

GPSDi

Relatório Final

Projeto de Sistema de Controle para Motores DC Aplicado a Robôs Pedagógicos

Orient.: Otacílio de Araújo Ramos Neto (mestre) - SIAPE: 02047945

Bolsista: Gabriel Bandeira Carneiro - Mat.: 20131B371007

Bolsista: Sammara Beserra Nunes - Mat.: 20131B371023

Brasil

Agosto de 2015

Sumário

1	INTRODUÇÃO	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	Efeito Hall	5
2.2	Método dos Mínimos Quadrados	5
2.3	Função de Chaveamento	7
2.4	Diagrama de Blocos	7
3	METODOLOGIA	9
4	RESULTADOS	16
5	DISCUSSÃO	18
6	CONCLUSÃO	19
	Referências	20

Resumo

Os robôs que empregam sistemas de navegação que utilizam motores para acionamento de esteiras estão sujeitos a um *drift* durante o deslocamento da máquina. O problema ocorre, em parte, devido ao desbalanceamento das correntes que circulam nos motores dos robôs. Para solucionar a questão, pode-se recorrer a implementação de sistemas de controle que compensem o desbalanceamento das correntes de forma que os eixos dos motores girem na mesma velocidade impedindo assim o *drift* do robô. A construção do sistema de controle implica em realizar medições de grandezas físicas que caracterizam o sistema e de posse dessas grandezas fazer a caracterização do sistema físico utilizando o ajuste de curvas. Depois de identificado, é preciso implementar o controlador P, PI ou PID que fará o ajuste da variável de entrada para o controle da variável de saída baseado nas medições desta e no valor de referência. Este relatório descreve a aplicação do procedimento anterior em um pequeno robô pedagógico visando eliminar o *drift* que existe no deslocamento dele. O robô possui dois motores, sensores de corrente e um sistema de controle de corrente baseado em uma ponte H e onda modulada em PWM. O controlador para este robô foi implementado como um software que executa em um dos microcontroladores dele. O valor de referência utilizado foi a integral da corrente circulando em um dos motores de forma que o outro tenha a sua corrente ajustada, fazendo com que a integral dela torne-se igual a do primeiro motor.

Palavras-chave: sistema de controle, robô pedagógico, motor de corrente contínua.

1 Introdução

O uso de motores de corrente contínua em robôs que utilizam esteiras ou rodas é bastante adequado devido a grande disponibilidade de modelos de baixa potência como também de baixo custo. Mais ainda, a facilidade de implementar sistemas de controle para máquinas elétricas de corrente contínua faz com que estas sejam usadas frequentemente em aplicações que exigem ampla faixa de velocidades ou de controle preciso da saída do motor ([FITZGERALD; JR.; UMANS, 2006](#), p. 342). Contudo, para obter o máximo desempenho, o sistema de controle não pode limitar o acionamento a apenas ligar e desligar os motores sob pena do robô deslocar-se a uma velocidade constante. Além disso, se não for possível aumentar ou diminuir a velocidade angular dos eixos, o robô só poderá realizar curvas acionando apenas uma esteira. Para evitar estes problemas é comum o acionamento dos motores aplicando uma tensão variável nos seus terminais. Esta apresenta-se como um trem de pulsos que, quando em nível alto, fornece energia para o motor do robô. Ao aplicar o trem de pulsos aos terminais do motor, o valor eficaz de tensão obtido corresponde a um nível mais baixo do que a tensão de pico. Desta forma, é possível acionar os motores a uma velocidade inferior a que é obtida quando o valor de tensão correspondente ao pico da onda quadrada é aplicado de forma contínua.

Utilizar a onda quadrada no acionamento dos motores pode apresentar bons resultados, porém, alguns cuidados devem ser tomados. Muitos motores não funcionam bem quando são submetidos a tensões constantes de 40% ou 50% abaixo do valor da tensão nominal de funcionamento, mas apresentam bons resultados se uma onda quadrada com ciclo de trabalho de 25% ou mais for aplicada aos terminais do mesmo ([MCCOMB, 2011](#), p.221, 247). Além disso, uma tensão eficaz capaz de fazer o robô deslocar-se a uma determinada velocidade pode não conseguir realizar a mesma tarefa quando o robô transportar uma carga com peso diferente. Soluções simples, como aumentar a largura do pulso da onda quadrada indiscriminadamente com o objetivo de aumentar a velocidade do robô, podem causar efeitos adversos como picos de corrente e interferir no funcionamento dos sistemas eletrônicos mais sensíveis, tal como microcontroladores ou processadores.

Conhecer todos os efeitos decorrentes das correntes drenadas pelos motores do robô é importante para um bom funcionamento do projeto. Levantar a demanda de corrente é necessário para estimar a vida útil das baterias. Além disso, a identificação dos causadores de picos de corrente auxilia na solução dos problemas de mal funcionamento dos microprocessadores do robô. Tanto a demanda como os picos são fortemente influenciados pelo torque requerido dos motores, sendo este um dos principais componentes na corrente total consumida. Uma técnica inadequada de partida pode também causar altas correntes de estator ([BARATIERI; PINHEIRO, 2012](#)). Finalmente, ao alimentar os motores com

um trem de pulsos, a potência máxima do sistema de tração pode ser obtida com valores diferentes de corrente e estas são controladas pela frequência da onda quadrada e seu ciclo de trabalho (MCCOMB, 2011, p. 248).

Do que foi apresentado, dois problemas surgem no projeto do sistema de tração de robôs que utilizam motores a corrente contínua. Quais as características da demanda de corrente elétrica dos motores de pequeno porte, quando são submetidos a diferentes condições de operação, seja pelo torque requerido ou pelas características da onda quadrada de alimentação e como atingir a velocidade desejada de deslocamento rapidamente mas sem picos de corrente?

O GPSDi construiu um pequeno robô pedagógico, mas com técnicas que podem ser aplicadas a projetos maiores. Entre os vários sistemas que compõem o robô está o de tração. Este contém, entre outros componentes, esteiras acionadas por motores CC de baixa potência mas com os princípios de sistemas de controle utilizados em projetos de maior porte. O acionamento dos motores está sendo feito por onda quadrada modulada em largura de pulso (Pulse Width Modulation - PWM) controlada por um microcontrolador, o que permite o deslocamento do robô em várias velocidades.

Para que o projeto do sistema de controle obtenha sucesso é necessário a caracterização do funcionamento dos motores quando integrados ao chassi do robô e transportando carga compatível com a carga do projeto concluído. O GPSDi está pesquisando essas características para que o sistema de controle evite sobrecorrentes, principalmente em caso de *stall* de algum dos motores. Dessa forma, espera-se que uma única fonte de alimentação seja usada com segurança, para todos os sistemas do robô, barateando o produto final. Também é necessário o estudo do ciclo de trabalho ideal da onda PWM no projeto pois as tensões de alimentação necessárias para alimentar os microcontroladores ou processadores podem ser maiores do que as tensões de funcionamento dos motores em condições nominais de operação (para máquinas elétricas de pequeno porte). Assim, quando apenas uma única fonte de alimentação estiver disponível, e caso não seja possível a substituição dos motores, estes serão submetidos a uma das seguintes condições de funcionamento:

- Tensão de operação maior que as das especificações do motor;
- Tensão de operação de acordo com as especificações, porém com o uso de um circuito conversor auxiliar gerando perdas de energia;
- Tensão eficaz de operação de acordo com as especificações, porém fornecida por onda quadrada utilizando modulação PWM.

O objetivo do projeto do GPSDi é fazer com que os motores funcionem no último caso das condições de funcionamento de maneira que o *hardware* final seja mais simples e barato.

2 Fundamentação Teórica

As bases teóricas a serem utilizadas nesse projeto consistem no Efeito Hall, no Método dos Mínimos Quadrados para a estimação de parâmetros e o uso de uma fonte de alimentação variável com modulação PWM.

2.1 Efeito Hall

O uso do fenômeno físico conhecido como Efeito Hall para a medição das correntes por meio de sensores baseados nesse efeito é amplamente aplicado devido a sua robustez, baixo custo e versatilidade(POPOVIC, 2010). Os sensores que utilizam Efeito Hall são fundamentados na influência do campo magnético atuando perpendicularmente em um semicondutor por onde circula uma corrente elétrica. Os portadores de carga, quando movendo-se no campo magnético, são submetidos a força de Lorentz, surge então uma tensão chamada de tensão Hall que é induzida no dispositivo em um sentido perpendicular ao fluxo de corrente (PAUN; SALLESE; KAYAL, 2013). A medição da corrente elétrica é feita por meio da aferição da tensão Hall.

2.2 Método dos Mínimos Quadrados

O Método dos Mínimos Quadrados pode ser utilizado para o levantamento do modelo do sistema. Este método foi proposto inicialmente por Karl Gauss para aplicá-lo em seu trabalho de predição das órbitas dos planetas(BRANDOLT, 2002).

O método dos mínimos quadrados determina o melhor ajuste de um modelo aos dados colhidos experimentalmente minimizando o erro dos parâmetros do sistema (BRANDOLT, 2002). A aplicação do método pressupõe que o funcionamento do sistema pode ser modelado como uma equação da forma:

$$y = \beta_0 + x_1\beta_1 + x_2\beta_2 + \dots + x_k\beta_k + \epsilon \quad (2.1)$$

Se o sistema sob observação puder ser descrito como apresentado na equação 2.1 e supondo um modelo com k variáveis de entrada e l observações, pode-se organizar o sistema de equações no formato de uma matriz contendo l linhas, cada uma correspondendo a uma observação, e k colunas, cada uma correspondendo a uma variável. O sistema é

apresentado na equação 2.2.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{l1} & x_{l2} & \dots & x_{lk} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_l \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

A equação 2.2 pode ser escrita de forma compacta como apresentado na equação 2.3.

$$y = Xb + e \quad (2.3)$$

O quadrado dos erros pode ser escrito como $\sum_{i=1}^l e_i^2$. Tomando e' e e como sendo um vetor linha e um vetor coluna dos erros. Escrevendo

$$e = (y - Xb) \quad (2.4)$$

$$e' = (y - Xb)' \quad (2.5)$$

e

$$S(b) = e' \cdot e \quad (2.6)$$

pode-se substituir 2.4 e 2.5 em 2.6 e chegar na equação 2.7.

$$S(b) = y'y - y'Xb - b'X'y + b'X'Xb \quad (2.7)$$

Derivando, igualando a zero e resolvendo para b encontra-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial b} &= -2X'y + 2X'Xb = 0 \\ X'Xb &= X'y \\ b &= (X'X)^{-1}X'y \end{aligned} \quad (2.8)$$

Na equação 2.8 o b corresponde ao vetor de parâmetros do modelo do sistema.

Também é possível realizar o controle sem um total conhecimento de todos os parâmetros do modelo do sistema fazendo uso apenas dos valores medidos pelo Efeito Hall. Este método utiliza uma *lookup table* com valores calculados previamente (SU; DRAKUNOV; OZGUNER, 1992) e é bastante adequado para o uso com microcontroladores, porém, ainda assim, é necessário um conhecimento prévio das características do sistema para que a *lookup table* seja calculada.

2.3 Função de Chaveamento

A função de chaveamento é responsável pelo acionamento dos motores. Este tipo de função apresenta um valor unitário, quando o dispositivo físico está acionado, e 0, quando está desligado. A função é periódica, onde o período T representa o intervalo de repetição do valor de saída. Na figura 1 é apresentada uma função de chaveamento. Esta possui os seguintes parâmetros:

1. O ciclo de trabalho DT (*Duty Cycle*), corresponde a fração do tempo em que a função de chaveamento apresenta a saída acionada. Esta pode ser ajustada para atingir um valor desejado. Para fins de controle o DT é o parâmetro que é modificado. Este processo é conhecido como modulação em largura de pulso (*pulse-width modulation - PWM*).
2. A frequência de chaveamento, dada por $f_{switch} = 1/T$, é na maioria das aplicações constante, mas pode também ser ajustada para propósitos de controle (RASHID, 2001, p.10, 11).

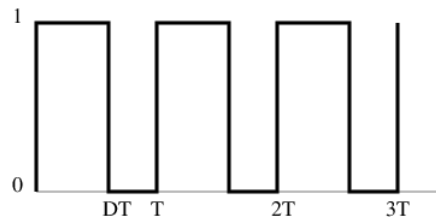


Figura 1: Função de chaveamento.

2.4 Diagrama de Blocos

O diagrama do sistema de controle implementado no Guarabô é apresentado na figura 2. Foi utilizado um sistema com realimentação do valor da corrente que circula pelos motores. O resultado da integral da corrente do motor direito é comparado com a do motor esquerdo e a diferença, chamada aqui de erro, é utilizada como parâmetro de entrada do sistema gerador da onda PWM de controle do motor direito. Deseja-se com isso que a velocidade de giro do motor direito acompanhe a do motor esquerdo.

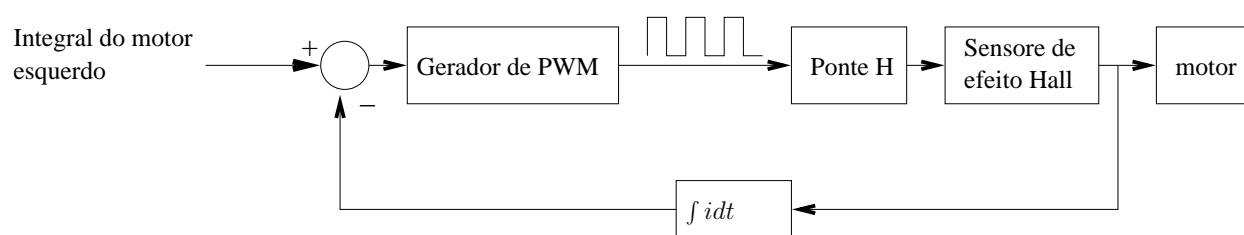


Figura 2: Diagrama de blocos do sistema de controle

3 Metodologia

A metodologia utilizada neste projeto consistiu em excitar os motores utilizando a modulação PWM e realizar medições da corrente que circula por eles. A partir dos valores obtidos das grandezas físicas de entrada e saída é calculada a integral das correntes circulantes nos motores e comparada com um valor de referência. A diferença é então utilizada como realimentação no sistema para ajuste da onda PWM de controle.

O método para obter os dados experimentais consistiu em montar o protótipo do robô, adicionando a este, sensores para aferição das correntes que circulam pelo estator dos motores. O protótipo do robô utilizado nos testes é apresentado na figura 3. Este robô é constituído por:

- Caixa de redução *Tamiya 70097 Twin-Motor Gearbox Kit* montada na configuração 58:1;
- 2 motores Solarbotics RM2;
- Módulo *bluetooth*;
- Microservo;
- Sensor ultrassônico HC-SR04;
- *Freeduino*;
- Arduino Nano;
- Módulo de controle *Pololu Dual MC33926 Motor Driver Shield*;
- Suporte para 4 pilhas AAA;

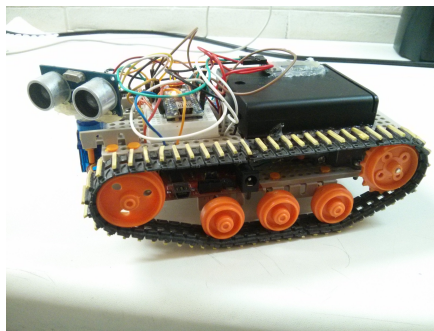


Figura 3: Robô Guarabô.

Para controlar o robô, enquanto são feitas as medições, é utilizando um *software* executando em um computador IBM-PC que envia comandos com o *duty cycle* desejado para o Guarabô. Este mesmo *software* solicita aos instrumentos de medição os valores das grandezas físicas de saída para os parâmetros de entrada. Depois de concluída a caracterização do sistema, foi escrito o *firmware* (*software* embarcado) para realizar o controle da planta objetivando atingir os requisitos de projeto.

Para levantar o comportamento do funcionamento dos motores primeiro foi identificada a frequência de operação da onda PWM gerada no pino 9 pelo Arduino modelo *Freeduino*. A medição foi feita com o auxílio de um osciloscópio e uma imagem da tela do instrumento é apresentado na figura 4. De posse do gráfico, com a informação que o osciloscópio estava configurado em 1 ms/div, pode-se calcular a frequência da onda quadrada, obtendo-se o valor de aproximadamente 500 Hz. O valor está bem próximo do valor de 490 Hz especificado pelo fabricante.

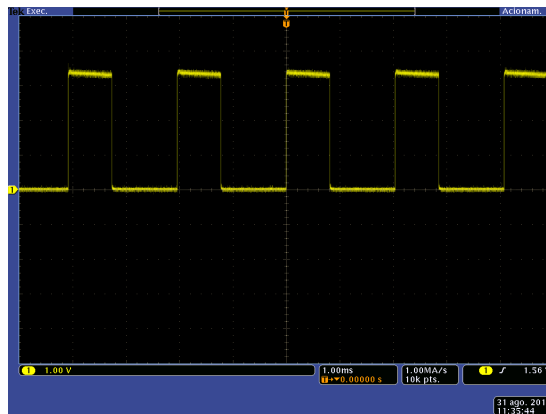


Figura 4: Onda PWM gerada pelo gerador de PWM do Arduino *Freeduino*.

O passo seguinte foi medir o tempo gasto para fazer a conversão de analógico para digital dos valores medidos pelos sensores de corrente. Para isso, foi escrita a seguinte rotina que executa no Arduino responsável por medir as correntes dos motores.

```
void lerAdc(void){
    unsigned int motorl[TAM_VETORM];
    unsigned int motorr[TAM_VETORM];
    while(1){
        digitalWrite(ADCSINAL, LOW);
        motorl[0] = analogRead(A0);
        motorr[0] = analogRead(A1);
        motorl[1] = analogRead(A0);
        motorr[1] = analogRead(A1);
        motorl[2] = analogRead(A0);
        motorr[2] = analogRead(A1);
    }
}
```

```

    motorl[3] = analogRead(A0);
    motorr[3] = analogRead(A1);
    motorl[4] = analogRead(A0);
    motorr[4] = analogRead(A1);
    motorl[5] = analogRead(A0);
    motorr[5] = analogRead(A1);
    motorl[6] = analogRead(A0);
    motorr[6] = analogRead(A1);
    motorl[7] = analogRead(A0);
    motorr[7] = analogRead(A1);
    motorl[8] = analogRead(A0);
    motorr[8] = analogRead(A1);
    motorl[9] = analogRead(A0);
    motorr[9] = analogRead(A1);
    digitalWrite(ADCSINAL, HIGH);
    delay(1);
}
}

```

Esta rotina coloca o valor de 0 V no pino 3 (ADCSINAL), em seguida faz 20 leituras dos valores nos pinos A0 e A1 e, por fim, coloca o valor HIGH (3.3 V) no pino 3. Utilizando um osciloscópio é possível medir o tempo gasto entre as operações de escrever LOW e escrever HIGH no pino. Uma imagem do sinal obtido é apresentada na figura 5.

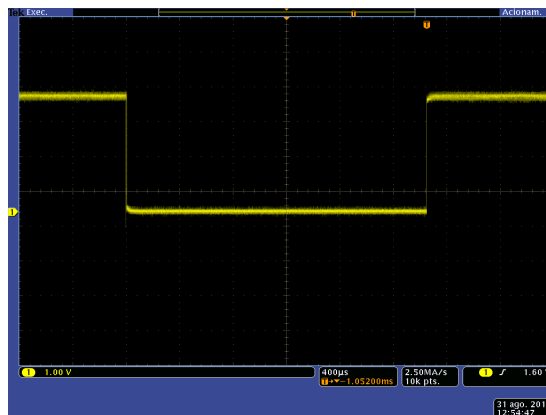


Figura 5: Intervalo entre as escrita dos valores LOW e HIGH no pino 3.

Utilizando 400 µs/div pode-se encontrar que o tempo total foi de 2.24 ms. Removendo os dois comandos digitalWrite pode-se reduzir o tempo de execução. É seguro então afirmar que o tempo de conversão é de menos de 2.24 ms. A rotina resultante para a medição de quatro períodos completos é apresentada a seguir.

```

unsigned int motorl[TAM_VETORM];

```

```
unsigned int  motorr[TAM_VETORM];
void lerAdc(void){
    motorl[0] = analogRead(A0);
    motorr[0] = analogRead(A1);
    motorl[1] = analogRead(A0);
    motorr[1] = analogRead(A1);
    motorl[2] = analogRead(A0);
    motorr[2] = analogRead(A1);
    motorl[3] = analogRead(A0);
    motorr[3] = analogRead(A1);
    motorl[4] = analogRead(A0);
    motorr[4] = analogRead(A1);
    motorl[5] = analogRead(A0);
    motorr[5] = analogRead(A1);
    motorl[6] = analogRead(A0);
    motorr[6] = analogRead(A1);
    motorl[7] = analogRead(A0);
    motorr[7] = analogRead(A1);
    motorl[8] = analogRead(A0);
    motorr[8] = analogRead(A1);
    motorl[9] = analogRead(A0);
    motorr[9] = analogRead(A1);

    motorl[10] = analogRead(A0);
    motorr[10] = analogRead(A1);
    motorl[11] = analogRead(A0);
    motorr[11] = analogRead(A1);
    motorl[12] = analogRead(A0);
    motorr[12] = analogRead(A1);
    motorl[13] = analogRead(A0);
    motorr[13] = analogRead(A1);
    motorl[14] = analogRead(A0);
    motorr[14] = analogRead(A1);
    motorl[15] = analogRead(A0);
    motorr[15] = analogRead(A1);
    motorl[16] = analogRead(A0);
    motorr[16] = analogRead(A1);
    motorl[17] = analogRead(A0);
    motorr[17] = analogRead(A1);
```

```
motorl[18] = analogRead(A0);  
motorr[18] = analogRead(A1);  
motorl[19] = analogRead(A0);  
motorr[19] = analogRead(A1);
```

```
motorl[20] = analogRead(A0);  
motorr[20] = analogRead(A1);  
motorl[21] = analogRead(A0);  
motorr[21] = analogRead(A1);  
motorl[22] = analogRead(A0);  
motorr[22] = analogRead(A1);  
motorl[23] = analogRead(A0);  
motorr[23] = analogRead(A1);  
motorl[24] = analogRead(A0);  
motorr[24] = analogRead(A1);  
motorl[25] = analogRead(A0);  
motorr[25] = analogRead(A1);  
motorl[26] = analogRead(A0);  
motorr[26] = analogRead(A1);  
motorl[27] = analogRead(A0);  
motorr[27] = analogRead(A1);  
motorl[28] = analogRead(A0);  
motorr[28] = analogRead(A1);  
motorl[29] = analogRead(A0);  
motorr[29] = analogRead(A1);
```

```
motorl[30] = analogRead(A0);  
motorr[30] = analogRead(A1);  
motorl[31] = analogRead(A0);  
motorr[31] = analogRead(A1);  
motorl[32] = analogRead(A0);  
motorr[32] = analogRead(A1);  
motorl[33] = analogRead(A0);  
motorr[33] = analogRead(A1);  
motorl[34] = analogRead(A0);  
motorr[34] = analogRead(A1);  
motorl[35] = analogRead(A0);  
motorr[35] = analogRead(A1);  
motorl[36] = analogRead(A0);
```

```

    motorr[36] = analogRead(A1);
    motorl[37] = analogRead(A0);
    motorr[37] = analogRead(A1);
    motorl[38] = analogRead(A0);
    motorr[38] = analogRead(A1);
    motorl[39] = analogRead(A0);
    motorr[39] = analogRead(A1);
}

```

Desta forma, foi possível medir quatro períodos completos dos valores das correntes nos dois motores do robô. Na figura 6 são apresentados os quatro períodos dos valores das correntes geradas por uma onda PWM com 40% de *duty cycle*.

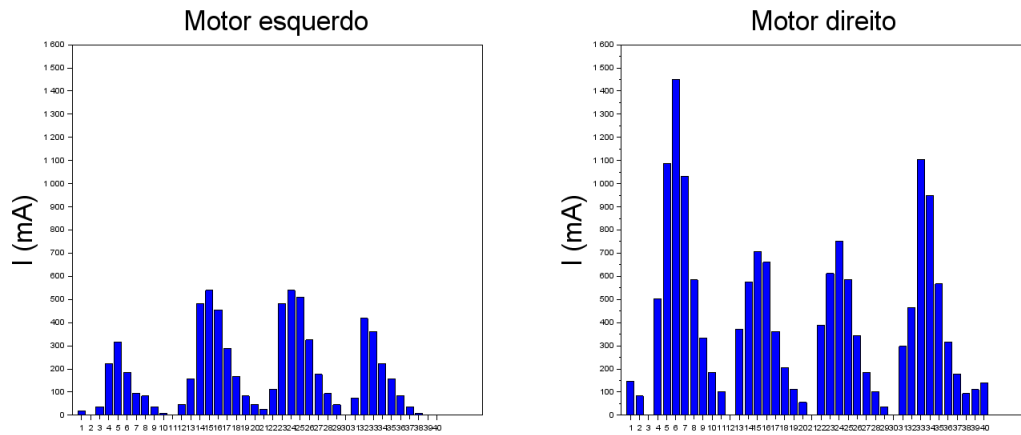


Figura 6: Correntes nos motores esquerdo e direito.

Para calcular a integral das correntes circulantes foi utilizada a regra do trapézio, conforme listada na rotina a seguir:

```

void calculaIntegral(void)
{
    int i;

    integrall = 0;
    for(i=1; i<TAM_VETORM; i++){
        integrall = integrall + (motorl[i] + motorl[i-1])*CONVERSAO*0.1/2.0;
    }
    integrallr = 0;

    for(i=1; i<TAM_VETORM; i++){
        integrallr = integrallr + (motorr[i] + motorr[i-1])*CONVERSAO*0.1/2.0;
    }
}

```

}
}

O procedimento do cálculo da integral da corrente foi repetido para 18 intervalos de 4 períodos de operação. O resultado é apresentado na figura 7.

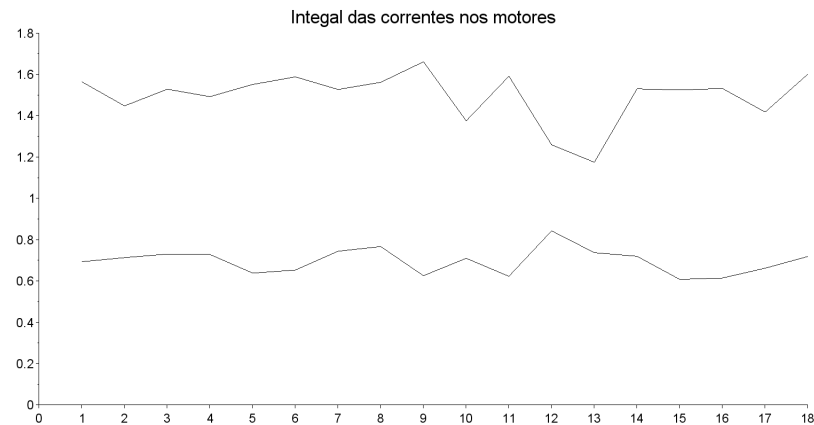


Figura 7: Integral das correntes nos motores esquerdo (curva de cima) e direito (curva de baixo) (x 1000).

A partir do gráfico da integral das correntes, é possível ver claramente que a corrente circulando pelo motor direito é maior que a que circula pelo motor esquerdo. De posse dessa informação foi definido que a integral das correntes do motor esquerdo é o valor de referência e a corrente do motor direito deve ser ajustada utilizando um Controlador Proporcional, fazendo com que a mesma apresente uma integral semelhante a do motor esquerdo.

4 Resultados

Nas figuras a seguir são apresentados os valores do erro percentual com e sem o controlador P. Pode-se ver claramente que após adicionar o controlador a diferença entre as correntes circulantes nos motores cai drasticamente, principalmente para grandes valores do *duty cycle*.

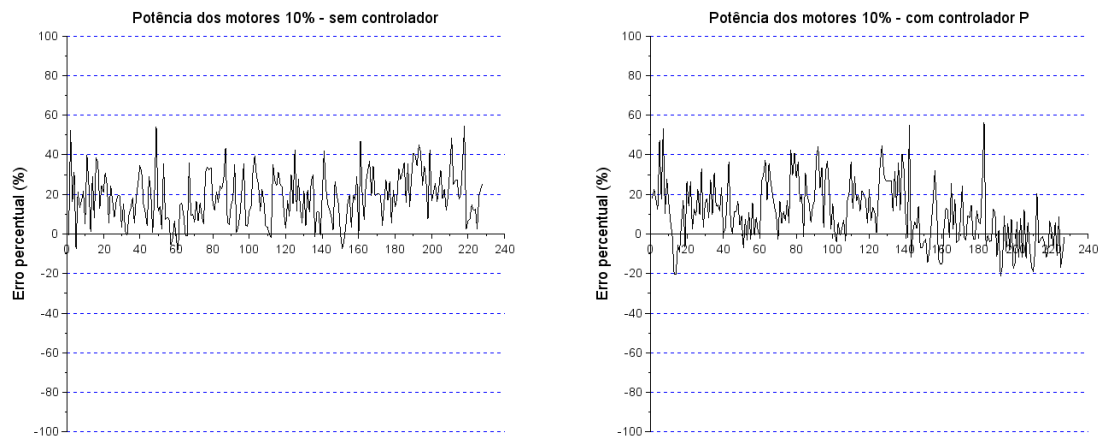


Figura 8: Diferença percentual entre a integral das correntes do motor esquerdo e direito. Potência em 10% da máxima.

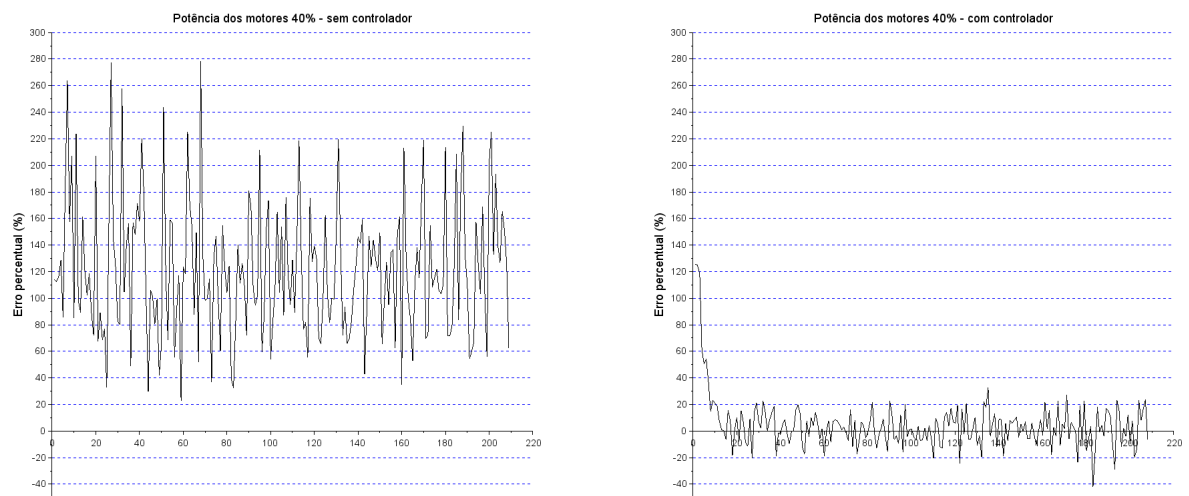


Figura 9: Diferença percentual entre a integral das correntes do motor esquerdo e direito. Potência em 40% da máxima.

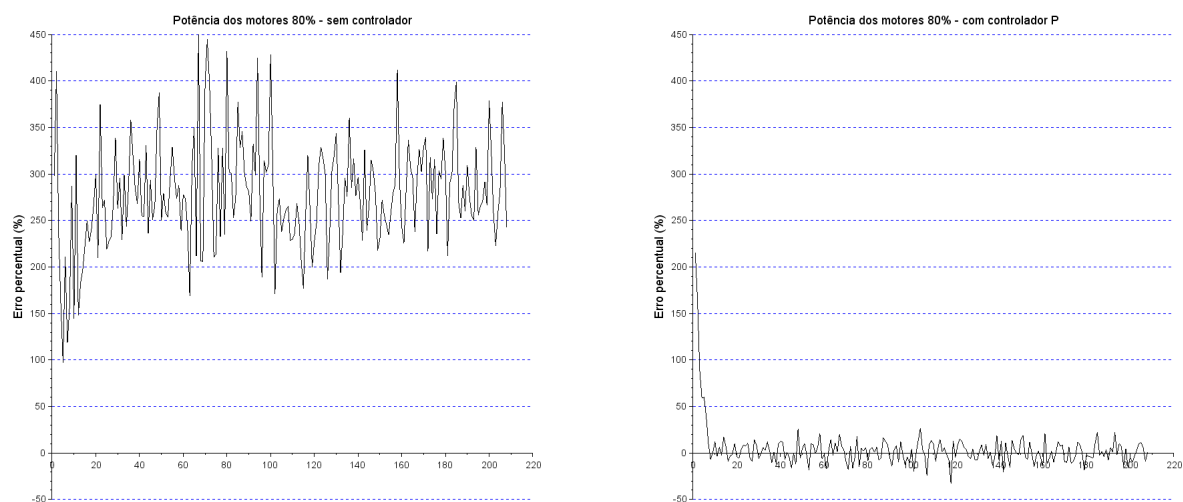


Figura 10: Diferença percentual entre a integral das correntes do motor esquerdo e direito. Potência em 80% da máxima.

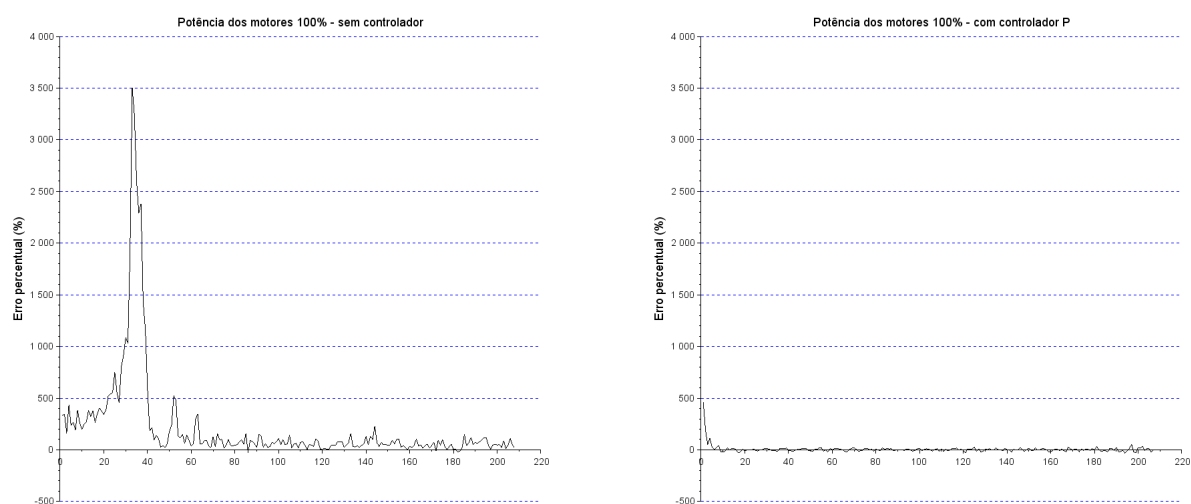


Figura 11: Diferença percentual entre a integral das correntes do motor esquerdo e direito. Potência em 100% da máxima.

5 Discussão

A partir dos gráficos obtidos percebe-se claramente que o controlador P melhorou consideravelmente o desempenho do sistema. Todavia, a suposição de que ajustar a corrente do motor direito, de forma que ela fosse igual a do motor esquerdo, não se mostrou uma abordagem muito adequada. O problema que ocorre com essa solução é que existe muito ruído nas medições, conforme pode-se observar pelos gráficos. Assim, o controlador não funciona com o seu melhor desempenho. Mais ainda, a própria corrente de referência pode não exibir sempre o mesmo comportamento para uma onda de controle constante fazendo com que a corrente do motor direito nunca alcance a do motor esquerdo. Depois de montado o controlador no robô o valor do ganho também precisou ser ajustado para evitar o *drift* do Guarabô, ficando diferente do valor usado na bancada de testes (foi modificado de 15 para 2).

6 Conclusão

Diante dos resultados obtidos e discutidos concluiu-se que o uso do controlador P melhorou consideravelmente o desempenho do sistema, entretanto uma nova implementação do controlador é necessária para um desempenho ainda melhor. Nesta nova abordagem a corrente do motor direito não será comparada com a do motor esquerdo. Serão usadas tabelas, onde cada entrada armazenará o valor da corrente necessária em cada um dos motores para que o robô faça o deslocamento em linha reta. Estes Valores serão usados como entrada para o controlador P. Assim, será eliminado o ruído no valor de referência da integral da corrente, melhorando o desempenho total do sistema.

Referências

ARDUINO. 2014. Disponível em: <<http://arduino.cc/>>. Acesso em: 01 maio 2014. Nenhuma citação no texto.

BARATIERI, C. L.; PINHEIRO, H. A novel starting method for sensorless brushless dc motors with current limitation. In: *Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 816–822. Citado na página 3.

BRANDOLT, H. G. *Simulação de Escoamento em Dutos por Caracterização de Eventos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2002. Citado na página 5.

FITZGERALD, A. E.; JR., C. K.; UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas*. 6. ed. [S.l.]: Bookman, 2006. ISBN 9788560031047. Citado na página 3.

FU, L.; LI, P. The research survey of system identification method. In: *Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), 2013 5th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2013. v. 2, p. 397–401. Nenhuma citação no texto.

MCCOMB, G. *Robot Builder's Bonanza, Fourth Edition*. 4. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2011. ISBN 9780071750356. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 4.

PAUN, M.-A.; SALLESE, J.-M.; KAYAL, M. Characteristic parameters evaluation of hall cells with high performance. In: *Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES), 2013 Proceedings of the 20th International Conference*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 86–91. Citado na página 5.

POPOVIC, R. S. *Hall Effect Devices: Magnetic Sensors and Characterization of Semiconductors*. [S.l.]: CRC Press, 2010. Citado na página 5.

RASHID, M. H. *POWER ELECTRONICS HANDBOOK*. [S.l.]: Academic Press, 2001. Citado na página 7.

SCILAB. 2014. Disponível em: <<http://www.scilab.org/>>. Acesso em: 01 maio 2014. Nenhuma citação no texto.

SU, W.-C.; DRAKUNOV, S.; OZGUNER, U. Sliding mode brushless dc motor current and torque control algorithms. In: *Control Applications, 1992., First IEEE Conference on*. [S.l.: s.n.], 1992. p. 910–915 vol.2. Citado na página 6.