

# APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE CONTROLE DE PROCESSOS CONTÍNUOS E PROCESSAMENTO DE IMAGENS NO FUTEBOL DE ROBÔS

WÂNDERSON O. ASSIS, WESLEY J. GENOVA, MARCELO M. GOMES, ALESSANDRA D. COELHO

*Escola de Engenharia Mauá, Instituto Mauá de Tecnologia  
Praça Mauá, 1, 09580-900, São Caetano do Sul, SP, Brasil*  
wanderson.assis@maua.br, wesleyjgsp@terra.com.br,  
marcelo.gomes@maua.br, alessandra.coelho@maua.br,

**Abstract**— This paper presents the use of technologies applied at robot soccer development, including: design of new structure with encoders for sensing the servomotors speed at robot, mathematical modeling of system and validation, development of PID algorithms for closed loop speed control and semi-automatic calibration system for color identification at robot soccer.

**Keywords**— Robot soccer, PID control, computer vision, image processing.

**Resumo**— Este trabalho apresenta a utilização de tecnologias aplicadas no desenvolvimento do futebol de robôs, incluindo: construção de nova estrutura permitindo a introdução de encoders para monitorar a velocidade dos servomotores do robô, modelagem matemática do sistema e validação, desenvolvimento de algoritmos PID para controle de velocidade fechada e sistema de calibração semi-automática para identificação de cores do futebol de robôs.

**Keywords**— Futebol de robôs, Controle PID, visão computacional, processamento de imagem.

## 1 Introdução

O sistema futebol de robôs vem sendo cada vez mais utilizado em pesquisas acadêmicas porque combina diversas tecnologias da engenharia e da computação ao mesmo tempo que incorpora um elemento de desafio que resulta num atrativo para os alunos e num crescimento no interesse tendo como conseqüência o aprendizado. Essa plataforma oferece suporte à aplicação de muitas técnicas de inteligência artificial e controle de processos, dada a necessidade de percepção do mundo, planejamento de ações etc., e, sobretudo, a integração entre diversas tecnologias, um dos tópicos emergentes na atualidade. Uma característica do futebol de robôs que merece destaque é a interação com o ambiente, que faz com que os algoritmos desenvolvidos necessitem de grande robustez para garantir bom desempenho.

Uma das maiores dificuldades para as equipes de futebol de robôs é a de conseguir fazer com que os robôs apresentem na prática os resultados que seriam previstos ou desejados com a programação (Assis et alli, 2006). O desafio é o de conseguir controlar de forma autônoma todos os movimentos dos robôs. Diante disto, torna-se necessário introduzir e avaliar continuamente novas tecnologias tentando maximizar o desempenho e obter um controle mais eficiente do sistema. Dentro deste contexto, este artigo apresenta as principais inovações propostas pela equipe de pesquisadores do IMT – Instituto Mauá de Tecnologia para a equipe de robôs versão 2006/2007. Estas inovações podem ser assim resumidas:

- construção de novos robôs com estrutura mais robusta e mais compacta; utilização de novos módulos de rádio frequência com maior precisão e maior alcance e introdução de um encoder nas rodas dos robôs para monitorar a velocidade dos servomotores;

- modelagem matemática dos robôs e desenvolvimento de um algoritmo de controle PI (Proporcional Integral) no microcontrolador para garantir melhor precisão no controle de velocidade dos servomotores;
- sistema de calibração semi-automática para identificação de cores do futebol de robôs.

## 2 Construção dos Novos Robôs

A estrutura mecânica dos novos robôs foi construída em material de composto plástico, *CIBA – TOOL* e usinado em máquina CNC. A Figura 1 ilustra o desenho da base de suporte dos robôs. A principal característica é a introdução de barreiras laterais para garantir uma melhor fixação das baterias. Sobre a base foram fixados dois suportes para os servomotores conforme ilustrado na Figura 2. Nestes suportes foram introduzidas ranhuras onde deverá se encaixar o sensor que será utilizado no encoder.

Figura 1. Modelo da Base de Suporte dos Novos Robôs.

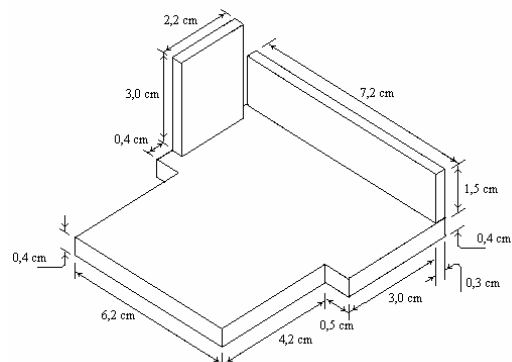
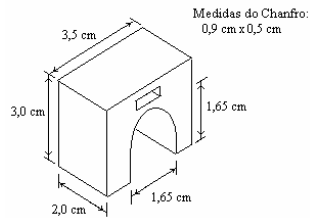


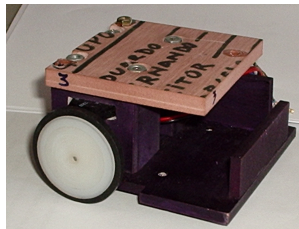
Figura 2. Suporte para o Servomotor dos Novos Robôs.



Uma base será montada sobre estes dois suportes para permitir apoiar as novas placas de circuito eletrônico e ao mesmo tempo evitar que as trilhas destas placas sejam curto-circuitadas devido ao contato com o material metálico das baterias. As rodas dos robôs foram fabricadas de Nylon e possuem diâmetro de 3 cm. Um O-ring de borracha também foi utilizado para evitar que as rodas patinem. A estrutura resultante é ilustrada na Figura 3.

O controle da movimentação dos robôs é conseguido por servomotores DC fabricados pela Faulhaber, modelo 1516E012S com tensão nominal de 12V e com uma redução interna de 41:1.

Figura 3. Estrutura Mecânica dos Novos Robôs



O sistema de transmissão por rádio frequência (RF) utiliza módulos TX2 e RX2 de 433.92 MHz da Radiometrix que trabalham com alimentação de 2,2 a 6 V e 3,0 a 6,0 V respectivamente. Estes modelos apresentam elevada taxa de transmissão de 160 kbps e grande alcance que chega a 300 m conforme especificações no catálogo do componente, embora apresentem duas desvantagens: custo mais elevado e dimensões relativamente grandes.

O circuito de transmissão completo inclui regulador de tensão para 5 V, conversor RS232 / TTL, módulo transmissor de RF (TX2) além de antena de 50  $\Omega$  da Radiometrix.

Para monitorar a velocidade dos motores a equipe desenvolveu um encoder nas rodas dos robôs. Para isto utilizou-se material adesivo com listras, sendo este fixado nas rodas, e um sensor óptico (*Reflective Object Sensor*) OPB708 da Optek fixado na estrutura mecânica do robô que permite detectar com boa precisão deslocamentos angulares de cerca de 22,5°. O circuito básico do encoder é ilustrado na Figura 4 que mostra também a estrutura montada do encoder, roda e motor.

O circuito de recepção do robô inclui microcontrolador PIC 18F1320 da Microchip, módulo receptor RX2 da Radiometrix, circuito integrado L298N (*Dual Full Bridge Driver* – Modelo Multiwatt15 de

15 pinos), saída PWM para motores, circuito de alimentação com baterias de 9 V, sensor da Optek e regulador de tensão (7805L). O robô completo construído é ilustrado na Figura 5 inclusive mostrando a capa construída com fenolite e com *design* gráfico obtido com o uso de material adesivo.

Figura 4 – Circuito Eletrônico do Encoder  
(a) Estrutura do Sensor de Objeto Refletivo  
(b) Circuito Eletrônico Básico

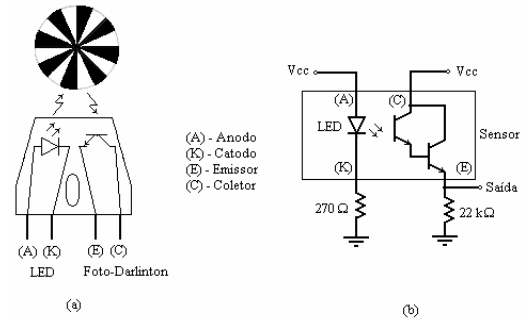
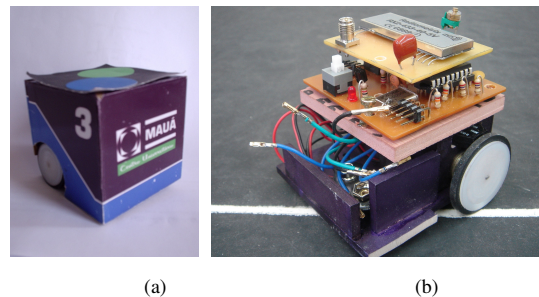


Figura 5 – Robôs Versão 2006/2007  
(a) Vista externa (b) Vista interna

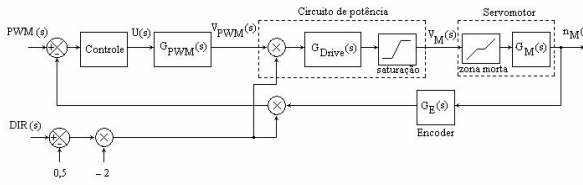


### 3 Modelagem Matemática dos Robôs

Para permitir otimizar o controle de velocidade dos robôs impôs-se como objetivo inicial efetuar a modelagem matemática completa. O modelo de controle de velocidade de cada um dos servomotores do robô pode ser obtido conforme diagrama de blocos ilustrado na Figura 6. Observa-se que o sistema apresenta duas entradas: um byte definido como PWM e um bit DIR. A entrada PWM é um valor entre 0 e 15 que corresponde à referência de velocidade desejada para o servomotor. A entrada DIR define o sentido de acionamento do servomotor (sentido horário para DIR = 1 ou anti-horário para DIR = 0). Estas informações PWM e DIR são obtidas no microcontrolador continuamente monitorando as informações de controle enviadas pelo computador por meio dos módulos de RF. Uma unidade de controle será adicionada em série para produzir o controle U(s).

Segue a modelagem dos componentes do diagrama de blocos, respectivamente conversor PWM ( $G_{PWM}(s)$ ), circuito de potência ( $G_{Drive}(s)$  com saturação), servomotor ( $G_M(s)$  e zona morta) e encoder ( $G_E(s)$ ).

Figura 6. Modelo Matemático do Sistema de Controle de Velocidade dos Servomotores dos Robôs



### 3.1 Conversor PWM ( $G_{PWM}(s)$ )

O conversor PWM (*Pulse Width Modulation*) é desenvolvido por meio de programação no microcontrolador. Sua função é monitorar o sinal de controle  $U(s)$  produzindo um sinal  $V_{PWM}(s)$  onde a largura de pulso é proporcional à amplitude do sinal de controle. O conversor pode ser modelado como um sistema de primeira ordem como:

$$G_{PWM}(s) = \frac{K_{PWM}}{T_{PWM}s + 1} \quad (3.1)$$

onde  $K_{PWM}$  é o ganho estático do conversor e  $T_{PWM}$  sua constante de tempo. O ganho  $K_{PWM}$  permite converter o valor máximo do sinal de controle  $U(s)$  (255) para o máximo valor de tensão produzida no microcontrolador (5V) o que resulta em  $K_{PWM} = 5/255$  V. A constante de tempo pode ser estimada considerando que no desenvolvimento do algoritmo no microcontrolador obteve-se PWM com frequência de 505 Hz, o que significa que o tempo de resposta é de cerca de  $T_{PWM} = 2\text{ms}$ .

### 3.2 Módulo Amplificador ( $G_{DRIVE}(s)$ )

O acionamento é efetuado por um *drive* constituído de amplificador de potência em configuração ponte completa (circuito integrado L298N) com resposta muito rápida, podendo seu modelo matemático ser simplificado como:

$$G_{DRIVE}(s) = K_{DRIVE} \quad (3.2)$$

O circuito produz tensão de saída sobre o servomotor de  $V_M(s) = 18$  V quando acionado por sinal  $V_{PWM}(s)$  fixo em 5V resultando em  $K_{DRIVE} = 18/5$ . O circuito apresenta tensão de saída limitada em  $\pm 18$  V (saturação). Observa-se também que a tensão média nominal de 12 V será obtida no servomotor quando aplicamos sinal PWM com valor médio  $V_{PWM} = 3,333$  V na entrada do módulo de potência, ou ainda, utilizamos valor  $U(s) = 170$  na entrada do conversor PWM.

### 3.3 Servomotor ( $G_M(s)$ )

O servomotor pode ser modelado matematicamente produzindo a seguinte função de transferência (Assis, 1997):

$$G_M(s) = \frac{n_M(s)}{V_M(s)} = \frac{\frac{K_t}{L_a \cdot J}}{s^2 + \frac{R_a}{L_a}s + \frac{K_e K_t}{L_a J}} K_{RED}(s) \quad (3.3)$$

onde  $K_t$  é a constante de torque,  $K_e$  é a constante de força contra-eletromotriz,  $L_a$  é a indutância do rotor,  $R_a$  é a resistência do rotor,  $J$  é a inércia do rotor e  $K_{RED}(s)$  é a relação de redução do redutor. Consultando o catálogo do fabricante do servomotor obtemos os parâmetros  $L_a = 1200 \mu\text{H}$ ,  $R_a = 115 \Omega$ ,  $K_t = 6,42 \text{ mNm/A}$ ,  $K_e = 0,672 \text{ mV/rpm}$ ,  $J = 0,21 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$  e  $K_{RED}(s) = 1/41$  resultando em:

$$G_M(s) = \frac{n_M(s)}{V_M(s)} = \frac{254,7619 \times 10^6 / 41}{s^2 + 95,8333 \times 10^3 s + 171,2 \times 10^3} \quad (3.4)$$

### 3.4 Encoder ( $G_E(s)$ )

Para modelar o encoder devemos analisar o funcionamento do contador de pulsos programado no microcontrolador. Será utilizado um contador de 8 bits que permite monitorar a velocidade a cada intervalo de tempo  $T_E = 0,2$  s. Para velocidade nominal de 414,634 rpm após redutor e considerando a configuração do encoder ilustrada na Figura 5 resulta em 22 incrementos no contador. Assim podemos representar o encoder por um sistema de primeira ordem onde o ganho  $K_E = 22/414,634 = 0,053 \text{ rpm}^{-1}$  dado por:

$$G_E(s) = \frac{K_E}{T_E s + 1} \quad (3.5)$$

### 3.5 Função de Transferência ( $G(s)$ )

Para determinar a função de transferência resultante devemos considerar o sentido de rotação do motor selecionado pela entrada DIR. Inicialmente desprezando o encoder podemos obter a relação  $n_M(s)/U(s)$  dada por:

$$\frac{n_M(s)}{U(s)} = \frac{219,307 \times 10^6 \cdot (DIR - 0,5)(-2)}{(s^2 + 95,8333 \times 10^3 s + 171,2 \times 10^3)(s + 1000)} \quad (3.6)$$

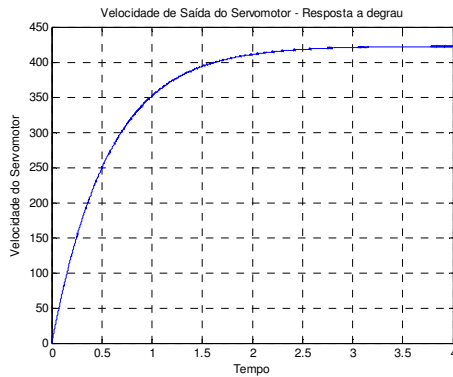
Note que na equação (3.6) a entrada DIR (0 ou 1) produz funções de transferência equivalentes mas com polaridades invertidas, resultando portanto em inversão na velocidade de rotação.

Para analisar a coerência dos resultados foi efetuada uma simulação assumindo  $DIR = 0$  e um degrau com amplitude  $U(s) = 170$ . Obteve-se a forma de onda ilustrada na Figura 7 onde pode ser observado que a velocidade estabilizou-se em 422,3 rpm, a qual muito se aproxima do valor esperado de 414,634 rpm conforme catálogo do fabricante, apresentando erro de -1,8%.

Considerando a introdução do encoder a função de transferência global que relaciona o número de pulsos produzidos pelo encoder ( $n_{pulsos}(s)$ ) com o valor da referência de entrada  $U(s)$  resulta em:

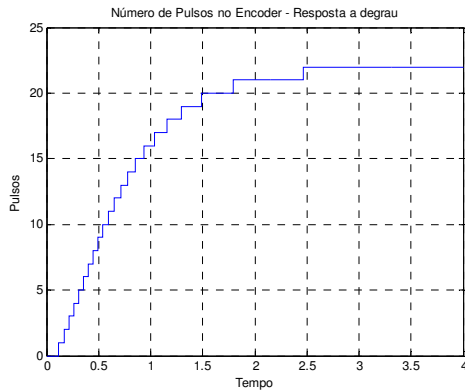
$$\frac{n_{pulsos}(s)}{U(s)} = \frac{58,181 \times 10^6 \cdot (DIR - 0,5)(-2)}{(s^2 + 95,8333 \times 10^3 s + 171,2 \times 10^3)(s + 1000)(s + 5)} \quad (3.7)$$

Figura 7. Velocidade de Saída do Servomotor – Resposta a Degrau



A Figura 8 ilustra a simulação do sistema (3.7) assumindo  $DIR=0$  e degrau com amplitude  $U(s)=170$ , onde observa-se o número de pulsos (sempre inteiro) produzido pelo contador do encoder.

Figura 8. Número de Pulsos Produzidos pelo Encoder - Resposta a Degrau



#### 4 Controle de Velocidade dos Servomotores

Para o controle de velocidade foram projetados os compensadores  $G_{C1}(s)$  e  $G_{C2}(s)$  apresentados nas equações (3.8) a (3.10) a seguir.

$$G_{C1}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \frac{(s+1/T_I)}{s} = 14,3 \frac{(s+1,7864)}{s} \quad (3.8)$$

$$G_{C2}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{1/T_I}{s} + T_d s = 37,7011 + \frac{57,49}{s} + 3,0895s \quad (3.9)$$

$G_{C1}(s)$  é um controlador PI onde o zero ( $1/T_I$ ), inverso da constante de tempo de integração, foi escolhido de forma a eliminar matematicamente o efeito do pólo mais instável do sistema (3.7) e o ganho  $K_p$  foi projetado aproximando o sistema a um de 2ª ordem e utilizando o lugar das raízes de forma a obter relação de amortecimento de  $\xi = 0,6$ . (Assis, 1997) (Ogata, 1997). A resposta a degrau obtida com o controlador PI e em malha aberta são apresentados

na Figura 9. Observa-se que para referência  $PWM(s) = 22$  o número de pulsos produzidos no encoder estabiliza em torno de 2,2 s com eliminação do erro estacionário do sistema. Na Figura 10 apresenta-se a resposta de velocidade do sistema nas mesmas condições citadas acima, onde observa-se *overshoot* em torno de 19,2%, muito próximo do esperado, máximo pico em 0,975 s e estabilização em 433,3 rpm.

Figura 9. Comparativo Malha Aberta e Controle PI

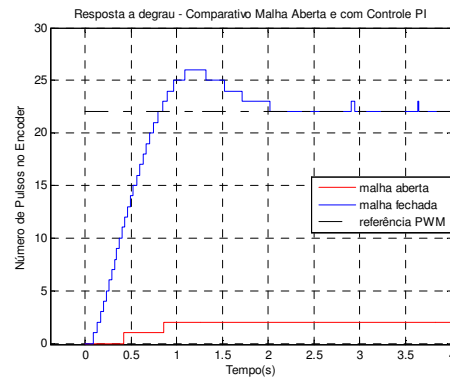
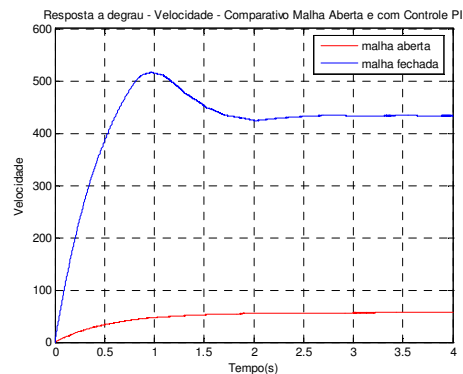


Figura 10. Comparativo de Velocidade em Malha Aberta e PI



$G_{C2}(s)$  é um controlador PID projetado utilizando a seguinte estratégia:

- o sistema foi aproximado a sistema de 2ª ordem;
- um dos zeros do controlador foi ajustado de forma a eliminar matematicamente o efeito do pólo mais instável do sistema;
- o ganho  $K_p$  e o segundo zero do compensador foi determinado impondo como meta relação de amortecimento  $\xi = 0,7$  e frequência natural não-amortecida 1.5 vezes maior que no sistema com controle PI, no caso resultando em  $\omega_n = 6,25$  rad/s.

A resposta a degrau obtida com o controlador PID e em malha aberta são apresentados de forma equivalente nas Figuras 11 e 12. Observa-se que para referência  $PWM(s) = 22$  ocorre o efeito *windup* devido saturação no valor produzido pelo módulo de potência (18 V) o que provoca uma piora no desempenho na resposta de número de pulsos produzidos

no encoder e de velocidade. Além disso a zona-morta do sistema contribui para a oscilação que permanece entre 22 e 23 pulsos após 2,465 s e a velocidade mantém-se praticamente constante a partir de 3,5 s apresentando *overshoot* em torno de 32,3%.

Figura 11. Comparativo Malha Aberta e Controle PID

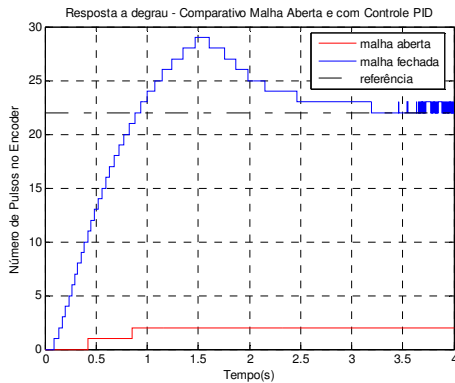
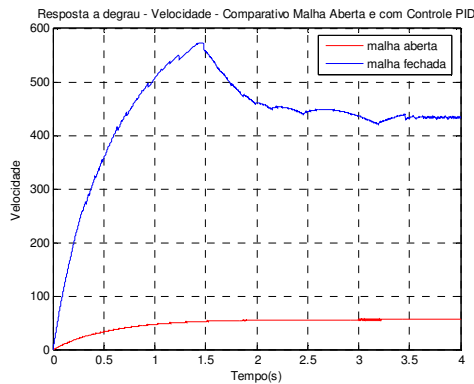


Figura 12. Comparativo de Velocidade em Malha Aberta e PID



Todos os resultados foram obtidos utilizando apenas simulação, mas considerando várias não-linearidades do sistema, geração de PWM em alta frequência e considerando todos os componentes apresentados no modelo, sendo portanto uma boa aproximação para a resposta esperada na prática.

Para desenvolver o controle por microcontrolador o controlador  $G_{C1}$ , que apresentou melhor desempenho, deve ser discretizado. Utilizando aproximação bilinear (Tustin) com tempo de amostragem  $T=0,2$  s obtém-se a função de transferência discreta (3.10) e a equação recursiva (3.11) (Ogata, 1987) (Phillips, 1995):

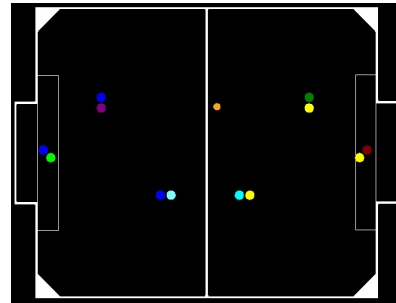
$$G_{C1}(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = 16,85 \frac{(z-0,6973)}{z-1} \quad (3.10)$$

$$u(K) = u(KT-1) + 16,85e(KT) - 11,7495e(KT-1) \quad (3.11)$$

## 5 Visão Computacional com Sistema de Calibração Automática

O sistema de visão computacional permite monitorar a imagem do campo (Figura 13) e identificar as cores de cada elemento (robôs e bola) de forma a permitir localizá-los e com isso permitir efetuar o controle autônomo (Gomes et alli, 2006) (Gonzales & Woods, 2003).

Figura 13. Representação da Imagem do Campo



Como não é permitida a intervenção humana durante a partida, variações imprevistas de luminosidade no sistema prejudicam o desempenho do time, sendo por isso muito dependente do discernimento e da experiência humana durante o processo de calibração. Uma técnica de calibração semi-automática foi desenvolvida para obter-se maior autonomia e melhor desempenho, sendo possível executá-la automaticamente durante o jogo, além de apresentar um bom resultado na calibração inicial, diminuindo o trabalho do usuário. Este algoritmo utiliza vários filtros e rotinas permitindo a eliminação de cores indesejadas além de áreas que estejam fora do tamanho requisitado. A partir de cores previamente cadastradas é possível isolar as áreas de interesse, além de reconhecer qual cor representa cada elemento, associando-os de maneira correta e relacionando-os com a posição de cada robô dentro do campo.

Essencialmente, é uma especificação de um sistema de coordenadas tridimensionais, onde para cada cor só haverá um único ponto.

Dois padrões foram utilizados. Primeiramente um orientado para *hardware*, o RGB (*red, green, blue*), utilizado em monitores e câmeras de vídeos. Posteriormente foi usado um modelo comumente usado no processamento de imagens, o HSV (matiz, saturação, valor). Este padrão é usado no projeto para a identificação das cores, pois é menos suscetível a erros, ou perdas dos objetos devido à variação de luminosidade.

Várias técnicas foram utilizadas no desenvolvimento do algoritmo sendo que podemos destacar o crescimento de região por agregação de pixels. Nesta técnica o crescimento de região começa com um ou alguns pontos chamados de "semente". A partir das informações das cores destes é estabelecida uma faixa de tolerância para a variação dos parâmetros referentes ao padrão escolhido.

Em seguida ocorre uma verificação dos pontos imediatamente mais próximos da “semente” e caso eles estejam dentro da gama de valores aceitos, eles serão agregados ao conjunto de pontos, e caso contrário serão descartados. Far-se-á a mesma coisa para os novos pontos e isso ocorre até que nenhum ponto verificado esteja dentro dos valores pré-estabelecidos.

Para a idealização do algoritmo foram desenvolvidas as seguintes técnicas:

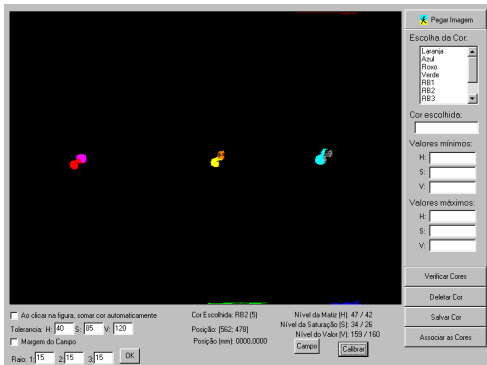
- utiliza-se um filtro para eliminar as cores que tenham seu valor abaixo de um valor pré-definido;

- após utilizar a técnica do crescimento de região um procedimento conta o número de pontos (pixels). Para executar este procedimento deve-se evitar o posicionamento dos robôs próximo às bordas, pois algumas cores muito claras, próximas ao branco, como o amarelo, podem ser confundidas com as linhas do campo formando regiões extremamente grandes. Comparando-se o número de pontos da região com uma determinada tolerância, podemos reposicionar os robôs no campo de forma às regiões estarem próximas ao tamanho especificado;

- um sistema de “votos” incluindo algumas cores previamente cadastradas verifica a “proximidade” de H, S e V de cada *pixel* em relação ao filtro anterior com as cores registradas. Se a cor do ponto está dentro da faixa estipulada de tolerância, atribui-se um “voto” a ela, relacionando-o ao índice da cor; caso contrário é desconsiderado a importância do mesmo. Desta maneira a cor que apresentar a maior quantidade de “votos” representa a cor do time, a cor secundária de cada robô e a cor da bola;

- o mesmo sistema verifica a posição de cada robô, conforme a posição de cada um na imagem. Para isso os robôs devem ser posicionados de forma a só haver um em cada região (área do goleiro, defesa e ataque) conforme Figura 14. Atribui-se um “voto” ao índice que a representa. Em seguida comparam-se os “votos” de cada região, desconsiderando-se aquela que possui a maior quantidade de “votos”, obtendo-se a cor referente à posição do robô no campo.

Figura 14. Imagem Final Processada e Regiões de Interesse



A combinação destas técnicas permite fazer a associação de cores e a identificação semi-automática de cada elemento (Figura 14). O programa consegue

com facilidade isolar as áreas de interesse se as tolerâncias de H, S e V estiverem ajustadas de acordo com a luminosidade. Tratam-se na verdade de pequenos ajustes para ambientes muito escuros ou muito claros. Poucas vezes aparecem na imagem processada regiões que não sejam as de interesse.

## 6 Conclusões

O artigo apresentou a construção de uma nova estrutura para o time de futebol de robôs do Instituto Mauá de Tecnologia. O novo *design* inclui estrutura mais robusta, novos componentes eletrônicos com maior precisão e encoder para monitorar a velocidade dos servomotores do robô. Utilizando o encoder mostrou-se a modelagem de todo o sistema e o projeto de controladores que permite desenvolver no microcontrolador o controle de velocidade em malha fechada. Simulações ilustram a eficiência dos controles desenvolvidos apesar das não-linearidades presentes no sistema.

Um sistema de visão computacional com calibração semi-automática foi também desenvolvido, permitindo obter-se maior autonomia e melhor desempenho, sendo possível executar o algoritmo mesmo durante o jogo, e melhorando a eficiência da calibração inicial e a precisão na detecção dos elementos no campo.

## Referências Bibliográficas

- Assis, W. O, Coelho, A. D., Gomes, M. M., Martins, B. A., Machado, C. S. S., Labate, C. G., Calasso, D. F., Conde Filho, J. C., Genova, W. J. (2006) Construção de Robôs Jogadores de Futebol CSBC 2006 – XXVI Congresso da Sociedade Brasileira de Computação – Jornada de Robótica Inteligente, Julho.
- Assis, W. O. (1997) Análise comparativa de estratégias de controle para acionamentos industriais usando chopper. Dissertação de Mestrado, EFEI- Escola de Engenharia de Itajubá, Dezembro, 1997.
- Gomes, M. M., Assis, W. O, Coelho, A. D., Labate, C. G., Calasso, D. F., Conde Filho, J. C., Genova, W. J. (2006) Construção de Robôs Jogadores de Futebol – Parte 4 – A Visão Computacional *Revista Mecatrônica Fácil*, n° 31, Novembro/Dezembro.
- Gonzales, R. C. and Woods, R. E. (2003) Processamento de Imagens Digitais. Editora Edgard Blucher Ltda, SP.
- Ogata, K. (1997) Engenharia de Controle Moderno, Ed. Prentice Hall do Brasil, 1997.
- Ogata, K. (1987) Discrete Time Control Systems, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Phillips, C. L. (1995) Digital Control System Analysis and Design, Englewood Cliffs, Prentice Hall.