

# MODELO DINÂMICO E CONTROLE DE UMA CADEIRA DE RODAS AUTÔNOMA PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA MOTORA SEVERA

WANDERLEY CARDOSO CELESTE, PATRICK NOÉ DOS SANTOS FILGUEIRA, TEODIANO FREIRE BASTOS FILHO,  
MÁRIO SARCINELLI FILHO E CELSO DE LA CRUZ CASAÑO

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES*

*Av. Fernando Ferrari, 514 29075-910 Vitória ES, Brasil*

*E-mails: {wanderley, patrick, tfbastos, sarcinel, celsodelacruz}@ele.ufes.br*

FERNANDO A. AUAT CHEEÍN E RICARDO CARELLI

*Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan*

*Av. San Martín Oeste 1109, 5400 San Juan, Argentina*

*E-mails: {fauat, rcarelli}@inaut.unsj.edu.ar*

**Abstract**— This paper presents the dynamic model of an autonomous wheelchair intended to navigate in a structured environment, making possible the access of people with severe motor disease to places of interest. The wheelchair dynamic model developed takes into account forces applied to the wheels, forces and torques due to the user seated on the wheelchair, and longitudinal and translational slip velocities of the wheels. An adaptive controller for trajectory tracking is also presented. A trajectory generator, based on an environmental map, provides a path free of obstacles. Hence, the autonomous vehicle is capable to move from one place to another one, following a safe path. Simulation results show that the trajectory tracking controller and the trajectory generator allow the autonomous vehicle to reach a given destination.

**Keywords**— Autonomous Wheelchair, Dynamic Model, Control of Low and High Level, Trajectory Generation, Environment Discretization.

**Resumo**— Este artigo apresenta o modelo dinâmico de uma cadeira de rodas autônoma, a qual é capaz de locomover-se autonomamente em um ambiente estruturado, possibilitando a uma pessoa com dificuldades motoras severas ter acesso a lugares de tal ambiente que são de seu interesse. O modelo dinâmico leva em conta efeitos tais como forças aplicadas às rodas, forças e torques devidos ao movimento de uma pessoa a bordo da cadeira e velocidades de escorregamento das rodas. Também é apresentado um controlador adaptativo para seguimento de trajetória. Um gerador de trajetória, que se baseia em informações de um mapa do ambiente de navegação, fornece ao controlador do veículo autônomo um caminho livre de obstáculos, de modo que tal veículo é capaz de ir desde um ponto do ambiente a outro, seguindo um caminho seguro. Resultados de simulações mostram que o sistema, composto pelo controlador de seguimento de trajetória e pelo gerador de trajetória, permite ao veículo autônomo alcançar uma dada localização de destino, seguindo um caminho livre de obstáculos.

**Palavras-chave**— Cadeira de Rodas Autônoma, Modelo Dinâmico, Controle de Baixo e Alto Nível, Geração de Trajetória, Discretização de Ambiente.

## 1 Introdução

Pessoas com deficiência motora severa vivem, em geral, uma vida de privações igualmente severas, pois necessitam do auxílio de terceiros para poder movimentarem-se dentro de suas próprias moradias. Além disso, tais pessoas normalmente já não dispõem da plena capacidade de comunicação com o mundo que os cercam, o que piora ainda mais sua condição de vida, uma vez que, além de depender da ajuda de alguém para que possam sobreviver, devem contar, ainda, com a capacidade de adivinhação daquelas pessoas, para suprir suas necessidades e desejos correntes.

Formas alternativas de comunicação têm sido investigadas por diversos centros de pesquisas. Em tais investigações, tem-se verificado que é possível a um indivíduo comandar dispositivos eletrônicos, tais como computadores, através de piscadas de olhos (sinais EMG – EletroMioGráficos), do movimento do globo ocular (sinais EOG – EletroOculoGráficos), ou até mesmo do pensamento (sinais EEG - Eletro-EncefaloGráficos). Em (Millán et al, 2003) e (Wol-

paw, 2004) são apresentados trabalhos que mostram que interfaces cérebro-computador já são realidade.

Com tais canais de comunicação alternativos, cria-se a possibilidade de suprir uma das necessidades e vontades mais básicas de uma pessoa, que é a capacidade de ir e vir. Isto pode parecer pouco para um indivíduo com plena capacidade de locomoção, mas para um indivíduo que perdeu todas as suas habilidades motoras, devido a doenças degenerativas ou acidentes envolvendo a coluna vertebral, tal possibilidade melhoraria muito sua qualidade de vida. Proporcionar uma melhor qualidade de vida a pessoas incapazes de movimentar um único membro é, portanto, a grande motivação para o desenvolvimento de uma cadeira de rodas autônoma e dos dispositivos necessários para comandá-la.

O projeto em questão demanda duas grandes frentes de trabalho, uma envolvendo diretamente a cadeira de rodas e outra responsável por desenvolver dispositivos baseados em sinais eletrobiológicos (EMG, EOG e EEG) que permitam a uma pessoa com enorme dificuldade motora comandar o veículo autônomo de forma simples e eficiente.

Dentro da primeira frente de trabalho, este artigo aborda o problema de controle da cadeira autônoma, a qual se equivale a um robô móvel, por ser dotada de sensores, motores e capacidade de processar informações provenientes tanto dos sensores quanto dos comandos emitidos pelo usuário da cadeira.

O problema de controle da cadeira de rodas, assim como em robôs móveis comerciais, se divide em dois, o controle de baixo nível e o controle de alto nível. O controlador de baixo nível é responsável por controlar a velocidade das rodas da cadeira, e o controlador de alto nível é responsável por controlar as velocidades de translação e de rotação da cadeira.

O controle de alto nível da cadeira de rodas é similar ao caso de robôs móveis comerciais. Entretanto, a cadeira de rodas possui uma massa considerável, além de poder ser operada por usuários com diferentes massas. Esta grande variação de massa, sem contar outras características, como calibração dos pneus e variações nos seus raios, provoca uma variação considerável no comportamento dinâmico do veículo. Portanto, os controladores de alto nível para a cadeira de rodas devem compensar os efeitos dinâmicos desta, para alcançar o objetivo de controle.

Modelos dinâmicos específicos para cadeira de rodas elétricas são apresentados por (Jonhson, 1985) e (Atesoglu, 2006). Entretanto, o modelo apresentado por (De La Cruz, 2006) se mostrou mais completo do que os demais, embora tenha sido desenvolvido para robôs móveis unicyclicos. Além disso, ali é feita uma parametrização linear do modelo, resultando em parâmetros que se relacionam com grandezas físicas do robô. Deste modo, optou-se por considerar neste trabalho em questão o modelo de (De La Cruz, 2006), o qual foi estendido a uma cadeira de rodas elétrica, conforme é mostrado na Seção 3.

O modelo de (De La Cruz, 2006) é utilizado em (Martins et al., 2007) para desenvolvimento de um controlador adaptativo, que é capaz de se adaptar online a partir da excitação da dinâmica do veículo móvel. Resultados de experimentos realizados com um robô Pioneer 3-DX são também apresentados naquele trabalho. Neste trabalho, tal controlador é utilizado em conexão com uma cadeira de rodas dotada do sensoriamento necessário.

## 2 Visão Geral do Sistema

A Fig. 1 ilustra a estrutura geral do sistema em forma de diagrama de blocos. Nota-se que a cadeira de rodas possui um microcontrolador *MSP430* a bordo, o qual é responsável por monitorar todos os seus sensores (Fig. 2) e por realizar o seu controle de baixo nível. Um módulo de comunicação sem fio baseado na tecnologia *Zigbee* permite a comunicação remota com a cadeira de rodas, possibilitando aos controladores da mesma o acesso a informações de sensores presentes no ambiente de navegação.

Na Fig. 2 são apresentados os dispositivos embarcados na cadeira. Codificadores ópticos acoplados aos motores que acionam as rodas determinam a pos-

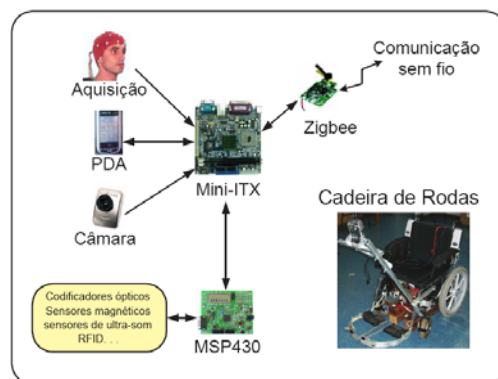


Fig. 1. Diagrama do sistema.

tura (posição e orientação) relativa da cadeira, e sensores de ultra-som permitem monitorar a distância entre ela e obstáculos (paredes, mobília, pessoas, etc.) em seu entorno. Sensores de radiofrequência baseados na tecnologia *RFID* monitoram a passagem da cadeira de um ambiente a outro, e sensores magnéticos facilitam sua passagem por portas e cantos.

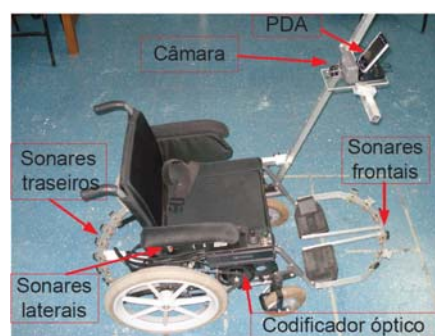


Fig. 2. Cadeira de rodas autônoma.

Também há uma camada superior de processamento das informações, que é uma placa de processamento e controle *Mini-ITX*. A ela estão ligados os dispositivos de Interface Homem-Máquina (IHM), a saber, câmara de vídeo para captura de movimentos oculares – vídeooculograma (VOG) –, placa de aquisição e pré-processamento de sinais eletrobiológicos e *PDA (Personal Digital Assistant)*, o qual é a interface de comunicação visual entre o usuário e a cadeira de rodas. Por meio de símbolos pictográficos, que representam os distintos ambientes de navegação, o usuário tem condições de escolher seu próximo destino. Informações sensoriais são passadas à unidade de processamento de alto nível por meio de uma comunicação serial existente entre o *Mini-ITX* e o microcontrolador *MSP430*, as quais servem como realimentação para o controlador de alto nível. Do controle de alto nível saem as velocidades linear e angular de referência, que são passadas ao controle de baixo nível via comunicação serial.

## 3 Modelo Dinâmico

Nesta seção é apresentado um modelo dinâmico para a cadeira de rodas, baseado no modelo dinâmico proposto em (Zhang, 1998) e em (De La Cruz, 2006) para um robô móvel.

A Fig. 3 ilustra uma cadeira de rodas. Trata-se de um veículo unidirecional contendo duas rodas de tração independentes e duas rodas castor. Na figura,  $B$  determina o centro do eixo que liga as duas rodas de tração,  $G$  determina o centro de gravidade e  $E$  é o ponto central da área de contato entre a cadeira e o seu usuário. O ponto  $h$  determina o ponto cuja postura se quer controlar, sendo  $\psi$  a orientação desejada.

Forças aplicadas às rodas e ao ponto de contato entre o usuário e a cadeira, bem como os momentos resultantes, relacionam-se através de

$$\begin{aligned} \sum F_x &= m(\dot{u} - \bar{u}\omega) = F_{rlx'} + F_{rrx'} + F_{ex'} + F_{clx'} + F_{crx'}, \\ \sum F_y &= m(\dot{\bar{u}} + u\omega) = F_{rly'} + F_{rly'} + F_{ey'} + F_{cly'} + F_{cry'}, \\ \sum M_z &= I_z \dot{\omega} = \frac{d}{2}(F_{rrx'} - F_{rlx'}) - b(F_{rly'} + F_{rly'}) + \end{aligned} \quad (1)$$

$$(e-b)F_{ey'} + (c-b)(F_{cry'} + F_{cly'}) + \frac{q}{2}(F_{crx'} - F_{clx'}) + \tau_e,$$

onde  $m$  é a massa da cadeira de rodas,  $I_z$  é o seu momento de inércia ao redor do eixo vertical localizado em  $G$ , e  $\bar{u}$  é a velocidade de escorregamento transversal medida em  $G$ .

A cinemática do ponto  $h$  é caracterizada por

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \psi - \bar{u} \sin \psi - (a-b)\omega \sin \psi, \\ \dot{y} &= u \sin \psi + \bar{u} \cos \psi + (a-b)\omega \cos \psi. \end{aligned} \quad (2)$$

Já as velocidades linear, angular e de deslizamento transversal são descritas como

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{2} [r(\omega_r + \omega_l) + (u_r^s + u_l^s)], \\ \omega &= \frac{1}{d} [r(\omega_r - \omega_l) + (u_r^s - u_l^s)], \\ \bar{u} &= \frac{b}{d} [r(\omega_r - \omega_l) + (u_r^s - u_l^s)] + \bar{u}^s, \end{aligned} \quad (3)$$

onde  $r$  é o raio das rodas de tração,  $d$  é a distância entre elas,  $\omega_r$  e  $\omega_l$  são as velocidades angulares das rodas direita e esquerda,  $u_r^s$  e  $u_l^s$  são as velocidades de deslizamento longitudinal das rodas direita e esquerda, e  $\bar{u}^s$  é a velocidade de deslizamento lateral.

Os motores são modelados através de

$$\begin{aligned} \tau_r &= k_a (v_r - k_b \omega_r) / R_a, \\ \tau_l &= k_a (v_l - k_b \omega_l) / R_a, \end{aligned} \quad (4)$$

onde  $v_r$  e  $v_l$  são as tensões aplicadas aos motores direito e esquerdo,  $k_b$  é a constante contra-eletromotriz multiplicada pela constante de redução,  $R_a$  é a constante de resistência elétrica,  $\tau_r$  e  $\tau_l$  são os torques dos motores direito e esquerdo, multiplicados pela constante de redução, e  $k_a$  é a constante de torque multiplicada pela constante de redução. As tensões devido às indutâncias são desprezadas.

As equações dinâmicas das combinações rodador são dadas por

$$\begin{aligned} I_e \dot{\omega}_r + B_e \omega_r &= \tau_r - F_{rrx'} R_t, \\ I_e \dot{\omega}_l + B_e \omega_l &= \tau_l - F_{rlx'} R_t, \end{aligned} \quad (5)$$

onde  $I_e$  e  $B_e$  são o momento de inércia e o coeficiente de atrito viscoso, respectivamente, da combinação rotor do motor, caixa de redução, e roda, e  $R_t$  é o raio nominal dos pneus das rodas de tração.

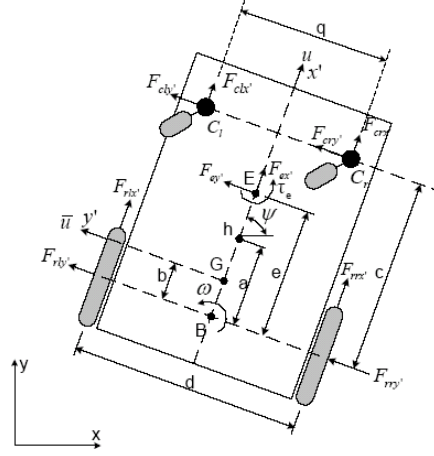


Fig. 3: Modelo dinâmico da cadeira de rodas.

Das expressões de (1) a (5) se obtém o modelo dinâmico da cadeira de rodas, que é dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos \psi - a\omega \sin \psi \\ u \sin \psi + a\omega \cos \psi \\ \omega \\ \frac{\theta_3^0}{\theta_1^0} R_t r \omega^2 - 2 \frac{\theta_4^0}{\theta_1^0} u \\ -2 \frac{\theta_3^0}{\theta_2^0} R_t r u \omega - \frac{\theta_4^0}{\theta_2^0} d^2 \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{2r}{\theta_1^0} & 0 \\ 0 & \frac{2rd}{\theta_2^0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_u \\ v_\omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ 0 \\ \delta_u \\ \delta_\omega \end{bmatrix}. \quad (6)$$

As entradas deste modelo são

$$v_u = \frac{v_r + v_l}{2} \text{ e } v_\omega = \frac{v_r - v_l}{2},$$

e seus parâmetros são descritos como

$$\begin{aligned} \theta_1^0 &= \frac{R_a}{k_a} (mR_t r + 2I_e), \quad \theta_2^0 = \frac{R_a}{k_a} (I_e d^2 + 2R_t r (I_z + mb^2)), \\ \theta_3^0 &= \frac{R_a}{k_a} mb \text{ e } \theta_4^0 = \frac{R_a}{k_a} \left( \frac{k_a k_b}{R_a} + B_e \right). \end{aligned}$$

Os elementos do vetor de incertezas  $[\delta_x \ \delta_y \ 0 \ \delta_u \ \delta_\omega]^T$ , são

$$\begin{aligned} \delta_x &= -\bar{u}^s \sin \psi, \quad \delta_y = \bar{u}^s \cos \psi, \\ \delta_u &= \frac{1}{\theta_1^0} \left[ Rr \frac{R_a}{k_a} (m\omega \bar{u}^s + F_{ex'} + F_{clx'} + F_{crx'}) + \theta_4^0 (u_r^s + u_l^s) + I_e \frac{R_a}{k_a} (\dot{u}_r^s + \dot{u}_l^s) \right] \text{ e} \\ \delta_\omega &= \frac{1}{\theta_2^0} \left[ \theta_4^0 d (u_r^s - u_l^s) + I_e d \frac{R_a}{K_a} (\dot{u}_r^s - \dot{u}_l^s) - 2R_t r \theta_3^0 \bar{u}^s + 2R_t r \frac{R_a}{K_a} (eF_{ey'} + cF_{cly'} + cF_{cry'} + \tau_e + \frac{q}{2}(F_{crx'} - F_{clx'})) \right]. \end{aligned}$$

O vetor de incertezas será nulo se forem desprezados as forças sobre as rodas livres, o deslizamento das rodas de tração e as forças e torques exercidos pelo corpo do usuário a bordo da cadeira de rodas.

A equação do modelo dinâmico (6) é útil quando é possível atuar diretamente sobre as tensões dos motores. Entretanto, como já existem controladores de baixo nível para seguir as entradas de velocidades de referência, é conveniente expressar o modelo da cadeira de rodas em uma forma mais apropriada,

considerando que os sinais de controle são as velocidades de referência rotacional e longitudinal da mesma. Para este propósito, os controladores de velocidade das rodas são incluídos no modelo. Para simplificar tal modelo, consideram-se controladores de velocidade PD, descritos por

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{PT}(u_{ref} - u_{me}) - k_{DT}\dot{u}_{me} \\ k_{PR}(\omega_{ref} - \omega_{me}) - k_{DR}\dot{\omega}_{me} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

onde

$$u_{me} = \frac{r}{2}(\omega_r + \omega_l) \text{ e } \omega_{me} = \frac{r}{d}(\omega_r - \omega_l).$$

As variáveis  $\dot{u}_{ref}$  e  $\dot{\omega}_{ref}$  são desprezadas em (7), para simplificar ainda mais o modelo.

Substituindo (7) em (6), obtém-se como modelo dinâmico da cadeira de rodas

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos \psi - a \omega \sin \psi \\ u \sin \psi + a \omega \cos \psi \\ \omega \\ \frac{\bar{\theta}_3^0}{\bar{\theta}_1^0} \omega^2 - \frac{\bar{\theta}_4^0}{\bar{\theta}_1^0} u \\ -\frac{\bar{\theta}_5^0}{\bar{\theta}_2^0} u \omega - \frac{\bar{\theta}_6^0}{\bar{\theta}_2^0} \omega \end{bmatrix} + \frac{1}{\bar{\theta}_1^0} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & \frac{1}{\bar{\theta}_2^0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\delta}_x \\ \bar{\delta}_y \\ 0 \\ \bar{\delta}_u \\ \bar{\delta}_\omega \end{bmatrix}, \quad (8)$$

cujos parâmetros são

$$\bar{\theta}_1^0 = \left( \frac{R_a}{k_a} (mR_l r + 2I_e) + 2rk_{DT} \right) / (2rk_{PT}),$$

$$\bar{\theta}_3^0 = \frac{R_a}{k_a} mbR_l / (2k_{PT}), \quad \bar{\theta}_4^0 = \frac{R_a}{k_a} \left( \frac{k_a k_b}{R_a} + B_e \right) / (rk_{PT}) + 1,$$

$$\bar{\theta}_5^0 = \frac{R_a}{k_a} mbR_l / (dk_{PR}), \quad \bar{\theta}_6^0 = \frac{R_a}{k_a} \left( \frac{k_a k_b}{R_a} + B_e \right) d / (2rk_{PR}) + 1.$$

Os elementos  $\bar{\delta}_u$  e  $\bar{\delta}_\omega$  do vetor de incertezas,  $[\bar{\delta}_x \ \bar{\delta}_y \ 0 \ \bar{\delta}_u \ \bar{\delta}_\omega]^T$ , são agora

$$\bar{\delta}_u = \frac{R_l R_a}{2\bar{\theta}_1^0 K_{PT} K_a} (m a \bar{\omega}^s + F_{ex} + F_{clx} + F_{crx}) +$$

$$\frac{\bar{\theta}_4^0}{2\bar{\theta}_1^0} (u_r^s + u_l^s) + \frac{I_e R_a + r K_a K_{DT}}{2\bar{\theta}_1^0 r K_{PT} K_a} (\dot{u}_r^s + \dot{u}_l^s)$$

$$\bar{\delta}_\omega = \frac{\bar{\theta}_6^0}{d \bar{\theta}_2^0} (u_r^s - u_l^s) + \frac{I_e d R_a + 2r K_a K_{DR}}{2\bar{\theta}_2^0 r K_{PR} K_a d} (\dot{u}_r^s - \dot{u}_l^s) - \frac{\bar{\theta}_5^0}{\bar{\theta}_2^0} \dot{u}^s +$$

$$\frac{R_l R_a}{\bar{\theta}_2^0 d K_{PR} K_a} \left( e F_{ey} + c F_{cly} + c F_{cry} + \frac{q}{2} F_{crx} - \frac{q}{2} F_{clx} + \tau_e \right)$$

As acelerações  $\dot{u}$  e  $\dot{\omega}$  não dependem dos estados  $\psi$ ,  $x$  e  $y$ , e assim a parte dinâmica da cadeira de rodas pode ser expressa como

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\bar{\theta}_3^0}{\bar{\theta}_1^0} \omega^2 - \frac{\bar{\theta}_4^0}{\bar{\theta}_1^0} u \\ -\frac{\bar{\theta}_5^0}{\bar{\theta}_2^0} u \omega - \frac{\bar{\theta}_6^0}{\bar{\theta}_2^0} \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\bar{\theta}_2^0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\delta}_u \\ \bar{\delta}_\omega \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Reordenando e desprezando o vetor de incertezas, obtém-se a parametrização linear

$$\begin{bmatrix} \dot{u} & 0 & -\omega^2 & u & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\omega} & 0 & 0 & u \omega & \omega \end{bmatrix} \bar{\theta}^0 = \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

onde  $\bar{\theta}^0 = [\bar{\theta}_1^0 \ \bar{\theta}_2^0 \ \bar{\theta}_3^0 \ \bar{\theta}_4^0 \ \bar{\theta}_5^0 \ \bar{\theta}_6^0]^T$ .

## 4 Controladores

### 4.1 Controlador de baixo nível

A Fig. 4 ilustra o sistema de controle das rodas da cadeira. Trata-se de um controlador *PID* embarcado em um microcontrolador *MSP430*. As velocidades de referência das rodas se relacionam com as velocidades linear,  $u_{ref}$ , e angular,  $\omega_{ref}$ , da cadeira como a seguir

$$\omega_{Rref} = \frac{u_{ref} + (d/2)\omega_{ref}}{R} \text{ e } \omega_{Lref} = \frac{u_{ref} - (d/2)\omega_{ref}}{R}$$

onde  $R$  é o raio das rodas de tração e  $d$  é a distância entre elas.

Os controladores *PID* implementados geram sinais de controle,  $u_{oL}$  e  $u_{oR}$ , para ambas as rodas, com base nos erros de velocidade  $e_1 = \omega_{Rref} - \omega_R$  e  $e_2 = \omega_{Lref} - \omega_L$ , onde  $\omega_L$  e  $\omega_R$  são as velocidades reais das rodas de tração esquerda e direita, medidas a partir de codificadores ópticos acoplados a seus eixos. Por fim, os sinais de controle são utilizados para que o MSP possa gerar os sinais PWM necessários para acionar os motores da cadeira.

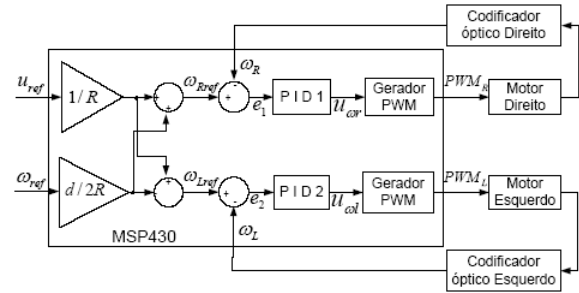


Fig. 4: Diagrama de blocos do controle das rodas da cadeira.

### 4.2 Controlador de alto nível

O controlador de alto nível é o responsável por gerar as velocidades linear e angular da cadeira, que servem de referência ao controlador de baixo nível, como visto na Seção 4.1. Entre os controladores de alto nível utilizados em robótica móvel está o controlador de seguimento de trajetória, que será utilizado para guiar a cadeira de rodas por um caminho pré-determinado.

O controlador de seguimento de trajetória a ser utilizado é aquele proposto em (Martins *et al.*, 2007), que é um controlador dinâmico adaptativo. A Fig. 5 ilustra a estrutura de tal controlador. Como pode ser visto, ele se divide em uma parte cinemática e uma parte dinâmica, que se baseiam nas partes cinemática e dinâmica, respectivamente, do modelo dinâmico completo da cadeira. A parte cinemática do controlador recebe como referência a posição  $(x_d, y_d)$  e velocidade  $(\dot{x}_d, \dot{y}_d)$  desejadas do veículo, e gera velocidades linear e angular de referência,  $u_{ref}^c$  e  $\omega_{ref}^c$ , para a parte dinâmica do controlador, que por sua vez gera as velocidades linear e angular,  $u_{ref}$  e  $\omega_{ref}$ , de referência para o controlador de baixo nível.

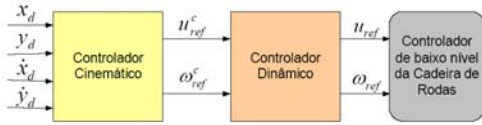


Fig. 5. Diagrama de blocos da estrutura do controlador.

## 5 Geração de Trajetórias

Para o controlador de alto nível da Seção 4.2 devem ser enviadas posições e velocidades, em cada instante de tempo, como referências a serem seguidas pela cadeira de rodas. Esta seção é dedicada a mostrar como são geradas tais referências.

A Fig. 6 apresenta um diagrama de blocos do sistema de geração de trajetória, que se baseia no trabalho desenvolvido em (Frizera et al., 2006b). Nota-se que a cadeira autônoma tem armazenada em sua memória informações referentes ao ambiente de navegação e à sua localização atual em tal ambiente. A determinação de um caminho livre é feita com base em tais informações e na localização (célula) de destino definida pelo usuário. Por fim, a partir do caminho gerado, é determinada a trajetória a ser seguida.

O ambiente de navegação discretizado é dividido em células não navegáveis e navegáveis. As primeiras são aquelas que contêm algum obstáculo, como, por exemplo, paredes e mobília. Por outro lado, as células navegáveis não apresentam qualquer impedimento à passagem do veículo móvel. O nível de navegabilidade por células navegáveis é quantizado. Para tanto, foi utilizado o princípio da força de repulsão. É como se cada célula contendo obstáculo (célula não navegável) exercesse uma força de repulsão sobre o veículo. Tal força de repulsão tão quanto mais próxima ela estiver de uma célula não navegável. A expressão matemática para cálculo dos custos das células navegáveis é dada por

$$c(n_i, n_j) = \sum_{i,j=1}^{NR} \frac{K}{\sqrt{(n_i - r_i)^n + (n_j - r_j)^n}}, \quad (11)$$

onde  $n_i$  e  $n_j$  são as coordenadas  $i$  e  $j$ , respectivamente, de uma célula navegável, sendo  $i$  e  $j$  a linha e a coluna varridas,  $c$  é o custo de tal célula,  $r_i$  e  $r_j$  são as coordenadas  $i$  e  $j$ , respectivamente, de uma célula repulsiva,  $n$  é o índice de perda da força de repulsão, o qual deve ser um inteiro par positivo, e  $NR$  é o número de células repulsivas.

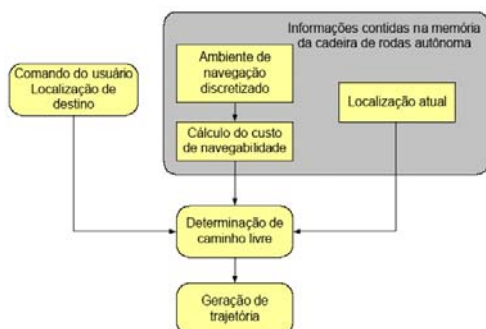


Fig. 6. Diagrama de blocos do sistema de geração de trajetória.

## 6 Resultados

O gerador de caminhos livres de obstáculos é baseado no algoritmo de *Dijkstra* (Tanenbaum, 2003), e se utiliza dos custos de navegabilidade para obter o caminho que permite ir desde um ponto a outro, passando o mais distante possível de obstáculos.

É considerado o ambiente de navegação apresentado na Fig. 7, onde se pode ver a cadeira de rodas em um dado ponto (vista superior). A Fig. 8 mostra o ambiente discretizado, que é armazenado na memória da cadeira autônoma. A apresentação ao usuário das informações contidas no ambiente é feita como mostrado na Fig. 9, mediante a utilização de símbolos pictográficos visíveis em um *PDA*. A seleção do símbolo por parte do usuário é feita a partir de sinais eletrobiológicos, como mostrado em (Frizera et al., 2006a).

A Fig. 10 apresenta o caminho gerado, dados os custos de navegabilidade de cada elemento discreto do ambiente, a posição atual do veículo móvel e a localização de destino para tal veículo.

Foi utilizado o método de interpolação *Spline-Cúbica*, com geração de pontos de controle a partir do método de *Bezier*, em caso de descontinuidades do caminho, de modo a obter um polinômio que interpole suavemente os pontos do caminho gerado. A primeira derivada temporal do polinômio obtido dá origem à velocidade em cada posição do caminho, o que define uma trajetória de navegação.

O modelo dinâmico da cadeira apresentado na Seção 3, o controlador de seguimento de trajetória desenvolvido em (Martins et al., 2007), assim como o sistema de geração de trajetória da Seção 5, foram implementados em Matlab/Simulink®. O mapa do ambiente de navegação discretizado (Fig. 8), bem como as localizações iniciais e de destino do veículo móvel, serviram como entradas ao sistema. A Fig. 10 apresenta o ambiente discretizado, as localizações

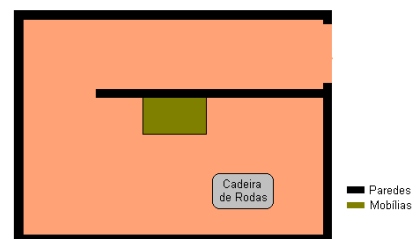


Fig. 7: Ambiente de navegação.

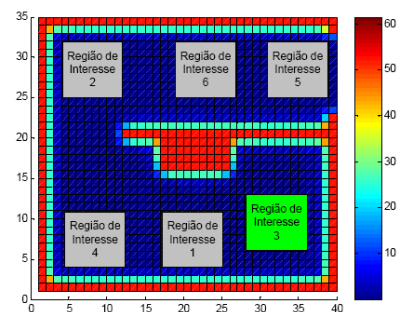


Fig. 8: Ambiente de navegação discretizado.



Região de Interesse 1	Região de Interesse 2	Região de Interesse 3
Região de Interesse 4	Região de Interesse 5	Região de Interesse 6

Fig. 9: Regiões de interesse apresentadas no tabuleiro de símbolos pictográficos.

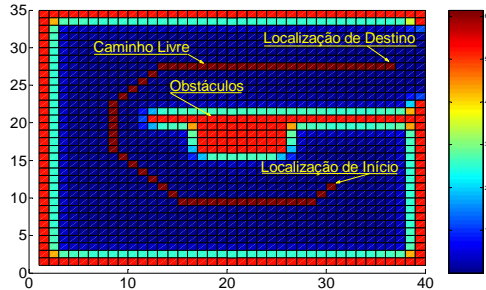


Fig. 10: Caminho que leva a cadeira de rodas da localização atual (região de interesse 3) à localização de destino (região de interesse 5).

inicial e de destino e o caminho gerado pelo sistema. Na Fig. 11 é possível ver a trajetória de referência resultante e a trajetória percorrida pela cadeira. Como pode ser visto, o veículo segue efetivamente a trajetória especificada e alcança a localização de destino.

## 7 Conclusão

Foi apresentado o modelo dinâmico de uma cadeira de rodas autônoma para assistência a pessoas com dificuldade motora severa. Tal modelo permitiu simular o sistema, que inclui também um controlador de trajetória adaptativo – desenvolvido em trabalho prévio –, e um sistema de geração de trajetória, responsável por criar os sinais de referência para o controlador de seguimento de trajetória. Os resultados de simulação mostraram que o veículo segue efetivamente a trajetória de referência, e alcança a posição de destino.

Como trabalho futuro, pretende-se implementar todo o sistema descrito neste artigo na cadeira de rodas elétrica. Além disso, serão realizados experimentos envolvendo outros tipos de ambientes.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES/MEC e a SPU/Argentina pelo apoio ao Convênio UFES-UNSJ (Projeto 018/04 CAPG-BA), do qual resultou este trabalho.

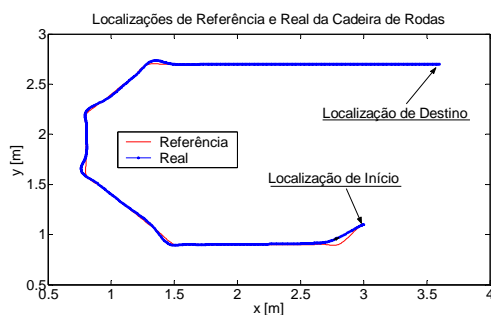


Fig. 11: Resultado de simulação com modelo dinâmico da cadeira de rodas com controlador de trajetória adaptativo.

## Referências Bibliográficas

- Atesoglu, O. (2006). Nearly Time-Optimal Point to Point Navigation Control Design for Power Wheelchair Dynamics, *Proceedings of the 2006 IEEE of the International Conference on Control Applications*, Munich, Germany, pp. 953-959.
- Carelli, R., Secchi, H. e Mut, V. (1999). Algorithms for Stable Control of Mobile Robots with Obstacle Avoidance, *Latin American Applied Research*, vol. 29, pp. 191-196.
- De La Cruz, C. (2006). Control de Formación de Robots Móviles, *Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan*, San Juan, Argentina.
- Frizera Neto, A., Celeste, W. C., Bastos Filho, T. F., Martins, V. R. e Sarcinelli Filho, M. (2006). Human-Machine Interface Based on Electro-Biological Signals for Mobile Vehicle Control, *Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Montreal, v. 1, p. 2954-2959.
- Frizera Neto, A., Celeste, W. C., Auat Cheeín, F. A., Toniolo, C. C., Bastos Filho, T. F., Sarcinelli Filho, M. y Carelli, R. (2006). Navegação de um Veículo Móvel a Rodas em Ambientes Mapeados Utilizando Tabuleiro Eletrônico com Varredura Automática, *IV Congresso Ibero-Americano Sobre Tecnologías de Apoio a Portadores de Deficiência, IberDiscap*, Vitória-ES, Brasil, v. II, p. MO151-MO155.
- Johnson B. W. e Aylor H. J. (1985). Dynamic Modeling of an Electric Wheelchair, *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. IA-21, n. 5, pp. 1284-1293.
- Martins, F. N., Celeste, W. C., Carelli, R., Sarcinelli Filho, M. e Bastos Filho, T. F. (2007). Kinematic and Adaptive Dynamic Trajectory Tracking Controller for Mobile Robots, *Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety AVCS'07*, pp. 29-34, Buenos Aires, Argentina.
- Millán, J., Renkens, F., Mouriño, J. e Gerstner, W. (2004). Non-invasive brain-actuated control of a mobile robot, in *Proceedings of the 18th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Acapulco, Mexico.
- Tanenbaum, A. S. (2003). *Computer Networks*, 4ª ed. Prentice Hall.
- Wolpaw, J. R. (2004). Brain-computer interfaces (BCIs) for communication and control: Current status, *Second International BCI Workshop and Training Course 2004*, Graz, Austria, pp. 29-32.
- Zhang, Y., Hong, D., Chung, J. H. e Velinsky, S. A. (1998). Dynamic Model Based Robust Tracking Control of a Differentially Steered Wheeled Mobile Robot, *Proceedings of the American Control Conference*, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 850-855.