou seja, em qual dispositivo cada módulo é executado. Por outro lado, o *ponto de vista lógico* se preocupa em determinar como se dá o fluxo de informação independente da relação espacial entre eles, ou seja, sem levar em conta qual o dispositivo que implementa dado módulo.

A. Ponto de Vista Operacional

Conforme pode ser visto pela Figura 3, existem três dispositivos, ou conjunto de dispositivos, que compõe a arquitetura; são eles: supervisor, computador e nuvem. No nível mais baixo da hierarquia está o supervisor, correspondente, no caso deste trabalho, ao hardware do robô Pomodoro. O supervisor, além de fornecer a leitura sensorial e o acionamento de atuadores, deve apresentar uma camada de segurança, que impeça que o robô tome algumas ações que o coloquem claramente em risco. Exemplos disso são situações nas quais o robô se encontra na iminência da queda – seus sensores de solo o permitem detectar que há um buraco em frente às suas rodas – ou de uma colisão – quando seus sensores de proximidade identificam um obstáculo. Tais ações preventivas devem ser tomadas pelo supervisor, pois no caso dos níveis mais altos falharem ou deixarem de responder, o robô ainda será, no mínimo, capaz de preservar sua integridade física.

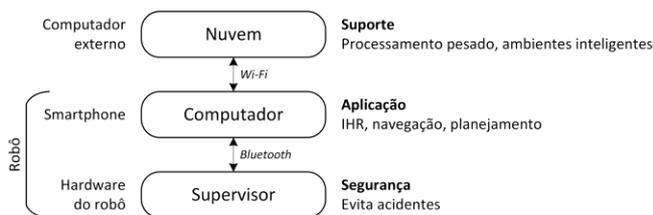


Figura 3. Arquitetura de controle do robô Pomodoro sob o ponto de vista operacional.

No nível intermediário, encontra-se o computador embarcado, responsável por implementar os algoritmos de tomada de decisão do robô móvel. No caso do robô Pomodoro, ele consiste em um smartphone comunicando-se com o supervisor via Bluetooth. O computador embarcado possui capacidade de processamento superior comparado ao supervisor, implementando conseqüentemente algoritmos mais sofisticados de controle relativos à aplicação do sistema, envolvendo, por exemplo, problemas de interação humano-robô, navegação e planejamento de rotas, por exemplo.

Idealmente, o robô móvel é capaz de realizar suas tarefas apenas com as duas camadas inferiores, computador embarcado e supervisor. Contudo, pode haver situações em que a disponibilidade de um sistema computacional externo pode aumentar o desempenho da tarefa, fornecendo maior poder computacional, ou até mesmo permitir o cumprimento da tarefa, quando possui um dado crucial desconhecido pelo robô. Representando estes sistemas computacionais externos, está a camada nuvem, que oferecem suporte ao robô para o processamento pesado e busca em bancos de dados maiores (como, por exemplo, *big data*) através de uma rede sem fio Wi-Fi. Além disso, a nuvem fomenta a criação de ambientes

inteligentes, pois possui as ferramentas necessárias para difundir as informações a respeito do robô e do ambiente.

A principal motivação em observar a arquitetura de controle sob o ponto de vista operacional é identificar os possíveis gargalos de comunicação que possam comprometer a robustez do sistema robótico, permitindo a proposição de um sistema tolerante a falhas.

B. Ponto de Vista Lógico

O ponto de vista lógico preocupa-se exclusivamente com o fluxo de informação, dando pouca atenção às questões estruturais do hardware do sistema. Para permitir uma interação rica e significativa orientada à solução de um problema, a arquitetura de controle necessita de meios que permitam sua autonomia, o trabalho em equipe, a comunicação com outros agentes – humanos ou não –, e o aprendizado. Ao mesmo tempo, a arquitetura deve fornecer os algoritmos que solucionam os demais desafios da robótica. No intuito de atender a estes problemas e desafios, este projeto propõe uma arquitetura de controle híbrida bioinspirada, composta tanto por elementos deliberativos quanto reativos que imitam os mecanismos encontrados nos animais, para fornecer inteligência – ainda que limitada – ao robô. Conforme mostra a Figura 4, a arquitetura contempla: módulos de memória, voltados à aprendizagem; os componentes sensoriais e de atuação, bem como as camadas do planejador, arbitrador e comportamentais da arquitetura híbrida de três camadas; e um sistema motivacional que, junto às três camadas da arquitetura híbrida, fornece autonomia ao robô móvel.

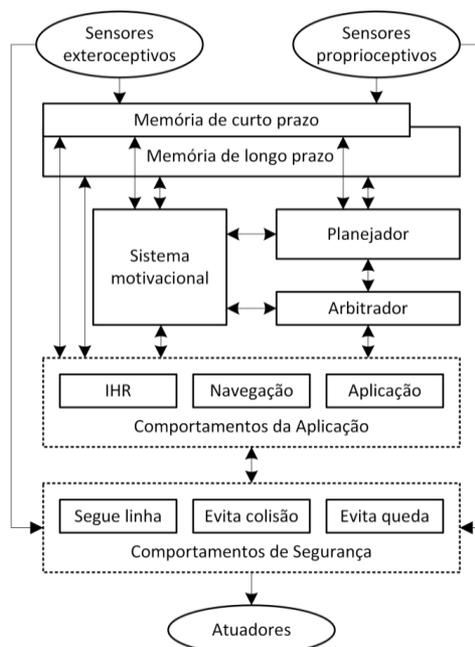


Figura 4. Arquitetura de controle do robô sob o ponto de vista lógico.

Os principais módulos que compõem a arquitetura de controle inteligente proposta são descritos em mais detalhes em seqüência:

Memórias de curto e longo prazo: Apesar de não haver um consenso sobre como a memória humana funciona e é

organizada, a ideia da existência de uma memória de curto prazo e outra de longo prazo é bem difundida por pesquisas da Psicologia [14]. Na robótica, esta organização de memória tem sido usada como suporte ao aprendizado robótico [15]–[17], o que motivou sua adoção na arquitetura proposta. Em geral, nos sistemas biológicos, a memória de curto prazo é uma memória de baixa capacidade que mantém apenas ideias recentes, ou em constante repetição, na consciência, enquanto a memória de longo prazo refere-se a um mecanismo praticamente permanente de armazenamento de informação [14]. Na robótica, a memória de curto prazo geralmente é utilizada para caracterizar a “atenção” do robô e armazena dados relativos a tarefa em execução e o estado corrente do robô, enquanto a memória de longo prazo, implementada por uma tabela ou banco de dados, fornece as informações a respeito da tarefa. Portanto, ela serve aos demais módulos como um repositório de dados de experiências sensoriais, estados, e conhecimento, fornecendo informações quando requisitada e armazenando, ou aprendendo, novas informações.

Sistema motivacional: No caso de sistemas autônomos tradicionais, seu funcionamento é esperado apenas durante a realização da tarefa. Porém, quando se trata de robôs que irão interagir e conviver com humanos, a capacidade de operar mesmo quando não há nenhuma tarefa a ser realizada, ou de modificar o foco da tarefa para se ajustar aos fatores humanos, pode ser uma característica desejada que aumente o conforto humano frente a máquina. De forma geral, o sistema motivacional pode ser modelado baseado em emoções [18] ou necessidades [15]. Na arquitetura proposta, este módulo pretende fornecer ao robô a habilidade de adaptar seu comportamento de acordo seu estado interno e do ambiente modificando como a tarefa será executada, ou para acionar comportamentos quando não estiver trabalhando. Por esta razão, o sistema motivacional comunica-se com as memórias, o planejador, o arbitrador e os vários comportamentos do robô.

Planejador: Dentro de uma arquitetura híbrida, o planejador é responsável por criar planos ótimos para a realização de determinada tarefa [19]. Nesta arquitetura, o planejador estará relacionado tanto à realização da tarefa quanto ao aprendizado, levando em conta o estado do sistema motivacional, recebendo os estímulos sensoriais da memória de curto prazo e alimentando-a com informações a respeito da tarefa, e acessando a memória de longo prazo para salvar relatórios de tarefas e informações aprendidas.

Arbitrador: A camada de arbitração, ou arbitrador, é utilizada para acionar os comportamentos corretos enquanto o planejador delibera sobre a tarefa, ou decidir qual comando o robô deve executar quando o planejador e os comportamentos fornecerem comandos contraditórios. Para auxiliar o processo de arbitração, tanto as memórias de longo e curto prazo quanto o sistema motivacional são utilizados.

Comportamentos da aplicação e de segurança: Na arquitetura proposta, a camada reativa é baseada no paradigma comportamental e é dividida em duas subcamadas: de aplicação, implementada no computador embarcado, e de segurança, implementada no supervisor. A camada de aplicação fornece os comportamentos utilizados

para: IHR, como o olhar social e comunicação proxêmica, dentre outros; navegação, fornecendo técnicas básicas de movimentação segura no ambiente; e os comportamentos voltados à aplicação. Já a camada de segurança é responsável por implementar comportamentos simples que garantam a integridade do robô, mesmo quando as camadas superiores falham gravemente. Por esta razão, a subcamada de segurança tem prioridade de acionamento e implementa comportamentos como: *segue linha*, que mantém o robô se movendo sobre uma linha que o leva à um ponto de recarga, por exemplo; *evita colisão*, que utiliza os sensores de proximidade para evitar que o robô colida contra algum obstáculo; e *evita queda*, que através dos sensores de solo determina se o robô está na iminência de uma queda ou não. A camada comportamental poderá utilizar o paradigma da arquitetura de subsunção [20] ou dos esquemas motores [16]. Uma característica desta arquitetura é que apesar da subcamada de segurança ter prioridade sobre as demais, o arbitrador pode inibir seu funcionamento caso necessário, como é o caso quando o robô precisa empurrar um objeto: para ser capaz de exercer força física sobre o objeto, o robô precisa tocá-lo, ou seja, colidir com o objeto, logo o comportamento *evita colisão* precisa ser inibido.

Esta descrição da arquitetura, entretanto, tem caráter inicial. Dada a grande extensão da área de IHR, alguns módulos podem sofrer modificações no decorrer do projeto, principalmente no que toca o ponto de vista lógico.

C. Validação Experimental

Para validar a arquitetura de controle inteligente, propõem-se alguns experimentos concebidos para avaliar todos os componentes da arquitetura de controle. A proposição de um experimento é particularmente importante, pois o projeto do robô móvel depende fortemente da tarefa que irá desenvolver. Neste sentido, propõe-se inicialmente um ambiente de experimental com as seguintes características (Tabela II):

TABELA II. CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE EXPERIMENTAL.

Característica	Descrição
Agentes	Uma pessoa e um robô Pomodoro
Ambiente	Uma mesa
Obstáculos estáticos	Barreiras (objetos que o robô não pode mover) e brinquedos (objetos que o robô pode mover)
Obstáculos dinâmicos	O usuário pode mover os obstáculos
Objetivo	Verificar se os agentes são capazes de colaborar para alcançar um objetivo comum

Apesar de simples, este ambiente possui propriedades interessantes. Uma vez que os experimentos são desenvolvidos sobre uma mesa, não é necessário um grande laboratório para efetuar os testes. Além disso, o pequeno tamanho facilita a adequação dos elementos existentes no ambiente, como os obstáculos, facilmente criados com caixas, e brinquedos, que podem ser objetos comuns.

Além das propriedades que facilitam estruturar os elementos físicos dos experimentos, o ambiente dá margem a uma série de experimentos envolvendo os desafios da IHR,

prestando-se então à validação da arquitetura proposta. Neste sentido, alguns cenários que podem ser ensaiados são:

Aprendizado por demonstração: Neste caso, o usuário pode mostrar alguns objetos (brinquedos) para o robô e ensinar algumas informações a respeito deste objeto. Este experimento requer do robô algoritmos de atenção e de aprendizado que o permitam extrair as características do objeto apresentado, associá-las às informações ditas pelo usuário, e armazená-las na memória de longo prazo. O interesse deste cenário é demonstrar que o robô é capaz de relacionar estímulos até então desconhecidos com fatos já conhecidos através da entrada do usuário, assim como ocorre com os seres humanos.

Aprendizado por experiência: Além de valer-se do auxílio do usuário para aprender dados a respeito de novos objetos, o robô pode, também, aprender por experiência própria algumas características dos objetos do seu mundo. Por exemplo, o robô pode aprender como é o mapa do ambiente, quais objetos ele pode mover, onde estão localizados objetos conhecidos e desconhecidos, dentre várias outras possibilidades.

Cumprir tarefas solicitadas: Neste caso, o usuário solicita que o robô realize alguma tarefa conhecida, como a identificação ou busca de um objeto previamente conhecido. O robô deve, então, autonomamente realizar esta tarefa. Este cenário serve para demonstrar as capacidades básicas do robô em receber ordens humanas e cumpri-las.

Atender impulsos: Para imitar um ser vivo, o robô deve estar continuamente em busca de um objetivo. Obviamente, o usuário pode solicitar que o robô cumpra algumas tarefas, conferindo-lhe um ou mais objetivos a serem cumpridos. Porém, pode haver situações nas quais o usuário não dê ordens ao robô por um período consideravelmente longo, deixando-o sem objetivos, e consequentemente estático, por tempo indeterminado. Para evitar isso, o robô deve possuir mecanismos que gerem necessidades a serem saciadas ou, em outras palavras, estabelecer objetivos por si só e então cumpri-los.

Tarefa colaborativa: Caso o robô não seja capaz de realizar a tarefa por si só – por exemplo, o objeto solicitado pelo usuário está em seu campo de visão, mas não ao seu alcance –, ele pode solicitar ajuda ao usuário – que, neste caso, pode pegar o objeto e colocá-lo num lugar que o robô possa alcançar. Este cenário é particularmente interessante, pois abre uma série de discussões a respeito de como o robô deve responder as diferentes variações do mesmo problema: como o robô pode exprimir suas necessidades ao usuário; quando é aceitável que o robô solicite ajuda a um ser humano; como o robô deve proceder, caso o usuário não lhe dê atenção; como determinar se o usuário age com o intuito de auxiliar ou prejudicar o robô; ou, ainda, como o robô pode identificar que o usuário precisa de ajuda, sem que este solicite explicitamente ajuda ao robô.

Nenhum dos três cenários é trivial, pois envolve mecanismos complexos que não são completamente (por vezes, nem ao menos superficialmente) entendidos pela Psicologia [14], e tampouco existem algoritmos capazes de replicá-los com igual precisão, desempenho ou eficiência

[19]. Por esta razão, algumas simplificações podem ser adotadas tanto para o ambiente quanto para os cenários de experimentos, no intuito de evitar que o trabalho se estenda para áreas afins que, apesar de serem importantes e necessárias para o sistema robótico, são utilizadas como *ferramentas*, e não como o fim da pesquisa. No intuito de resolver os problemas que muito possivelmente serão enfrentadas, propõe-se a aplicação das técnicas, métodos e tecnologias apresentadas na Tabela III.

TABELA III. TÉCNICAS E TECNOLOGIAS PROPOSTAS PARA RESOLUÇÃO DOS PROBLEMAS A SEREM ENFRENTADOS.

Problema	Técnicas ou tecnologias
Reconhecimento de face	Algoritmo de Viola-Jones, implementado pela biblioteca OpenCV
Reconhecimento de fala	Bibliotecas comerciais, como a Google Speech
Síntese de fala	Bibliotecas comerciais, como a Google Speech e Microsoft Speech
Interfaces homem-computador	Dispositivos comerciais, como o Nintendo Wii Remote, o Microsoft Kinect, IMUs desenvolvidos pela Ufes [21]
Reconhecimento de objetos	Reconhecimento de marcadores fiduciais anexados aos objetos, para simplificar o processamento de imagem; bibliotecas comerciais, como a LibKoki, ARtoolkit ou nyARtoolkit
Aprendizado supervisionado	Redes neurais artificiais (Perceptron-multicamadas), memórias associativas
Aprendizado não-supervisionado	Redes neurais artificiais (Adaptive Resonance Theory)
Aprendizado por experiência	Algoritmo Q-learning
Mapeamento	Mapas de grade de ocupação, mapas topológicos
Planejamento de caminhos	Campos potenciais, frente de onda, algoritmos de busca em grafos
Localização	Uso de marcadores fiduciais, casamento de modelos, ou sistema de visão global

No decorrer das próximas etapas, a arquitetura de controle será refinada, no intuito de especificar os algoritmos que implementam cada um dos módulos. Assim, espera-se que os experimentos acima expostos permitam a validação da arquitetura de controle.

V. EXPERIMENTOS PRELIMINARES

Durante a primeira etapa do desenvolvimento do projeto, alguns experimentos preliminares foram realizados com o intuito de avaliar a plataforma robótica desenvolvida e, também, fornecer ideias a respeito dos diferentes módulos que poderão constituir a arquitetura de controle.

Uma das características desejáveis no robô móvel é se comunicar com as pessoas usando os mesmos mecanismos que elas. O olhar social [19], [22] e a comunicação proxêmica [23], [24] são partes importantes da comunicação humana. No intuito de testar o projeto do robô Pomodoro, foram ensaiados ambos os mecanismos.

Por não considerar nenhum outro aspecto da IHR, o sistema é bem direto: primeiro, a imagem da câmera do smartphone é capturada; em seguida, as faces são detectadas usando o algoritmo de Viola-Jones [25] fornecido pela biblioteca OpenCV; caso não haja faces, o sistema encerra a

iteração e volta a esperar por uma nova imagem; caso seja detectada uma face, o algoritmo informa a posição (x, y) e largura e altura (l, h) da face aos controladores de *pan-tilt* e de tração; o controlador de *pan-tilt* aciona os servo-motores que fornecem a rotação do smartphone nos eixos X (*pan*) e Y (*tilt*) com o intuito de levar a face para o centro da imagem (c_x, c_y) ; o controlador de tração aciona os motores CC ligados às rodas para aproximar ou afastar o robô com o objetivo de manter a largura da face próxima de um valor de largura de referência l_r arbitrário; depois da atuação de ambos os controladores, a iteração se encerra e o sistema volta a esperar uma nova imagem. Este procedimento é mostrado pela Figura 5.

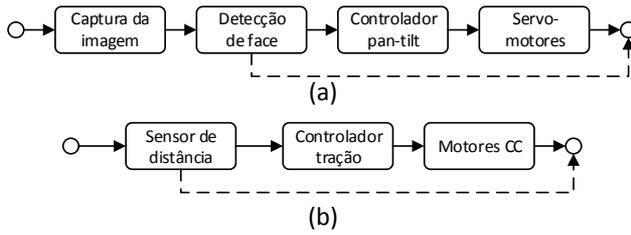


Figura 5. Estrutura básica dos controladores de olhar social (a) e comunicação proxêmica (b).

O controlador de *pan-tilt* consiste em um controlador proporcional que gera as variáveis de controle (u_0, u_1) , correspondente respectivamente aos sinais de acionamento dos servos-motores de *pan* e *tilt*, de forma a estabilizar em zero os erros de posição da face reconhecida na imagem nos eixos X e Y , dados respectivamente por $x_c - x$ e $y_c - y$. Este controlador é mostrado pelas equações (1) e (2). Além disso, toma-se o cuidado de garantir que (u_0, u_1) estejam definidos dentro do intervalo $[0, 8; 2, 2]$, que correspondem aos limites mínimo e máximo do sinal de controle do servo-motor.

$$u_0 = u_0 + K_{p,0} \cdot (x_c - x) \quad (1)$$

$$u_1 = u_1 + K_{p,1} \cdot (y_c - y) \quad (2)$$

De forma semelhante, o controlador de tração gera a variável de controle u_2 , correspondente ao sinal de acionamento dos motores CC, para estabilizar em zero a diferença entre a largura da face detectada e a largura de referência, dada por $l_r - l$. Para este fim, o controlador utiliza os dados de distância provenientes do sensor de distância infravermelho do robô Pomodoro. A equação (3) determina o controlador descrito.

$$u_2 = K_{p,2} \cdot (l_r - l) \quad (3)$$

O software foi escrito na linguagem Python e foi executado no computador remoto – ou na nuvem, se usada a topologia apresentada pela arquitetura de controle proposta na Seção IV.A. Neste momento, não houve a preocupação de

embarcar o software no celular, pois se trata apenas de um ensaio para validar o uso do olhar social e da comunicação proxêmica. Obviamente, quando estes módulos forem implantados na arquitetura de controle, eles serão devidamente convertidos e embutidos no software residente no celular.

Nos testes realizados, adotaram-se os valores $(3 \cdot 10^{-4}; 3 \cdot 10^{-4}; 10,5)$ para os ganhos $(K_{p,0}; K_{p,1}; K_{p,2})$. Conforme pode ser visto nos gráficos das Figuras 6 e 7, os controladores tiveram desempenho aceitável e foram capazes de rastrear a face e manter-se a uma dada distância do usuário.

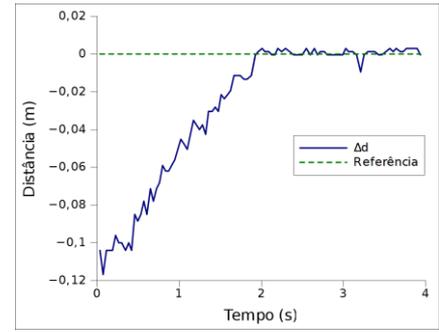


Figura 6. Variação do erro do controlador de comunicação proxêmica.

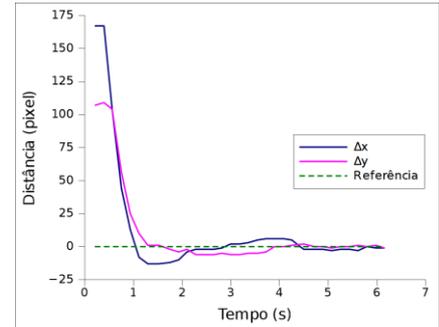


Figura 7. Variação dos erros nos eixos X e Y do controlador de olhar social.

Em próximos experimentos, os controladores serão refinados, em especial o de comunicação proxêmica, que poderá ser capaz de determinar a distância a manter da pessoa conhecendo, por exemplo, os graus de “intimidade” ou “disposição-para-interação” do usuário. Além disso, eles serão integrados à arquitetura de controle como comportamentos.

VI. CONCLUSÃO

O desenvolvimento de robôs móveis que irão interagir com pessoas deve fornecer mecanismos que tornem o robô ao mesmo tempo interativo e útil para resolver tarefas. É neste cenário que a presente proposta se encaixa, propondo uma arquitetura de controle que concilie os aspectos relacionados à tarefa, navegação e IHR. Para este fim, a arquitetura toma inspiração nas ciências biológicas e psicologia para propor mecanismos que emulem uma pequena parte da complexa

inteligência humana, conforme descreve a Seção IV.

Outra característica importante da proposta é o desenvolvimento do robô Pomodoro, mostrado na Seção III, cujo objetivo principal é servir como base experimental. Este robô foi concebido seguindo os ideais de simplicidade e baixo-custo, no intuito de contribuir para a área de IHR com um sistema robótico que seja simples e barato de replicar, permitindo sua adoção para a pesquisa e entretenimento.

Para avaliar tanto o robô quanto alguns módulos da arquitetura de controle, a Seção V apresenta dois experimentos preliminares realizados. O primeiro avalia dois comportamentos esperados de um sistema de IHR, o olhar social e a comunicação proxêmica. Ele demonstrou que é possível criar um controlador simples que imita satisfatoriamente ambos os comportamentos. Já o segundo experimento ensaia uma proposta de arquitetura de controle que propicia o telecontrole, ou navegação assistida, e emula comportamentos autônomos que independem de comandos do usuário. Este ensaio demonstrou que uma arquitetura, mesmo com comportamentos muito simples, é capaz de transmitir a ideia de um robô com “vontade própria”, que é um dos objetivos da arquitetura proposta ao apresentar o módulo motivacional.

Os próximos passos consistem no refinamento e desenvolvimento da arquitetura de controle proposta e a execução dos experimentos que a validem. Neste sentido, cada parte integrante da arquitetura de controle será estudada sob a visão funcional – isto é, como determinada parte pode contribuir para o aperfeiçoamento do sistema como um todo – e sob a visão bioinspirada – que investiga os embasamentos biológicos necessários para propor e definir tais partes.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Laboratório de Automação Inteligente (LAI), do Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Espírito Santo pelo apoio.

REFERENCIAS

- [1] D. J. Reinkensmeyer, C. T. Pang, J. A. Nessler, and C. C. Painter, “Java Therapy: Web-Based Robotic Rehabilitation,” *Integr. Assist. Technol. Inf. Age*, vol. 9, pp. 66–71, 2001.
- [2] A. Uribe, “Desenvolvimento de dispositivo para membro inferior com deficiência parcial,” Thesis, Universidade Estadual de Campinas, 2011.
- [3] B. Robins, K. Dautenhahn, R. T. Boekhorst, and A. Billard, “Robotic assistants in therapy and education of children with autism: Can a small humanoid robot help encourage social interaction skills?,” *Univers. Access Inf. Soc.*, vol. 4, no. 2, pp. 105–120, 2005.
- [4] C. Valadão, T. F. Bastos, M. Bôrtole, V. Perim, D. Celino, F. Rodor, A. Gonçalves, and H. Ferasoli, “Educational robotics as a learning aid for disabled children,” in *Biosignals and Biorobotics Conference (BRC), 2011 ISSNIP*, 2011, pp. 1–6.
- [5] A. Remazeilles, C. Leroux, G. Chalubert, L. CEA, and F. aux Roses, “SAM: a robotic butler for handicapped people,” in *The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, RO-MAN*, 2008, pp. 315–321.
- [6] J. L. Burke, R. R. Murphy, E. Rogers, V. J. Lumelsky, and J. Scholtz, “Final Report for the DARPA/NSF Interdisciplinary Study on Human-Robot Interaction,” *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 34, no. 2, pp. 103–112, May 2004.
- [7] B. Gates, “A Robot in Every Home,” *Scientific American*, vol. 296, pp. 58–65, Jan-2007.
- [8] M. A. Goodrich and A. C. Schultz, “Human-robot interaction: a survey,” *Found. Trends Hum.-Comput. Interact.*, vol. 1, no. 3, pp. 203–275, 2007.
- [9] H. Ferasoli-Filho, M. A. C. Caldeira, R. Pegoraro, S. Franco dos Reis Alves, C. Valadão, and T. F. Bastos-Filho, “Use of myoelectric signals to command mobile entertainment robot by disabled children: Design and control architecture,” in *Biosignals and Biorobotics Conference (BRC), ISSNIP*, 2012, pp. 1–5.
- [10] S. Alves, I. N. Silva, C. Ranieri, H. F. Filho, M. Caldeira, and R. Pegoraro, “A friendly mobile entertainment robot for disabled children,” in *Biosignals and Biorobotics Conference (BRC)*, 2013, pp. 1–6.
- [11] J. Borenstein, H. R. Everett, and L. Feng, *Where am I? Sensors and Techniques for Mobile Robot Positioning*. AK Peters, Ltd., Wellesley, MA), 1st ed., Ch. 2, pp. 28-35 and pp. 71-72, 1995.
- [12] M. J. Mataric, “Behavior-Based Control: Main Properties and Implications,” *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. Work. Arch. Intell. Control Syst.*, pp. 46–54, 1992.
- [13] R. Murphy, *Introduction to AI robotics*. MIT Press, 2000.
- [14] M. S. Gazzaniga and T. F. Heatherton, *Ciência psicológica: mente, cérebro e comportamento*. Artmed, 2005.
- [15] C. A. Policastro, R. A. F. Romero, G. Zuliani, and E. Pizzolato, “Learning of shared attention in sociable robotics,” *J. Algorithms*, vol. 64, no. 4, pp. 139–151, Outubro 2009.
- [16] R. C. Arkin, M. Fujita, T. Takagi, and R. Hasegawa, “An ethological and emotional basis for human-robot interaction,” *Robot. Auton. Syst.*, vol. 42, no. 3, pp. 191–201, 2003.
- [17] M. Begum, F. Karray, G. K. I. Mann, and R. Gosine, “A probabilistic approach for attention-based multi-modal human-robot interaction,” in *The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2009. RO-MAN 2009*, 2009, pp. 200–205.
- [18] C. Breazeal, “A motivational system for regulating human-robot interaction,” in *Proceedings of AAAI-98*, 1998, pp. 54–61.
- [19] M. J. Mataric, *The robotics primer*. MIT Press, 2007.
- [20] R. A. Brooks, “A robust layered control system for a mobile robot,” Massachusetts Institute of Technology, 1985.
- [21] A. A. Braidot, C. C. Cifuentes, A. Frizzera Neto, M. Frisoli, and A. Santiago, “ZigBee Wearable Sensor Development for Upper Limb Robotics Rehabilitation,” *Lat. Am. Trans. IEEE Rev. IEEE Am. Lat.*, vol. 11, no. 1, pp. 408–413, 2013.
- [22] B. Mutlu, J. Forlizzi, and J. Hodgins, “A Storytelling Robot: Modeling and Evaluation of Human-like Gaze Behavior,” in *Proceedings on the 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2006, pp. 518–523.
- [23] R. Mead and M. J. Mataric, “A probabilistic framework for autonomous proxemic control in situated and mobile human-robot interaction,” in *Proceedings of the 7th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, 2012, pp. 193–194.
- [24] J. Mumm and B. Mutlu, “Human-robot proxemics: Physical and psychological distancing in human-robot interaction,” in *Proceedings of the 6th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, 2011, pp. 331–338.
- [25] P. Viola and M. Jones, “Rapid object detection using a boosted cascade of simple features,” in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR*, 2001, vol. 1, pp. I-511.