

# Robô Detector de Focos de Incêndio Desenvolvido para uma Competição de Robótica

Taiser T. T. Barros<sup>1</sup>, Walter Fetter Lages<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escola de Educação Profissional SENAI Carlos Tannhauser  
Santa Cruz do Sul – RS – Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Porto Alegre – RS – Brasil

tttbarros@yahoo.com.br, fetter@ece.ufrgs.br

**Abstract.** *This work presents the design and assembling details of a robot developed to take part in an educational robotic competition. A control law based on Lyapunov theory was developed and implemented on a Programmable Logic Controller (PLC) to control the robot.*

**Resumo.** *Este trabalho apresenta o projeto e detalhes de montagem de um robô desenvolvido para participar em uma competição de robótica. Um lei de controle baseada na teoria de Lyapunov foi desenvolvida e implementada em um Controlador Lógico Programável (CLP) para controlar o robô.*

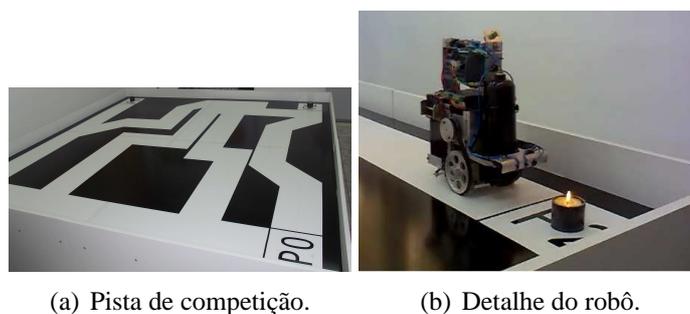
## 1. Introdução

A cada dois anos o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) promove a Olimpíada do Conhecimento, que é uma competição a nível de Educação Profissional onde estudantes podem demonstrar seus conhecimentos e habilidades em determinadas áreas do conhecimento (como elétrica ou eletrônica). A competição dura quatro dias e durante a mesma os competidores precisam solucionar problemas que são provenientes de situações vivenciadas na indústria. O desempenho dos competidores é medido conforme requisitos técnicos que são provenientes das necessidades levantadas nos ambientes industriais [SENAI 2012b].

A Robótica Industrial é uma das ocupações da Olimpíada do Conhecimento que solicita de seus participantes conhecimentos nas áreas de mecânica, eletricidade, eletrônica e sistemas pneumáticos dentre outros. O formato desta ocupação é similar ao de competições de robótica tais como a FIRST — For Inspiration and Recognition of Science and Technology — que busca incentivar a participação dos jovens pela ciência e tecnologia [FIRST 2012], e a NRC — National Robotics Challenge — que promove a robótica educacional desde 1986 em uma competição que oferece atualmente doze desafios de robótica [NRC 2012].

Na ocupação de Robótica Industrial os times são compostos por três participantes que devem desenvolver um robô móvel capaz de deslocar-se de forma autônoma em uma pista de competição com ou sem obstáculos solucionando um determinado desafio proposto [SENAI 2012a]. Na etapa regional de 2012 desta competição, o desafio proposto consistiu no desenvolvimento de um robô capaz de localizar e extinguir focos de incêndio (que foram simulados utilizando velas).

A figura 1(a) mostra a pista de competição com os diferentes caminhos possíveis para o robô deslocar-se do ponto inicial P0 até os focos de incêndio (F1 e F2). Os caminhos diferenciam-se pelo comprimento e ângulos das curvas sendo que cada time poderia escolher o melhor caminho considerado para ser percorrido por seu robô. A figura 1(b) mostra o robô. A competição possui duas etapas: a regional (realizada nos estados) e a nacional, sendo que os campeões das etapas regionais disputam a etapa nacional.



**Figura 1. Arena de competição**

No restante deste artigo serão apresentados: uma descrição sobre o time formado para participar da competição na seção II, a estrutura mecânica do robô e a arquitetura do controle na seção III. A lei de controle proposta para ser implementada em um Controlador Lógico Programável (CLP) na seção IV, e a apresentação dos resultados da simulação do sistema na seção V.

## **2. O Time de Competição**

### **2.1. Processo de Seleção**

Conforme proposta da ocupação de robótica industrial, cada um dos times inscritos na competição deve ser constituído por três alunos e um professor preparador. A escolha por cada um dos participantes deve ser tomada com base no desempenho técnico dos alunos no decorrer do curso e através de um método de seleção que geralmente utiliza uma avaliação que mede conhecimentos teóricos e práticos dos alunos, além de ser fundamental avaliar também características comportamentais como proatividade e capacidade de trabalhar em equipe.

Para formar o time de Robótica Industrial da Escola de Educação Profissional Carlos Tannhauser para a etapa regional de 2012, foram selecionados alunos dos cursos técnicos de eletrônica e mecatrônica, analisando o desempenho dos mesmos nos seus respectivos cursos e testando seus conhecimentos técnicos através de avaliações teóricas e práticas, entrevistas e dinâmicas de grupo.

### **2.2. Alunos Selecionados**

Após o processo de seleção, o time de competição ficou constituído da seguinte forma:

- 1 Competidor com formação técnica em eletrônica (idade: 19 anos);
- 1 Competidor com formação técnica em mecatrônica (idade: 17 anos);
- 1 Competidor com formação técnica em eletrônica e formação complementar em mecânica de usinagem (idade: 20 anos);

A etapa subsequente à seleção dos competidores, foi a preparação dos mesmos para participar na etapa regional da competição. Este período teve duração de 2 semestres, envolvendo aulas teóricas e práticas sobre programação, robótica, CAD, competências transversais (gestão, empreendedorismo, etc) e layout de placas eletrônicas dentre outros, sendo que o enfoque para cada um destes tópicos foi direcionado de forma a agregar conhecimentos relativos à ocupação de robótica industrial.

### 3. O Robô

Conceitos de mecânica, elétrica, eletrônica e de sistemas pneumáticos foram utilizados no projeto e construção do robô descrito neste trabalho, proporcionando aos competidores o exercício de seus conhecimentos técnicos, assim como preconizado pela Olimpíada do Conhecimento. A figura 2 apresenta uma vista 3D do robô.

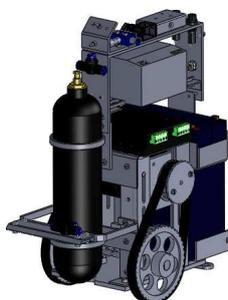


Figura 2. Vista em 3D do Robô.

#### 3.1. Estrutura Mecânica do Robô

O melhor método para extinguir chamas — dentre os diferentes testados — foi a utilização de um jato de ar comprimido. Desta forma, um sistema pneumático foi desenvolvido utilizando um reservatório (a 8 bar de pressão) e uma válvula solenóide para liberar os jatos. Para cada foco de incêndio detectado, um jato de ar comprimido era liberado, sendo que o reservatório foi dimensionado para disparar até 20 vezes mantendo pressão suficiente para efetuar novos disparos. A transmissão entre os motores de passo e as rodas do robô utilizam um par de engrenagens com relação de 1:2 com acionamento via correia dentada.

Dois conjuntos de baterias ( $24V = 12V + 12V$ ) foram utilizados para alimentar o robô. Um dos conjuntos alimentando os drivers e os motores de passo e o outro fornecendo a tensão de trabalho para o CLP. Desta forma problemas devido ao ruído gerado por picos de corrente durante a partida dos motores são evitados.

Dois métodos foram testados para detectar as chamas (focos de incêndio): variação de temperatura e detecção por infravermelho. A detecção por Infravermelho demonstrou uma melhor performance, uma vez que a velocidade na detecção é superior à da detecção de temperatura além de ser mais precisa. A placa desenvolvida utiliza um par de sensores PHCR359 [PHOTONIC 2012].

O peso máximo permitido para o robô na competição é de 25Kg, desta forma os motores de passo foram dimensionados de forma a manter uma relação entre o peso e o

torque necessário à movimentação do robô. O chassi foi totalmente projetado e usinado pelos componentes do time, sendo que somente componentes como correias, engrenagens e rolamentos foram adquiridos.

### **3.2. Controlador do Robô**

Objetivando a utilização de componentes que são empregados no ambiente industrial, um CLP foi escolhido. O CLP é um equipamento com uma diversidade de características técnicas tais como comunicação em rede e cálculos em ponto flutuante. É possível dizer que o CLP terá um importante papel no ambiente industrial do futuro [Bryan and Bryan 1997]. A utilização de um CLP — com um hardware confiável — permitiu aos componentes do time dedicar maior tempo ao desenvolvimento do software de controle do robô. O modelo de CLP utilizado pertence a família S7-1200 da SIEMENS [Siemens 2012], o modelo específico utilizado é a CPU 1214C que dentre suas características técnicas provê duas saídas PTO (Pulse Train Outputs), que são utilizadas para gerar pulsos para acionar/controlar os drivers. O software de controle do robô foi desenvolvido utilizando a linguagem LADDER .

Os drivers que foram selecionados para o projeto utilizam a técnica de micro-passos que incrementa a precisão no posicionamento dos motores [Microchip 2012]. O modelo utilizado [Akiyama 2012] permite que sejam gerados até 25600 pulsos por revolução do motor.

## **4. Sistema de Controle do Robô**

### **4.1. Controle em malha aberta**

Para controlar o robô a idéia utilizada foi baseada no traçado da pista de competição. Conforme a figura 1(a), três pontos são apresentados: P0 – que é o ponto de partida e retorno do robô e F1-F2 onde os focos de incêndio são localizados.

Em cada um dos módulos da competição o robô saia de P0, passando pelos pontos F1 e F2 para verificar a existência dos focos de incêndio (sendo que os focos poderiam estar ativos apenas em F1 ou em F2 ou até mesmo em F1 e F2) retornando a P0 ao final do módulo. Assim o software do robô foi desenvolvido para seguir coordenadas. Um ponto crucial para o robô conseguir um bom desempenho na pista sendo guiado por coordenadas foi seu posicionamento inicial, sendo necessário que o ponto de partida do robô sempre fosse o mesmo, pois caso contrário o robô poderia perder seu posicionamento relativo e não retornar ao ponto P0.

Com este controle, o robô apresentou um desempenho satisfatório na maioria dos casos, porém, uma das situações vivenciadas na competição demonstrou que este tipo de controle (em malha aberta) possui pontos a serem melhorados, como exemplo as situações onde o robô necessita transpor obstáculos do tipo rampas (de subida ou descida). Em particular, durante a descida de uma rampa o robô apresentou um pequeno deslocamento que alterou seu curso, distanciando o mesmo do ponto final objetivado (P0). A idéia para o desenvolvimento do controle em malha aberta pode ser explicado com base na figura 3, onde o CLP calcula as coordenadas para deslocamento do robô, que são convertidas em número de pulsos gerados nas saídas PTO e enviadas aos drivers que acionam os motores de passo. Além disso o CLP efetua o monitoramento da placa detectora de chamas e

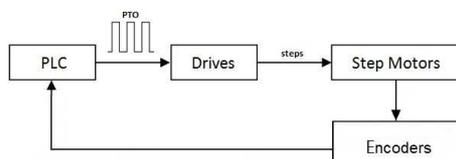
em caso de detecção aciona a válvula solenóide que libera o jato de ar comprimido para extinguir a(s) chama(s).



**Figura 3. Controle em malha aberta.**

#### 4.2. Sistema de Controle em Malha Fechada

Para melhorar a performance do robô, um sistema de controle em malha fechada foi proposto conforme a figura 4. Sendo necessário a utilização de um par de *encoders* que serviram como elementos sensores para medir o deslocamento de cada uma das rodas do robô.



**Figura 4. Controle em malha fechada.**

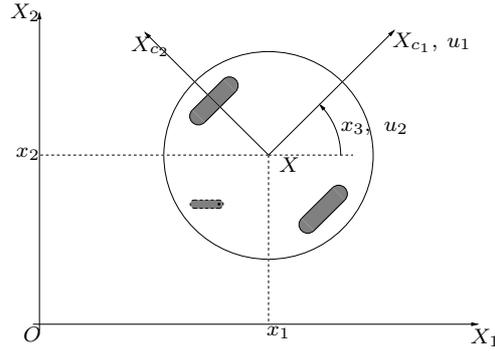
O robô apresentado neste trabalho é do tipo diferencial móvel com duas rodas ativas conforme exemplificado na figura 5. O modelo matemático proposto para este tipo de robô [Lages and Hemerly 1998] descreve a posição e orientação do mesmo dados suas velocidades linear e angular:

$$\dot{x} = f(x, u) = \begin{bmatrix} \cos x_3 & 0 \\ \sin x_3 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} u \quad (1)$$

onde  $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$  é o vetor de estados do sistema e  $u = [u_1 \ u_2]^T$  é o vetor de entrada do sistema. As variáveis de estado  $x_1$  e  $x_2$  são a coordenadas do plano de deslocamento do robô, e  $x_3$  o ângulo de orientação, ainda, as variáveis do vetor de entrada  $u_1$  e  $u_2$  representam as velocidades linear e angular. As coordenadas do sistema são apresentadas na figura 5 onde  $X_{c1}$  e  $X_{c2}$  representam os eixos do robô e  $X_1$  e  $X_2$  compõem o sistema de coordenadas inercial. A dependência temporal foi omitida das equações.

Robôs móveis diferenciais são sistemas não-holonômicos [Campion et al. 1996]. Uma importante declaração sobre o controle de sistemas não-holonômicos foi feita por Brockett [Brockett 1982], que demonstrou a impossibilidade de estabilizar um sistema de forma assintótica em um ponto arbitrário utilizando uma lei de controle com suavização e invariante no tempo. Apesar disto o sistema é controlável [Astolfi 1994].

As dificuldades relacionadas às condições de Brockett para estabilidade assintótica são o controle variante no tempo [Pomet et al. 1992, Teel et al. 1995, Godhavn and Egeland 1997, Rehman et al. 2011], controle não



**Figura 5. Coordenadas do robô móvel diferencial.**

suavizado [Astolfi 1994, Sjørdalen 1993, Canudas de Wit and Sjørdalen 1992] e leis de controle híbrido [Lucibello and Oriolo 2001].

Neste trabalho será obtido um conjunto de possíveis sinais de entrada baseados em leis de controle não suavizado obtido através de uma transformação de coordenadas não suavizada. Um método geral de obter leis de controle para sistema não holonômicos através de transformações não suavizadas foi apresentada por [Astolfi 1994]. Neste trabalho considera-se um mapeamento do espaço de estados para o espaço das entradas conforme [Lages 1998]. Este mapeamento que é utilizado para estabilização em um ponto é configurado de maneira que a origem do espaço de estados é tomada assintoticamente estável. Representando o mapeamento como  $g : \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{U}$ ,  $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$  e  $\mathbf{u} \in \mathbf{U}$ , teremos o sistema autônomo

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, g(\mathbf{x}))$$

onde  $f(\cdot, \cdot)$  descrito por (1), é assintoticamente estável na origem. Entretanto, é interessante que se possa estabilizar o robô em qualquer ponto  $\mathbf{x}_r$ , que significa qualquer posição e orientação dada

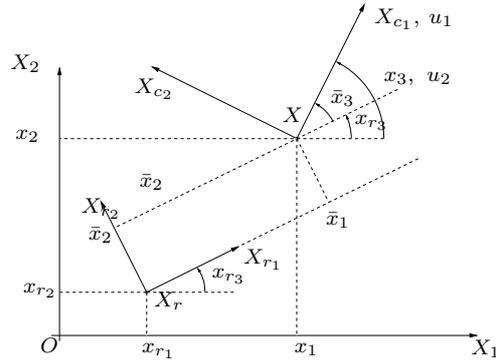
$[x_{r1} \ x_{r2} \ x_{r3}]^T$ . Esta definição pode ser aperfeiçoada através da transformação de coordenadas  $\bar{\mathbf{x}}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r)$ , obtida através da definição de um novo frame de referência  $X_{r1}X_{r2}$  na posição de referência  $[x_{r1} \ x_{r2}]^T$  com um ângulo  $x_{r3}$ , conforme mostrado na figura 6. Assim, a transformação de coordenadas de  $X_1X_2$  para  $X_{r1}X_{r2}$  consiste em uma translação e uma rotação do ângulo  $x_{r3}$ . É de fácil verificação que  $\bar{x}_3 = x_3 - x_{r3}$ . Então, a mudança de coordenadas  $\bar{\mathbf{x}}(\cdot, \cdot)$  é obtida pela transformação

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(x_{r3}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_r) \quad (2)$$

onde  $\mathbf{R}(x_{r3})$  é uma matriz de rotação 2-D, ou seja,

$$\mathbf{R}(x_{r3}) = \begin{bmatrix} \cos x_{r3} & \sin x_{r3} \\ -\sin x_{r3} & \cos x_{r3} \end{bmatrix}$$

Conseqüentemente, se o sistema  $\dot{\bar{\mathbf{x}}} = f(\bar{\mathbf{x}}, g(\bar{\mathbf{x}}))$  é estável em  $\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$ , então  $\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, g(\mathbf{x}))$  é estável em  $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ . Desta forma, para estabilizar o sistema para qualquer



**Figura 6. Coordenadas do robô em relação a um sistema referencial.**

ponto arbitrário  $x_r$  conforme uma lei de controle  $g$  que guia o sistema para a origem, basta utilizar  $g(\bar{x})$ .

Considerando uma mudança de coordenadas [Lages and Hemerly 1998],

$$e = \sqrt{\bar{x}_1^2 + \bar{x}_2^2} \quad (3)$$

$$\psi = \text{atan2}(\bar{x}_2, \bar{x}_1) \quad (4)$$

$$\alpha = \bar{x}_3 - \psi. \quad (5)$$

o modelo do sistema (1) pode ser reescrito na forma

$$\begin{cases} \dot{e} = u_1 \cos \alpha \\ \dot{\psi} = u_1 \frac{\sin \alpha}{e} \\ \dot{\alpha} = -u_1 \frac{\sin \alpha}{e} + u_2. \end{cases} \quad (6)$$

Então, dada uma candidata a função de Lyapunov

$$V = \frac{1}{2} \lambda e^2 + \frac{1}{2} (\alpha^2 + h \psi^2),$$

pode-se demonstrar que o sinal de entrada  $u(k)$

$$u_1 = -\gamma_1 e \cos \alpha \quad (7)$$

$$u_2 = -\gamma_2 \alpha - \gamma_1 \cos \alpha \frac{\sin \alpha}{\alpha} (\alpha - h \psi), \quad (8)$$

com  $h, \gamma_1, \gamma_2 > 0$ , fazendo (6) assintoticamente estável [Lages 1998]. Notamos que mesmo com o modelo (6) descontínuo na origem, devido a presença de  $e$  no denominador, o sistema em malha fechada não é descontínuo. O termo no denominador é cancelado em malha fechada pois (7) contém  $e$  como fator.

Um vez que  $u_1$  e  $u_2$  foram calculados de acordo com (7) e (8), a velocidade angular das rodas direita ( $\omega_r$ ) e esquerda ( $\omega_l$ ) podem ser obtidas por:

$$\omega_r = \frac{u_1 + u_2 \frac{b}{2}}{r_r} \quad (9)$$

$$\omega_l = \frac{u_1 - u_2 \frac{b}{2}}{r_l} \quad (10)$$

onde  $b$  é a distância entre as rodas e  $r_r, r_l$  são os raios das rodas direita e esquerda. Uma vez que a velocidade angular de cada roda é conhecida, o número de pulsos de controle que precisam ser enviados aos drivers para atuar as rodas direita ( $n_r$ ) e esquerda ( $n_l$ ) pode ser calculado por:

$$n_r = \frac{\omega_r}{2\pi} N_r T \quad (11)$$

$$n_l = \frac{\omega_l}{2\pi} N_l T \quad (12)$$

onde  $N_r, N_l$  são os números de pulsos para gerar uma revolução completa em cada um dos motores e  $T$  é o período de amostragem. A posição do robô pode ser estimada utilizando-se as seguintes expressões de odometria:

$$x_c[k+1] = x_c[k] + \Delta D[k] \cos\left(\theta_c[k] + \frac{\Delta\theta[k]}{2}\right) \quad (13)$$

$$y_c[k+1] = y_c[k] + \Delta D[k] \sin\left(\theta_c[k] + \frac{\Delta\theta[k]}{2}\right) \quad (14)$$

$$\theta_c[k+1] = \theta_c[k] + \Delta\theta[k] \quad (15)$$

onde  $\Delta D$  é o deslocamento linear do robô e  $\Delta\theta$  é o deslocamento angular do robô, dados por:

$$\Delta D[k] = \frac{\left(\frac{n_{pr}}{N_{pr}} 2\pi r_r + \frac{n_{pl}}{N_{pl}} 2\pi r_l\right)}{2} \quad (16)$$

$$\Delta\theta[k] = \frac{\left(\frac{n_{pr}}{N_{pr}} 2\pi r_r - \frac{n_{pl}}{N_{pl}} 2\pi r_l\right)}{b} \quad (17)$$

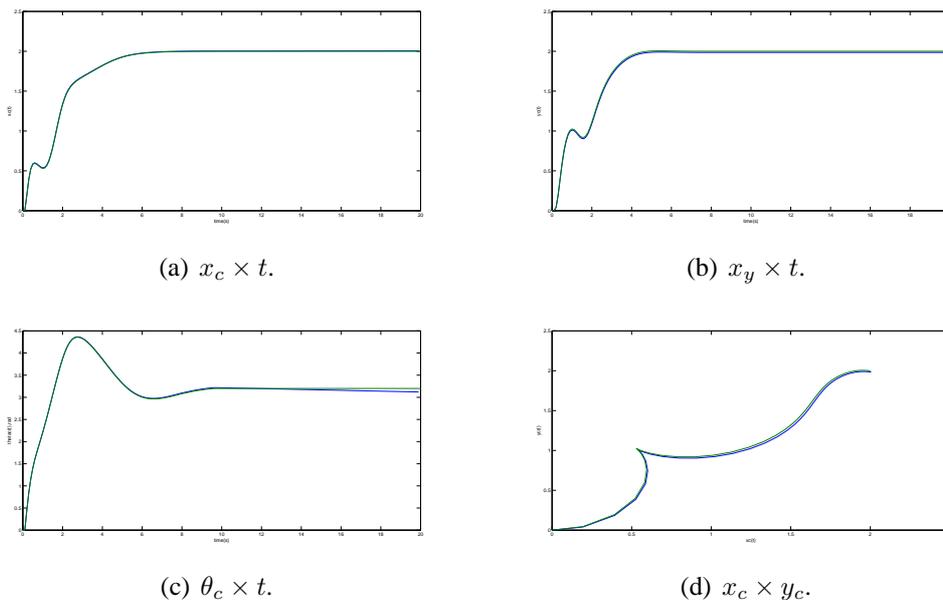
onde  $n_{pr}, n_{pl}$  são os números de pulsos lidos dos *encoders* acoplados nas rodas do robô e  $N_{pr}, N_{pl}$  o número de pulsos por revolução dos *encoders*.

## 5. Resultados de simulação

Duas simulações foram efetuadas utilizando o MATLAB a fim de verificar o comportamento do modelo matemático do robô: estabilização em um ponto e reastreamento de trajetória.

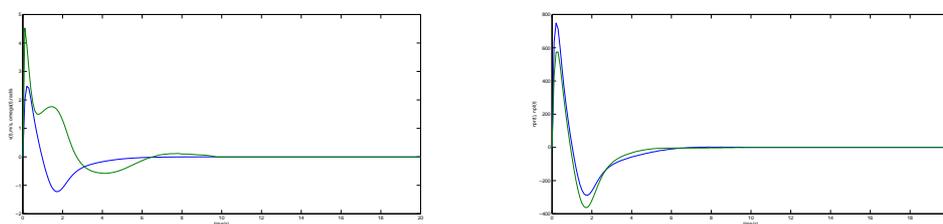
## 5.1. Estabilização em um ponto

Nesta simulação é possível verificar o comportamento do robô quando movendo-se do ponto  $[0, 0, 0]^T$  para o ponto de referência  $[2, 2, \pi]^T$ . A Figura 7(a) mostra o deslocamento do robô no eixo x, a figura 7(b) no eixo y, a figura 7(c) o comportamento do ângulo do robô e a figura 7(d) mostra o deslocamento do robô no plano cartesiano, onde é possível observar que o ponto de referência foi atingido. A saída do sistema é representada na cor azul e a posição estimada do robô na cor verde.



**Figura 7. Trajetória real do robô (azul) e trajetória estimada (verde) para estabilização em um ponto.**

As velocidades linear e angular do robô estão representadas na figura 8(a) e a simulação da leitura dos *encoders* está representada na figura 8(b).



(a) Velocidades linear (azul) e angular (verde). (b) Leitura dos *encoders*: roda direita (azul) e roda esquerda (verde).

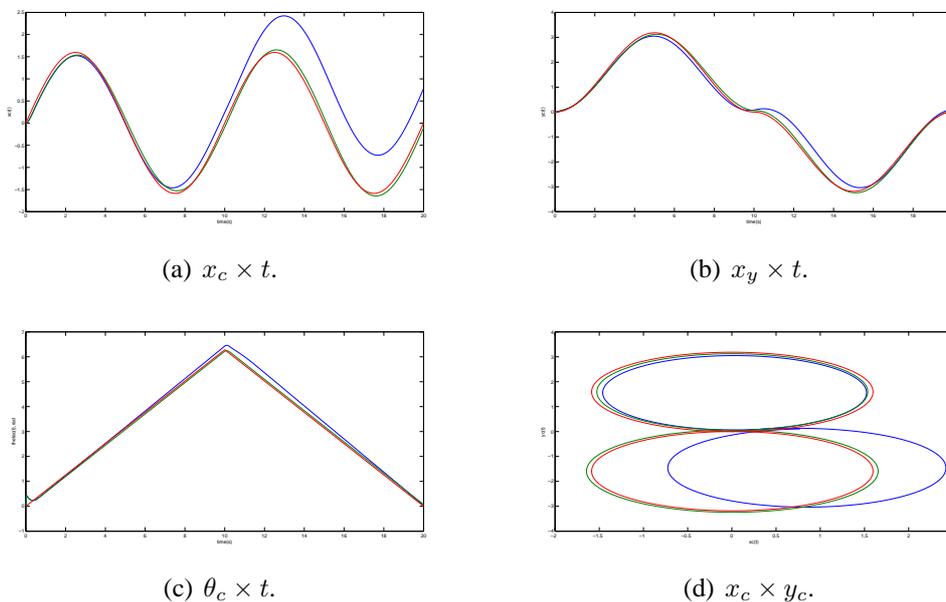
**Figura 8. Velocidades e leitura dos *encoders* para estabilização em um ponto.**

## 5.2. Rastreamento de trajetórias

A fim de verificar a performance do controle do robô quando o mesmo se desloca entre diversos pontos, uma simulação onde o robô segue uma determinada trajetória foi efetuada. Para este caso três curvas principais podem ser observadas: a saída do sistema

(posição real do robô - em azul), a posição estimada do robô (em verde) e a referência de controle (em vermelho). Na figura 9(a) apresenta-se o deslocamento do robô no eixo x e na figura 9(b) o deslocamento do robô no eixo y.

O comportamento do ângulo indica que a orientação do robô mudou em  $2\pi rad$  retornando à orientação inicial como mostrado na figura 9(c). É possível observar que a diferença entre as curvas que representam a orientação do ângulo são inferiores às diferenças nas curvas relacionadas ao deslocamento na trajetória. Na figura 9(d) o deslocamento do robô no plano cartesiano é apresentado, onde é possível observar que a posição estimada tende a seguir a referência de controle, porém a mesma afasta-se da posição real do robô. Este fato está associado ao sistema de medição — odometria — utilizado no robô, sendo que melhores resultados podem ser obtidos na prática através de calibração.



**Figura 9. Trajetória real do robô (azul), trajetória estimada (verde) e referência (vermelho) para rastreamento de trajetória.**

## 6. Conclusão

Neste trabalho foi apresentada a Olimpíada do Conhecimento que é uma competição de robótica promovida pelo SENAI. O desenvolvimento de um robô para participar na competição permitiu que os estudantes que compuseram o time, aprimorassem e adquirissem uma série de novos conhecimentos técnicos de diferentes áreas como mecânica, eletricidade, eletrônica e pneumática.

Para a primeira etapa da competição um sistema de controle em malha aberta foi apresentado. No intuito de aprimorar a performance do sistema de controle, um sistema em malha fechada está sendo desenvolvido para conseguir um melhor desempenho do robô na segunda etapa da competição. As simulações realizadas demonstram que o robô tende a convergir para um ponto desejado quando controlado conforme as expressões de controle propostas. A validação da lei de controle proposta foi efetuada por meio da simulação do modelo matemático.

O time formado, obteve um bom resultado na competição ficando campeão da etapa regional, a figura 10(a) mostra a cerimônia de premiação da etapa regional, com todos os alunos de todas as ocupações da Olimpíada do Conhecimento e a figura 10(b) mostra o time da ocupação de robótica industrial. Os alunos que constituíram o time demonstraram um grande amadurecimento tanto técnico, quanto comportamental no decorrer do período de preparação para a competição. Os trabalhos futuros relacionados consideram a implementação da lei de controle proposta em um CLP verificando os resultados práticos obtidos, permitindo que recursos avançados de programação sejam utilizados, e a preparação do time para competir na etapa nacional.



(a) Alunos de todas as Ocupações.

(b) Time de Robótica Industrial.

**Figura 10. Cerimônia de Premiação da Etapa Regional da Competição**

## Referências

- Akiyama (2012). *Manual Drive para motor de passo modelo AKDMP16-4.2A*. Akiyama Automação. <<http://www.akiyama.com.br>>.
- Astolfi, A. (1994). On the stabilization of nonholonomic systems. In *Proceedings of the 33rd IEEE American Conference on Decision and Control*, pages 3481–3486, Lake Buena Vista, FL. Piscataway, NJ, IEEE Press.
- Brockett, R. W. (1982). *New Directions in Applied Mathematics*. Springer-Verlag, New York.
- Bryan, L. A. and Bryan, E. A. (1997). *Programmable Controllers, Theory and Implementation*, pages 8–10. Industrial Text, USA, 2nd edition.
- Campion, G., Bastin, G., and D'Andréa-Novel, B. (1996). Structural properties and classification of kinematic and dynamical models of wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(1):47–62.
- Canudas de Wit, C. and Sørvalen, O. J. (1992). Exponential stabilization of mobile robots with nonholonomic constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(11):1791–1797.
- FIRST (2012). For inspiration and recognition of science and technology. <<http://www.usfirst.org/>>.

- Godhavn, J. and Egeland, O. (1997). A Lyapunov approach to exponential stabilization of nonholonomic systems in power form. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42(7):1028–1032.
- Lages, W. F. (1998). *Controle e Estimação de Posição e Orientação de Robôs Móveis*. Tese de doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP. Orientador: Elder M. Hemerly.
- Lages, W. F. and Hemerly, E. M. (1998). Smooth time-invariant control of wheeled mobile robots. In *Proceedings of The XIII International Conference on Systems Science*, Wrocław, Poland. Technical University of Wrocław.
- Lucibello, P. and Oriolo, G. (2001). Robust stabilization via iterative state steering with an application to chained-form systems. *Automatica*, 37(1):71–79.
- Microchip (2012). *AN822 - Stepper Motor Microstepping with PIC18C452*. Microchip. <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00822a.pdf>>.
- NRC (2012). National robotics challenge. <<http://www.nationalroboticschallenge.org/joomla/>>.
- PHOTONIC (2012). *Chave Optoeletrônica Reflexiva*. PHOTONIC. <<http://www.photonic.com.br/especs/cha/PHCR359.pdf>>.
- Pomet, J. B., Thuilot, B., Bastin, G., and Campion, G. (1992). A hybrid strategy for the feedback stabilization of nonholonomic mobile robots. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 129–134, Nice, France. IEEE Press.
- Rehman, F., Rafiq, M., and Raza, Q. (2011). Time-varying stabilizing feedback control for a sub-class of nonholonomic systems. *European Journal of Scientific Research*, 53(3):346–358.
- SENAI (2012a). *Descritivo Técnico: Robótica Industrial*. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. <<http://olimpiada.senai.br/oc2012>>.
- SENAI (2012b). Olimpíada do conhecimento. <<http://www.senaiolimpiadas.com.br>>.
- Siemens (2012). *S7-1200 Programmable controller - System Manual*. Siemens. <<http://support.automation.siemens.com/BR/view/en/36932465>>.
- Sørdalen, O. J. (1993). *Feedback Control of Nonholonomic Mobile Robots*. Thesis (dr. ing.), The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.
- Teel, A. R., Murray, R. M., and Walsh, G. C. (1995). Non-holonomic control systems: from steering to stabilization with sinusoids. *International Journal of Control*, 62(4):849–870.