



CONTROLE DIGITAL DE DESLOCAMENTO E DE VELOCIDADE DE UMA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVEL

Rudi Henri van Els

Carla Cavalcante Koike

Gustavo Bernardes Sousa

Thiago Craesmeyer Bellardi

Sergio Silveira dos Santos Filho

Guilherme Caribé de Carvalho

Sadek C. Absi Alfaro

Universidade de Brasília – UnB. Grupo de Automação e Controle – GRACO, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, UnB, Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70910-900, Brasília, DF, Brasil. Email: caribe@enm.unb.br

Resumo. *Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de controle digital para controle de deslocamento e de velocidade de uma plataforma robótica móvel, destinada à monitoração remota de ambientes através de visão estéreo. A plataforma foi construída na forma de um triciclo, em que somente duas rodas são tracionadas por motores de corrente contínua, sendo a terceira livre para girar em torno de dois eixos. O acionamento desses motores é feito através de sinais PWM, cujas porcentagens de ciclo ativo são definidas em função de um controlador digital PI implementado em software. Esse é baseado na realimentação de velocidade angular dos eixos de tração. A sintonia do controlador PI foi realizada empiricamente, baseada nas curvas de resposta dos motores. A programação do algoritmo de controle foi feita de forma a aproveitar todos os recursos de hardware disponíveis no microcontrolador, visando a atingir uma relação otimizada entre tempo de processamento e tempo de amostragem do controlador. Obtiveram-se como resultados a implementação de um controlador digital PI de velocidade para motores DC, implementado em uma arquitetura de microcontrolador, e o desenvolvimento de um sensor digital de velocidade de baixo custo. Foram realizados em laboratório testes variados com diferentes tipos de piso, inclinações e obstáculos terrestres que comprovaram a robustez do sistema de controle desenvolvido e aplicado na plataforma robótica.*

Palavras-chave: *controle digital, microcontrolador, robótica móvel.*

1. INTRODUÇÃO

A aplicabilidade de robôs móveis vem crescendo a cada dia, impulsionada pela evolução tecnológica da microeletrônica e dos avanços computacionais, extrapolando as aplicações industriais. Como exemplos disso podem ser citados o veículo Sojourner da missão *Mars Pathfinder* da NASA de exploração do solo marciano, o robô humanóide ASIMO P3 da Honda e o robô adaptado a ambientes hostis Andros Mark V-A1, fabricado pela Remotec.

Um dos motivos principais para o desenvolvimento de robôs móveis é a sua utilização para realizar tarefas em locais de difícil acesso ao homem ou, ainda, que possam oferecer perigo a sua integridade física. Um dessas tarefas é a inspeção visual de dutos e/ou galerias subterrâneas, como, por exemplo, redes de água e de esgoto e tubulações de gás e petróleo. Com o objetivo de desenvolver um robô móvel para fins de inspeção de dutos, Pasmadjian (1999) implementou uma plataforma robótica móvel não holonômica com dois graus de liberdade, dotada de estrutura de

suporte para duas câmaras. Adotaram-se motores de corrente contínua (DC) para fornecer o torque necessário à movimentação da plataforma. Nesse trabalho, somente o acionamento dos motores foi efetuado, sem nenhum sistema de controle.

Com o intuito de dar continuidade ao desenvolvimento da plataforma robótica mencionada no parágrafo anterior, o presente trabalho teve por objetivo desenvolver e implementar o sistema de controle para o robô.

2. A PLATAFORMA ROBÓTICA

A plataforma robótica móvel é constituída por uma estrutura mecânica no modelo triciclo com duas rodas tracionadas por motores DC e uma roda livre para girar em dois eixos. A plataforma possui também dois manipuladores *pan-tilt* acionados por motores de passo dedicados para movimentação independente de duas câmaras. A Fig. (1) apresenta a configuração atual do protótipo.



Figura 1. Plataforma Robótica Móvel

A arquitetura de controle da plataforma, em sentido amplo, é modelada em quatro camadas funcionais que implementam os diversos mecanismos de todo o equipamento.

A Camada 1 assume todas as funções de controle e gerenciamento do deslocamento da plataforma e da orientação dos manipuladores das câmaras. Essa camada é implementada em um hardware embarcado constituído de uma placa de controle baseado num microcontrolador 80C552 (Controlware, 1996). A Camada 2 se processa em um microcomputador tipo PC e tem por objetivo realizar a transformação de coordenadas entre os sistemas de coordenadas do usuário e do robô. A Camada 3 garante a conectividade com o robô através da Internet, usando o protocolo TCP/IP. A Camada 4 implementa a interface com o usuário em um ambiente gráfico desenvolvido em linguagem JAVA.

O foco deste trabalho foi o desenvolvimento da camada 1, em especial o subsistema de controle digital para controlar velocidade e deslocamento da plataforma.

3. HARDWARE DO SISTEMA DE CONTROLE

O elemento central do hardware do sistema de controle é uma placa de desenvolvimento baseado no microcontrolador 80c552, que além de controlar a movimentação dos motores DC, também é responsável por: (a) controlar a orientação dos suportes das câmaras; (b) implementar o protocolo de comunicação com a Camada 2; (c) supervisionar as demais funções de tratamento de sensores e (d) gerenciar os recursos disponíveis do hardware. Além da placa de desenvolvimento, foram desenvolvidos sensores de rotação para cada eixo de tração, circuitos de condicionamento de sinal dos sensores e um circuito acionador (*Driver* de Potência) dos motores DC.

3.1 Driver de Potência

O acionamento dos motores DC é realizado com um *driver* de potência controlado pela técnica de modulação de largura pulsos (PWM). Sua implementação foi realizada utilizando o circuito integrado LM298 (National Semiconductor, 1992), o qual recebe como entradas tensões de alimentação dos motores e do circuito lógico, dois sinais PWM e dois sinais para controle da direção dos motores. Esse componente foi selecionado, pois aceita tensões de alimentação de até 46V, permite até 2A de saída por canal, possui uma baixa tensão de saturação e alta imunidade a ruído.

O sinal de excitação PWM, gerado para cada motor pelo microcontrolador, é amplificado no circuito integrado, tendo como saída um sinal modulado na mesma frequência, com potência amplificada, responsável pela excitação dos motores DC. Estes se comportam inerentemente como um filtro “passa-baixa” para esses sinais. Cada motor DC possui uma caixa de redução de 120:1 para o acoplamento ao eixo de tração de cada roda.

3.2 Sensor de velocidade angular

Como todos os elementos do projeto, o *hardware* do sistema controlador de deslocamento e posição foi também implementado com material de baixo custo.

O sensor de velocidade angular das rodas é implementado com um disco de metal com 100 ranhuras simétricas e um sensor de feixe ótico, conectado ao sistema gerenciador CW552 através de um circuito de condicionamento do sinal.

O disco ranhurado de metal foi fixado de forma solidária ao eixo de tração da roda e o sensor ótico foi fixado ao *chassis* da plataforma de forma a ser sensibilizado pelo disco ranhurado. A Fig. (2) mostra como o dispositivo sensor foi acoplado ao eixo de tração da roda.

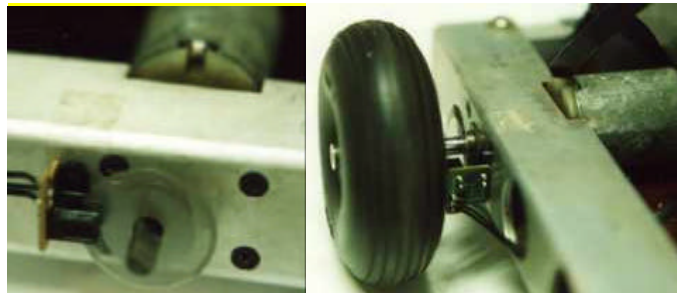


Figura 2. Elemento sensor do controlador de deslocamento e velocidade.

3.3 Circuito para Condicionamento do Sinal

O circuito para condicionamento do sinal é composto basicamente por um Amplificador Operacional implementado em um circuito integrado (LM358N) e um inversor com histerese 74LS14. O circuito eletrônico está apresentado na Fig.(3).

O sensor ótico é composto por um fototransistor que é excitado por um Diodo Emissor de Luz (LED) quando não há obstrução entre eles. O disco ranhurado, solidário ao eixo do motor, é o elemento que irá causar essa obstrução ao feixe luminoso. Essa interrupção capturada pelo sensor é enviada a um circuito dedicado ao condicionamento do sinal para níveis lógicos TTL. O condicionamento se faz necessário, uma vez que o sinal periódico produzido pelo sensor optoacoplador, apesar de estar na frequência desejada (100x a frequência do eixo da roda), assemelha-se a uma onda senoidal com valor médio de aproximadamente 3 V e amplitude variável com a frequência. Esse tipo de sinal não é adequado ao processamento digital, necessitando ser convertido a um trem de pulsos com níveis TTL, como pode ser observado na Fig. (4).

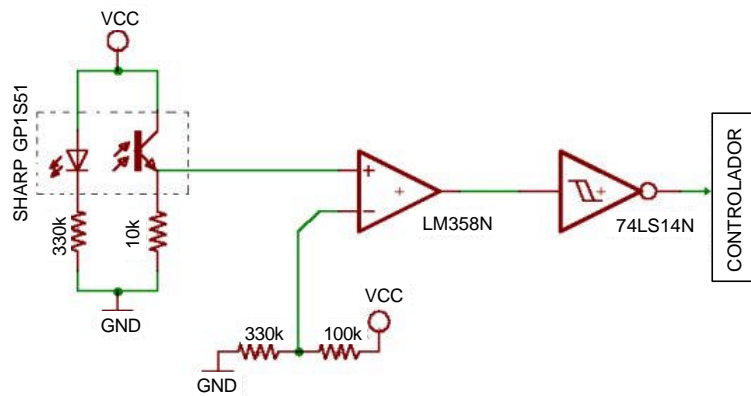


Figura 3. Esquema Elétrico do Circuito de Condicionamento do Sinal.

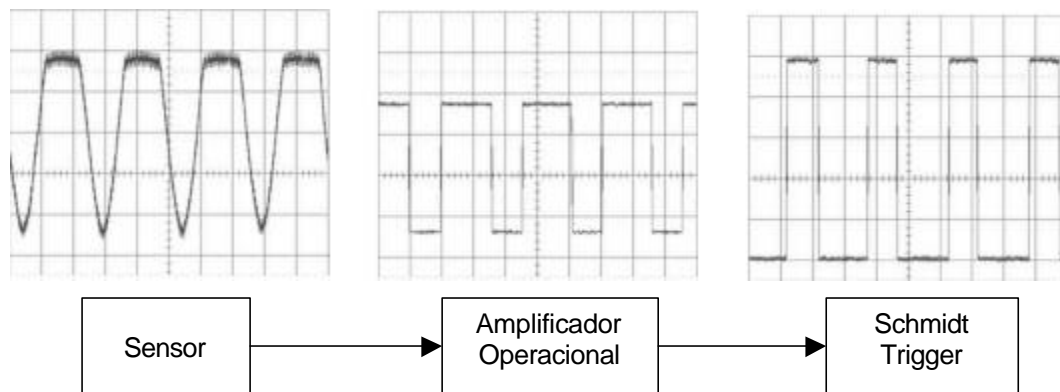


Figura 4. Tratamento do sinal do sensor (1V/div vertical, 20ms/div horizontal).

O amplificador operacional apresentado no circuito está atuando como um comparador cuja tensão de referência foi estabelecida por volta de 3V e tensões de alimentação de +5 e 0V. Dessa forma o valor de tensão do trem de pulso emitido pelo sensor ótico que for superior à referência é grampeado em aproximadamente 5V e o sinal inferior à referência é grampeado a 0V. Contudo, o sinal esperado - uma onda quadrada - na saída do comparador fica prejudicado por três fatores. (a) Limitação do *Slew Rate* (taxa máxima de variação de tensão na saída) do amplificador; (b) Tensões do sinal não atingem satisfatoriamente níveis digitais TTL. Para solucionar essas deficiências, optou-se por colocar em série ao comparador um dispositivo inversor com histerese *Schmidt Trigger*. Esse dispositivo garante tensões de saída de 5V e 0V e alto *Slew Rate*. A Fig. (4) evidencia a evolução no tratamento do sinal pelo circuito condicionador. com 1V/div vertical e 20ms/divisão horizontal.

O circuito foi testado em bancada e funcionou satisfatoriamente até a frequência de 20Khz. Como a velocidade máxima da plataforma não passa dos 40 pulsos por segundos, não há possibilidade erro de medida, uma vez que a frequência máxima esperada para o sinal encontra-se dentro da faixa de frequência do sensor.

3.4 A Placa de Controle CW552

O dispositivo encarregado do controle e do gerenciamento de recursos, embarcado no robô, é uma placa controladora CW552 dotada de um microcontrolador Philips 80C552, da família dos processadores 8051, cujas principais características relevantes à execução deste trabalho, em sentido amplo, são: duas saídas PWM, cuja porcentagem do ciclo ativo é determinada por um registrador de 8 bits para cada saída, duas entradas de interrupção externa, dois relógios internos, 256 bytes de memória RAM interna, 64 Kbytes de memória RAM externa, 64 Kbytes de ROM,

interface RS232 para comunicação serial e três portas de 8 bits com possibilidade de leitura e escrita. O sistema funciona com *clock* de 11.059200 MHz podendo ser ampliado até 30 MHz.

As saídas PWM são programadas com o uso de registradores especiais dentro do microcontrolador. O ciclo ativo é determinado com um registrador de 8 bits que possibilita uma resolução de 1/256 unidades. A frequência do PWM (PWM_F [Hz]) é controlada por um registrador (PWMP) do microcontrolador que permite variar a frequência entre 21684 Hz e 84 Hz, conforme Eq.(1).

$$PWM_F = \frac{clock}{2 \cdot (1 + PWMP) \cdot 255} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

O microcontrolador tem uma estrutura interrupção que permite a implementação do programa de controle de forma bem eficiente e garantindo os requisitos de processamento em tempo real do sistema.

A monitoração de velocidade foi implementada usando as interrupções externas do microcontrolador. O microcontrolador recebe da placa condicionadora dois trens de pulso referentes aos sensores de cada um dos dois motores DC, que excitam suas duas entradas de interrupção externa. O sistema foi configurado para gerar uma interrupção a cada descida do trem de pulso na entrada. Através dessas interrupções o sistema gerenciador processará o algoritmo de controle que retornará à interface de potência dos motores DC os sinais de PWM adequados para que se obtenha a velocidade angular desejada no eixo de tração de cada roda.

4. NECESSIDADE DO CONTROLE DE DESLOCAMENTO E VELOCIDADE

Apesar das especificações serem as mesmas para ambos os motores constatou-se que ao enviar um sinal PWM de mesma frequência e modulação para cada motor, através do *driver* de potência, esses não respondiam de maneira igual ou, ao menos, satisfatória.

Convém ressaltar que os motores utilizados na plataforma são motores de baixo custo que, embora com mesmas especificações, possuem inerentes diferenças internas que são refletidas no seu comportamento dinâmico. Dessa forma, tornou-se imprescindível para se obter uma resposta desejada do conjunto motor-redução-eixo, a elaboração e implementação de um elemento sensor para fechar uma malha de controle sobre o sistema.

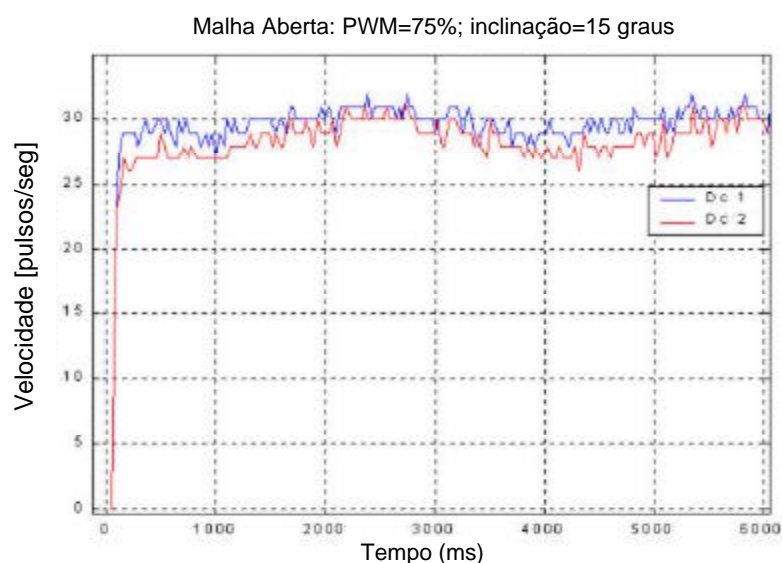


Figura 5. Resposta dos Motores em Malha Aberta em um plano inclinado.

Os gráficos das Fig.(5) e Fig.(6) abaixo, mostram um teste realizado que evidencia a distorção entre as respostas de cada motor e a falta de robustez do sistema a perturbações. Para tanto procedeu-se a coleta dos valores em duas situações em malha aberta. Na primeira, o sistema foi acionado para transladar sobre um plano inclinado de 15° (Fig.5) e na segunda o mesmo procedimento foi realizado com uma carga adicional, simétrica aos motores, de 10N sobre o robô (Fig.6). Para o acionamento dos motores nessas situações utilizou-se um ciclo ativo constante de 75% da onda PWM. Pode-se, através desses gráficos, verificar claramente as diferenças nas respostas dos motores a um mesmo sinal de excitação (Fig.5). Verifica-se também a falta de robustez do sistema, em função da alteração de carga sobre o chassi, pela queda do valor médio da velocidade em ambos os motores em face à nova condição de carga. (Fig. 6). Em ambos os gráficos pode-se observar a grande variação (15%) do valor da velocidade em torno do valor médio. Essa variação ainda pode evoluir uma vez que o sistema da forma como está não possui nenhuma robustez à variação de condições como: obstáculo no solo, irregularidades do piso, inclinações ou declives ou, como mostrado no teste, ao aumento da carga.

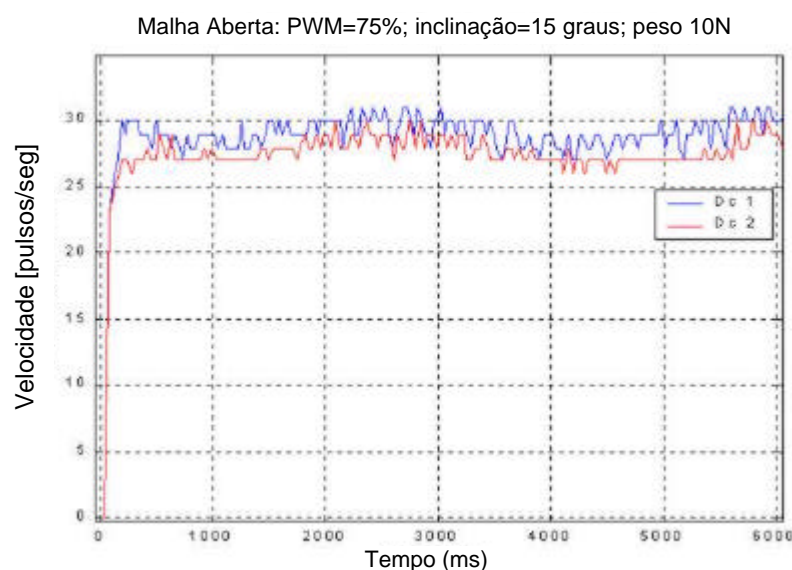


Figura 6. Resposta dos Motores em Malha Aberta em um plano inclinado com carga adicional de 10N.

5. SOFTWARE DO SISTEMA DE CONTROLE

O *software* implementado no robô foi desenvolvido em linguagem C usando o *Small Device C Compiler* (SDCC) para o microcontrolador 80c552.

Devido às limitações físicas do hardware que restringe o tamanho máximo do código executável de 32Kbytes, à limitação de espaço de memória para armazenamento de variáveis de 128 bytes e à limitação de velocidade de processamento do CPU de 11MHz, fez-se necessário um especial cuidado na parte de elaboração de *software* para permitir o máximo aproveitamento dos recursos disponibilizados pelo microcontrolador.

O *software* desenvolvido implementa 4 processos básicos em tempo real:

- Processo 1 – Protocolo de Comunicação com o PC
- Processo 2 – Controle de posicionamento e orientação dos motores de passo
- Processo 3 – Monitoração de velocidade das rodas
- Processo 4 – Algoritmo de controle de deslocamento e velocidade

O protocolo de comunicação (Processo 1) tem a menor prioridade na hierarquia acima estabelecida e é implementado no programa principal. Esse processo basicamente recebe referências (velocidade, deslocamento e orientação) enviadas pelo servidor (Camada 2) para todos os motores

da plataforma, armazenado-os num buffer e passando na forma de parâmetros globais para os processos de controle.

Os processos de controle de posicionamento e o algoritmo de controle de velocidade são implementados a partir da interrupção do temporizador principal do microcontrolador. Esses processos foram otimizados para garantir um tempo de execução mínima e de forma a aproveitar o máximo os recursos de alocação de variáveis e otimização do compilador – C.

O processo para monitorar velocidade das rodas foi implementado com o uso das interrupções externas do microcontrolador. Os pulsos de velocidade das duas rodas, depois de serem tratados pelo circuito de condicionamento de sinais, são aplicados nas duas interrupções externas do microcontrolador. Assim, é possível medir-se, com precisão de 1ms, o intervalo de tempo entre os pulsos geradores de interrupção e, conseqüentemente, a velocidade angular de cada roda.

5.1 Algoritmo de Controle de Velocidade

O algoritmo de controle foi inserido na rotina de tratamento da interrupção do temporizador do microcontrolador. O programa utiliza um dos relógios (TIMER0) internos do sistema para fornecer uma base de tempo fixa (de 1ms) para várias rotinas de controle do sistema, inclusive para a rotina de controle de velocidade e deslocamento.

Entende-se por pulso cada interrupção captada pelo sensor ótico, tratada e enviada à entrada de interrupção externa do sistema gerenciador.

A primeira rotina do algoritmo de controle é responsável pela amostragem da velocidade real (em pulsos/segundo) do eixo de tração da roda. Para tanto, essa rotina calcula o tempo entre cada interrupção, de forma a determinar a velocidade real em pulsos/segundo. A amostragem da velocidade real é feita a cada interrupção externa, que é habilitada a cada pulso do trem de pulsos provindo da placa condicionadora.

Essa mesma rotina é também responsável pelo critério de parada do motor, quando esse executou o deslocamento desejado em pulsos.

Uma vez aferido o valor real da velocidade, uma segunda rotina, calcula a diferença entre o valor da velocidade referência (requerida pelo usuário) e o valor da velocidade real. Essa diferença é mutiplicada por um ganho (k) e somada ao valor anterior enviado ao registrador PWM. Esse novo valor PWM com características proporcionais e integrais é então enviado ao registrador PWM para correção da velocidade real. Esse procedimento é repetido a cada 50ms para garantir um menor tempo de ajuste da velocidade real por realimentação. Esse raciocínio está sumarizado na Eq. (2).

$$\begin{aligned}
 Erro(n) &= Vel_{real}(n) - Vel_{ref} \\
 PWM(n+1) &= PWM(n) + K \cdot Erro(n)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

O diagrama de blocos apresentado na Fig. (7) apresenta a malha de controle elaborada e implementada para o controle da velocidade e do deslocamento acoplada a restante do sistema. O bloco *Sistema* recebe como entrada um valor de 8 bits referente ao registrador de PWM do sistema gerenciador e apresenta como saída, a rotação do eixo de tração da roda que é captada pelo sensor. Dessa forma, tem-se que é sobre esse bloco que a malha de controle está fechada.

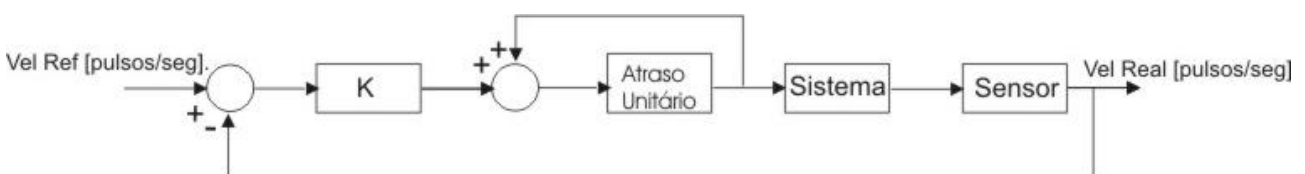


Figura 7. Diagrama de blocos do sistema completo

5.2 Sintonia do Controlador

A sintonia do controlador foi realizada empiricamente com base na resposta transitória dos motores. Os parâmetros sob observação foram o valor do ganho (K), da Fig. (8) e a frequência de execução do algoritmo de controle, ou seja, a taxa de correção da velocidade angular. Além disso, para avaliação da robustez do controlador, foram feitos testes com aumento da carga sobre o motor e redução da tensão de alimentação.

Na Fig. (8) pode-se observar a variação da resposta transitória em função do valor de ganho K.

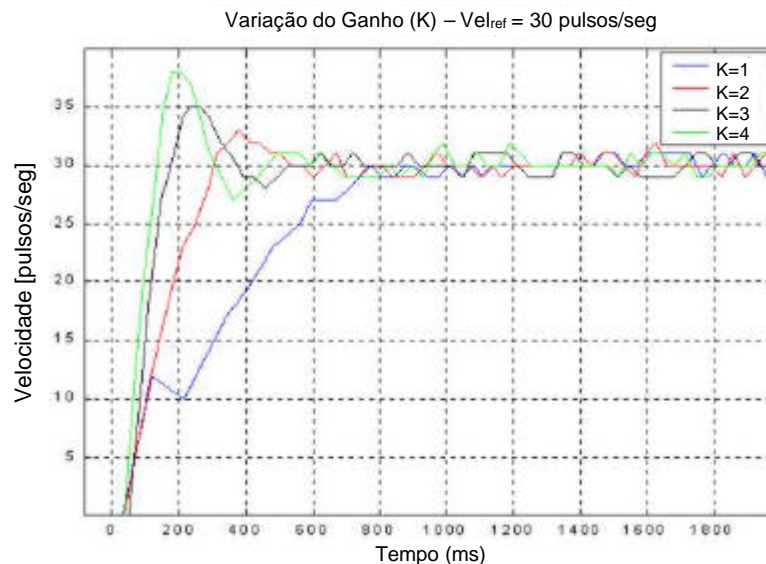


Figura 8. Resposta dos motores à variação do ganho K em um plano inclinado de 15°

Através do gráfico acima, pode-se verificar o tempo de subida, sobre-sinal e tempo de estabilização para esse sistema em função do valor do ganho K da malha de controle.

Com base nessas avaliações, optou-se por utilizar o valor de ganho K=2, uma vez que o sobre-sinal da resposta para esse ganho é mais adequado que para valores maiores de K. Isso se deve pela necessidade de um deslocamento suave de uma plataforma que estará dotada de câmeras para visão. O valor de K=1 é visivelmente inadequado pela lentidão de sua resposta.

Para o período de amostragem da malha de controle ajustou-se um valor de 50ms, i.e, a cada intervalo de tempo nesse valor o sistema estará ajustando a velocidade real. É evidente que quanto menor o período de amostragem mais rápida será o tempo de subida da resposta transitória ao degrau, contudo o processamento das demais funções em tempo real da plataforma fica prejudicado devido a uma sobrecarga do processador.

Contudo, pôde-se verificar que o valor empírico ajustado para o ganho e período de amostragem tendo como base a resposta transitória ao degrau se mostrou adequado para a aplicação da plataforma.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Implementou-se o controle eficiente da velocidade angular do eixo de cada roda tracionada do robô. A Fig. (4) apresenta o sinal produzido pelo sensor de uma das rodas, em decorrência do movimento controlado do eixo a partir de uma referência de velocidade de 20 pulsos/seg. Pode-se observar, a partir da figura, que o sinal produzido apresenta uma frequência média de 20 Hz.

O controlador implementado apresentou um bom desempenho, tornando as respostas ao degrau dos motores DC bastante comportadas. Para evidenciar esse fato, realizaram-se testes no sistema controlado, com as mesmas condições utilizadas nos testes em malha aberta, produzindo-se as respostas apresentadas nas Fig. (9) e Fig. (10). Nestes, o sistema foi excitado por um degrau de 30 pulsos/seg na velocidade de referência.

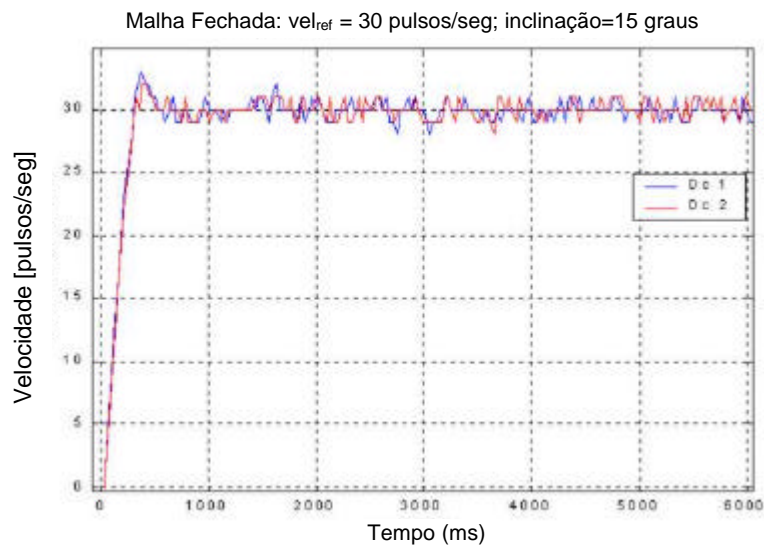


Figura 9. Resposta dos Motores em Malha Fechada em um plano inclinado a 15°.

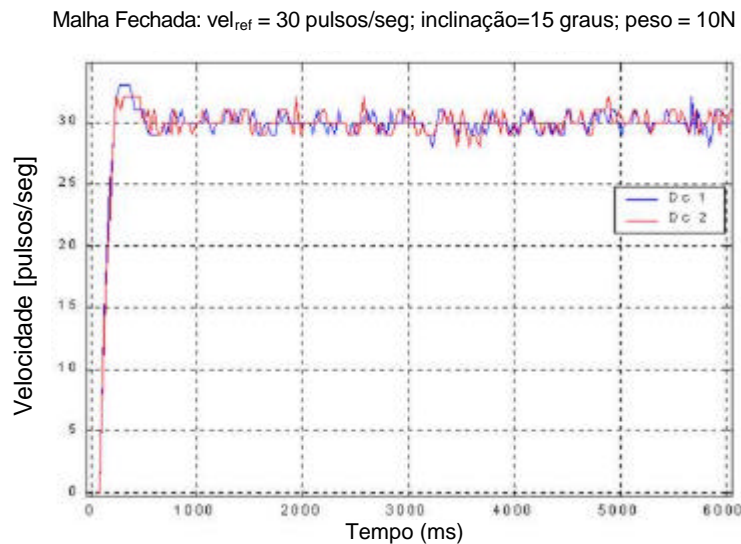


Figura 10. Resposta dos Motores em Malha Fechada em um plano inclinado a 15° com carga adicional de 1kg.

Os gráficos acima apresentam a correção dos problemas relacionados aos gráficos das Fig. (5) e Fig. (6) em malha aberta, i.e., o sistema de controle projetado e implementado corrige a velocidade instantânea para o valor da velocidade referência Fig. (9) e proporciona robustez às mudanças de condições operacionais Fig. (10). Foram ainda realizados em laboratório variados testes ao exemplo deste, com diferentes tipos de piso, inclinações e obstáculos terrestres que comprovaram a robustez esse sistema em malha fechada nessa aplicação.

Ressalta-se ainda algumas características e limitações do sistema de controle desenvolvido como a resolução de 2.7mm no deslocamento linear, esse valor é determinado pelas ranhuras do disco ranhurado do sensor e pelo raio do pneu da plataforma. Além disso, verificou-se que para esse sistema um intervalo de controle de velocidade entre 0.63 rad/s e 2.20 rad/s no eixo de tração das rodas e um erro de posicionamento de 8% em trajetórias retilíneas.

Convém evidenciar que o algoritmo controlador ainda pode ser otimizado no que diz respeito ao conjunto: tempo de subida, sobre-sinal e tempo de estabilização. Contudo, a estrutura mecânica atual age como gargalo no sistema, e não permite o reflexo dessas otimizações no aumento da precisão no deslocamento e na velocidade translacional da plataforma. Uma estrutura mecânica mais elaborada justificaria os esforços na otimização do sistema de controle, que para condições e necessidades atuais já atua de forma satisfatória.

7. CONCLUSÕES

Obtiveram-se como resultados a implementação de um controlador digital PI de velocidade para motores DC, implementado em uma arquitetura de microcontrolador, e o desenvolvimento de um sensor digital de velocidade de baixo custo. Foram realizados em laboratório testes variados com diferentes tipos de piso, inclinações e obstáculos terrestres que comprovaram a robustez do sistema de controle desenvolvido e aplicado na plataforma robótica.

8. REFERÊNCIAS

UNITED STATES. NASA. Mars Exploration. Technology. **Rovers**. Disponível em: <<http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/rover/sojourner.html>> Acesso em: 21 dez. 2001.

PASMADJIAN, A. **Robô Móvel para Inspeção de Dutos de Petróleo com Telecomando e Visão**. Relatório Final de Bolsa DTI – RHAÉ – CNPQ, Universidade de Brasília, 1999.

CONTROLWARE. **Sistema de desenvolvimento CW552**. Disponível em: <<http://controlware.cdt.unb.br>> Acesso em 03 jan. 2000.

NATIONAL SEMICONDUCTOR. **LM18298 Dual Full-Bridge Driver**. Linear Components. Datasheet, 1992

DIGITAL CONTROL OF DISPLACEMENT AND SPEED OF A MOBILE ROBOTIC PLATFORM

Rudi Henri van Els

Carla Cavalcante Koike

Gustavo Bernardes Sousa

Thiago Craesmeyer Bellardi

Sergio Silveira dos Santos Filho

Guilherme Caribé de Carvalho

Sadek C. Absi Alfaro

The University of Brasilia – UnB: Automation and Control Group – GRACO

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, UnB, Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70910-900, Brasilia, DF, Brasil. Email: caribe@enm.unb.br

This work describes the development of a digital control system applied to speed and displacement control of a mobile robotic platform, aimed to remotely monitoring environments through stereo vision. The platform was built up using a tricycle layout, where two wheels are driven by DC motors and the third is a fly wheel, free to rotate around two axes. The DC motors are excited through PWM signals, whose duty cycle percentages are defined as a function of the digital PI controller, which is implemented in software. The tuning of the PI controller was made empirically base on the motor's response curves. The control algorithms were programmed in such a way as to maximize the use of the micro-controller hardware resources, in order to optimize the ratio between the processing and the sampling times. The results of this work were: a digital PI speed controller for DC motors using micro-controller architecture and the development of a low cost digital angular speed sensor. The resulting controller proved to be robust enough for the demands of the robotic platform.

Digital control, micro-controller, mobile robotics