



IMPLEMENTAÇÃO DIDÁTICA DE UM CONTROLADOR DO TIPO PID PARA CONTROLE DE VELOCIDADE NUM ROBÔ MÓVEL

Nemerson Destefani Bernardes – nemerson@bol.com.br

Felipe Alcântara de Castro – facalcantara@hotmail.com

Marco Antônio de Souza Leite Cuadros – marcoantonio@ifes.edu.br

Gustavo Maia de Almeida – gmaia@ifes.edu.br

IFES - Instituição Federal do Espírito Santo

Rodovia ES-010, Km 6.5, Manguinhos

29173-087 – Serra – ES

Resumo: No ensino da engenharia existe uma grande necessidade em relacionar a teoria com a prática, o que limita a capacidade de o aluno aplicar o aparato teórico de forma prática. Assim, neste trabalho é usada a robótica para demonstrar uma aplicação da teoria de controle e sistemas embarcados num tema que desperta o interesse dos alunos, que é a robótica móvel. Especificamente apresenta-se a implementação didática de um controlador do tipo PID para controle de velocidade num robô móvel construído e instrumentado pelos alunos.

Palavras-chave: Robô móvel, PID, NI myRIO, Odometria.

1 INTRODUÇÃO

Um grande desafio dos cursos de engenharia nas diversas áreas de abrangência, é a busca pelo equilíbrio do conteúdo teórico com o prático, que em sua grande maioria, é desenvolvido em laboratórios das próprias instituições de ensino, sejam elas centros tecnológicos ou universitários. A possibilidade de aplicar na prática o conteúdo teórico ministrado nas aulas, torna o aprendizado mais adequado a uma considerável parcela dos alunos que, após a conclusão do curso, desenvolverão suas carreiras em ambientes industriais, seja na área de pesquisa, projetos ou engenharia de campo.

A robótica móvel é um tema bastante relevante e atual devido às diversas aplicações ao qual pode abranger. Esta área de estudos, pesquisas e desenvolvimento apresentou um grande salto nas últimas duas décadas. A aplicação prática de robôs móveis junto a diferentes atividades em nossa sociedade (ARANIBAR, *et al.*, 2006). Geralmente seu uso se dá em áreas inóspitas ou atividades as quais trazem muita periculosidade aos seres humanos. Estas atividades podem ser em atividade de inspeção, resgate, combate ao terrorismo entre outros exemplos. Isto vem demonstrando o quão promissor é o futuro desta área (ROMERO, *et al.*, 2014).

Como a robótica permite aplicar uma vasta gama de especialidades, como mecânica, elétrica, instrumentação, automação, computação, entre outras, nada mais adequado do que utilizá-la como ferramenta motivadora para que os alunos alcancem de forma plena os objetivos das disciplinas afins.



Neste presente artigo, a aplicação dos conhecimentos de sistemas embarcados, através da utilização dos softwares Matlab e Labview para modelagem de processos, simulação e sintonia de controladores PID, foram estudados e aplicados em um robô móvel diferencial protótipo do laboratório de pesquisa do GAIN (Grupo de pesquisa em automação industrial) do IFES-Serra.

Para a realimentação da velocidade e posição do robô móvel, foram utilizados dois encoders, além de dois motores de corrente contínua, os quais imprimem movimento ao conjunto. Foram sintonizados dois controladores PIDs para o controle das rodas e um controlador proporcional para controle da trajetória.

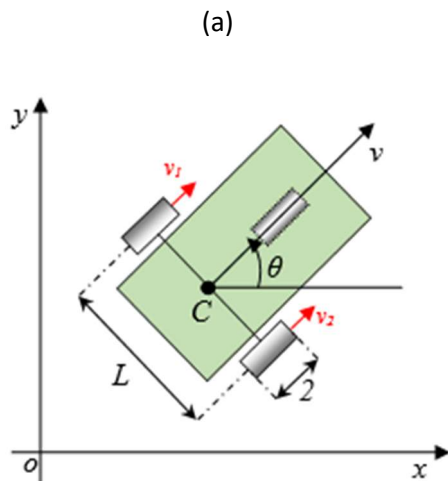
2 DESCRIÇÃO DO ROBÔ PROTÓTIPO UTILIZADO

Como ponto de partida do trabalho desenvolvido, foi utilizada uma versão original de um robô móvel, o qual é abordado de forma bem didática no artigo “CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ MÓVEL COMO PLATAFORMA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE MICROCONTROLADORES” submetido e publicado no COBENGE de 2013 (PANCERI *et al* 2013). Buscando um melhor desempenho para os propósitos do presente artigo, foram realizadas algumas modificações que serão apresentadas a seguir.

A configuração do robô móvel utilizado neste trabalho é mostrada na Figura 1.

Figura 1 – a) Modelo do robô móvel de tração

b) Robô móvel protótipo diferencial



Conforme ilustrado na Figura 1, o robô utilizado possui duas rodas motoras paralelas de tração independentes e uma roda livre (roda boba ou *caster*). As duas rodas motoras são idênticas, com raio r , sendo a distância entre as rodas igual a L . A posição do robô é definida pelas coordenadas $q = [x, y, \theta]^T$, cujos parâmetros definem a configuração e sua localização no eixo cartesiano, onde θ determina o ângulo de orientação do robô. A posição do robô, definida no sistema de eixos cartesianos, é definida por x e y . O centro de massa do robô móvel está localizado no ponto C , ao qual fica no centro do eixo das rodas do robô com distância L , para cada uma das rodas do robô. Este ponto será utilizado como ponto de referência, ou ponto de interesse para o controle do robô.



Caso as velocidades das duas rodas sejam idênticas ($v_1 = v_2$), o deslocamento do robô será em linha reta. Caso a velocidade da roda direita (v_2) seja menor do que a roda esquerda (v_1) o robô se deslocará em forma circular no sentido horário e por fim caso a velocidade da roda esquerda (v_1) seja maior, o robô se deslocará também em forma circular no sentido anti-horário. Contudo, o robô descrito não pode executar movimentos transversais, sendo necessário executar uma sequência de manobras para executar movimentos mais complexos. Este tipo de robô com restrições de movimento é denominado de não holonômico. Na Figura 2 é apresentado o detalhe da transmissão de força.

Figura 2 – Detalhe do sistema de transmissão



A Equação (1) representa o modelo cinemático do robô móvel. Este modelo será utilizado no desenvolvimento do controlador.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde v e w são as velocidades linear e angular do robô, respectivamente. Ressalta-se que em tal modelo considera-se como a posição do robô o ponto de interesse C. Na literatura podem ser encontradas outras formas de representar este modelo, como por exemplo através das equações $v_1 = w_1 r$, $v_2 = w_2 r$, $v = (v_1 + v_2)/2$, e $w = (v_2 - v_1)/L$, onde w_1 e w_2 são as velocidades angulares das rodas direita e esquerda, respectivamente.

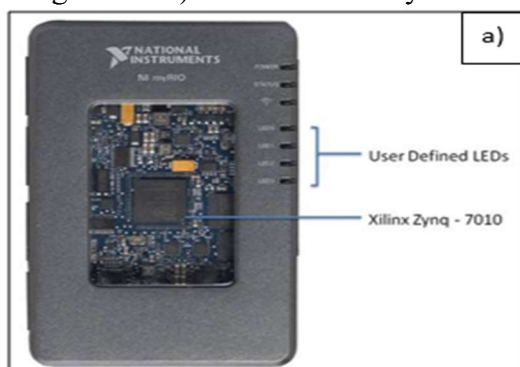


2.1 O sistema embarcado

Com o objetivo de possibilitar a movimentação do protótipo utilizado, foi montado um sistema composto por uma placa microcontroladora da National Instruments - NI myRIO, que possui entradas e saídas configuráveis. O dispositivo possui um processador de dois núcleos e um FPGA integrado, possibilitando implementações de processos dedicados de alta performance. Adicionalmente o NI myRIO tem uma porta USB, comunicação via WIFI, entrada e saídas de áudio além de um acelerômetro para os três eixos, conforme segue demonstrado na Figura 3.

Devido às exigências de corrente e tensão do motor utilizado no projeto, optou-se por um circuito de potência do modelo MD03A da Pololu, além de dois encoders, dois motores CC, polias e correias para acoplamento, bateria e rodas. A estrutura básica e suas principais conexões podem ser observadas na Figura 4.

Figura 3 – a) Frontal do NI myRIO utilizado



b) Detalhe do conector do NI myRIO

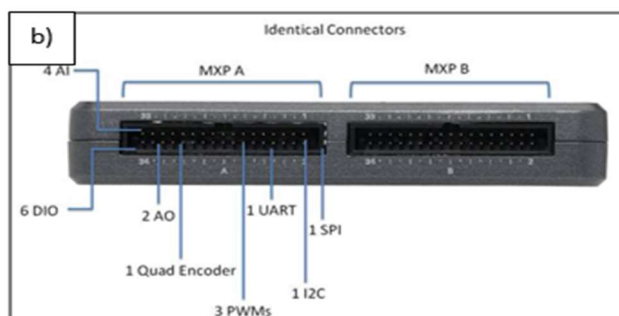
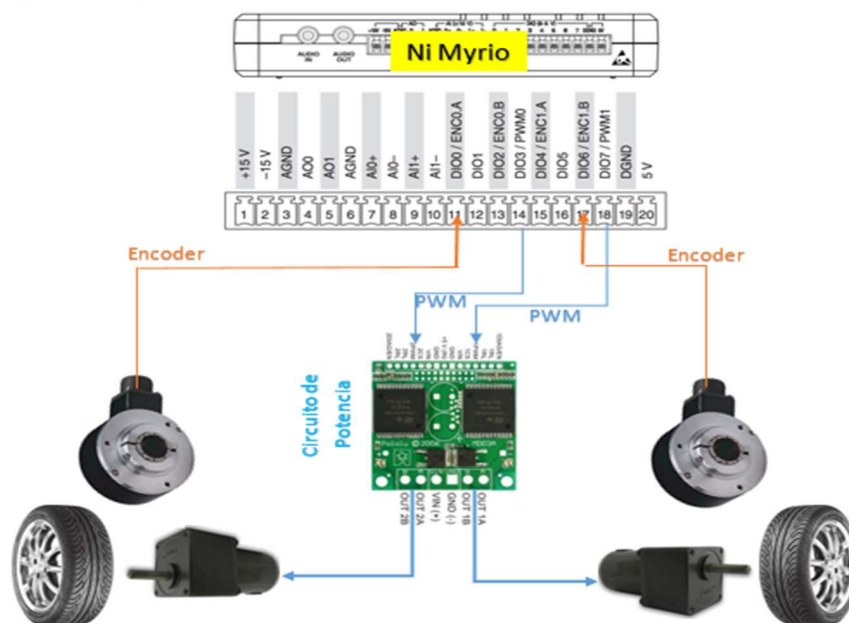


Figura 4 - Esquemático de conexões do robô





2.2 Modelagem dos processos (rodas – Motor CC)

A maioria dos projetos de sistema de controle baseia-se na análise de sistemas de segunda ordem, como é o caso de um motor CC. Mesmo em sistemas de ordem superior, o que é comum, este pode ser aproximado por um sistema de segunda ordem. O modelo de um processo de segunda ordem é representado pela Equação (2).

$$G(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2} \quad (2)$$

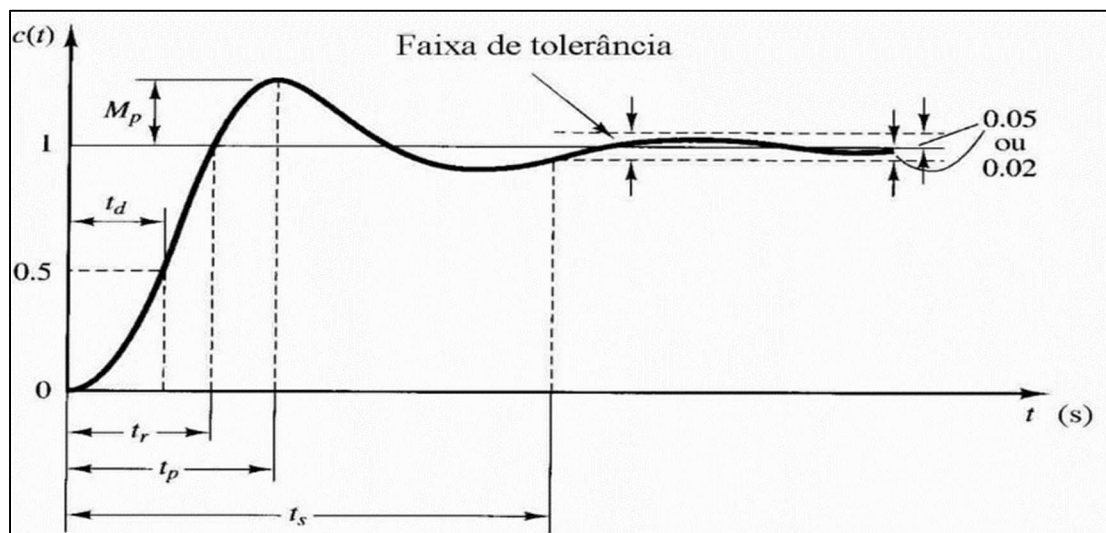
onde: ξ = fator de amortecimento;

w_n = frequência natural não amortecida

Outro parâmetro importante em sistemas de segunda ordem é a frequência natural de amortecimento, representada por w_d , descrito matematicamente por $w_d = w_n \sqrt{1 - \xi^2}$.

A representação gráfica que ilustra a resposta ao degrau genérica para sistemas de segunda ordem pode ser ilustrada pela Figura 5.

Figura 5 - Resposta ao degrau segunda ordem



Na Figura 5 acima são mostrados parâmetros complementares característicos deste sistema: o tempo de pico (t_p), tempo de subida (t_r), tempo de assentamento (t_s), e máximo sobressinal (M_p). Desta feita, para a obtenção da função de transferência referentes às rodas esquerda e direita do robô, foram realizados testes de resposta ao degrau em malha aberta, para cada elemento individualmente. Para isso, mantendo-se a velocidade nula em uma das



rodas, foi comandado um degrau na velocidade inicial de 30 rpm para 50 rpm. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 - Resposta ao degrau em malha aberta da roda direita

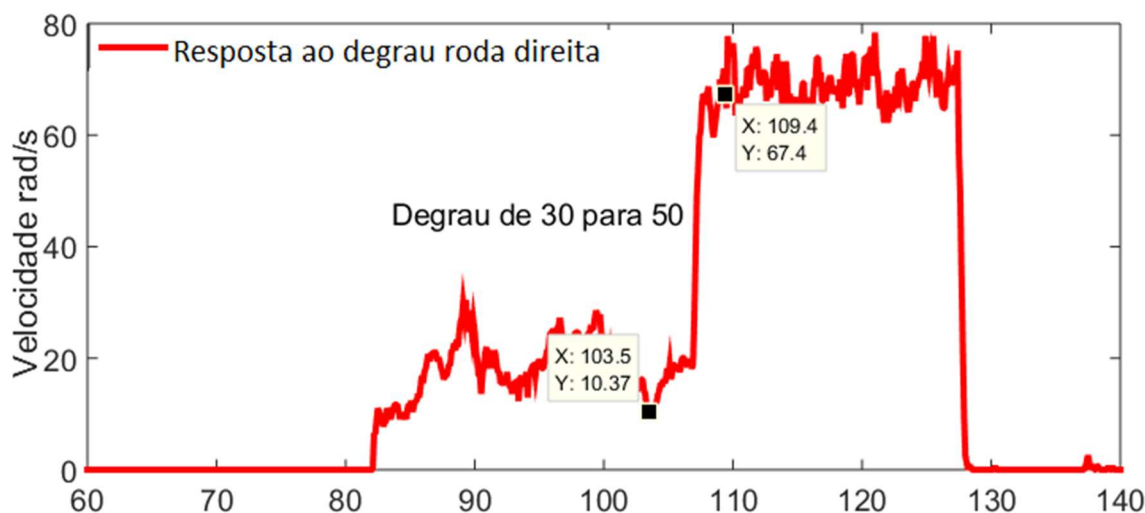
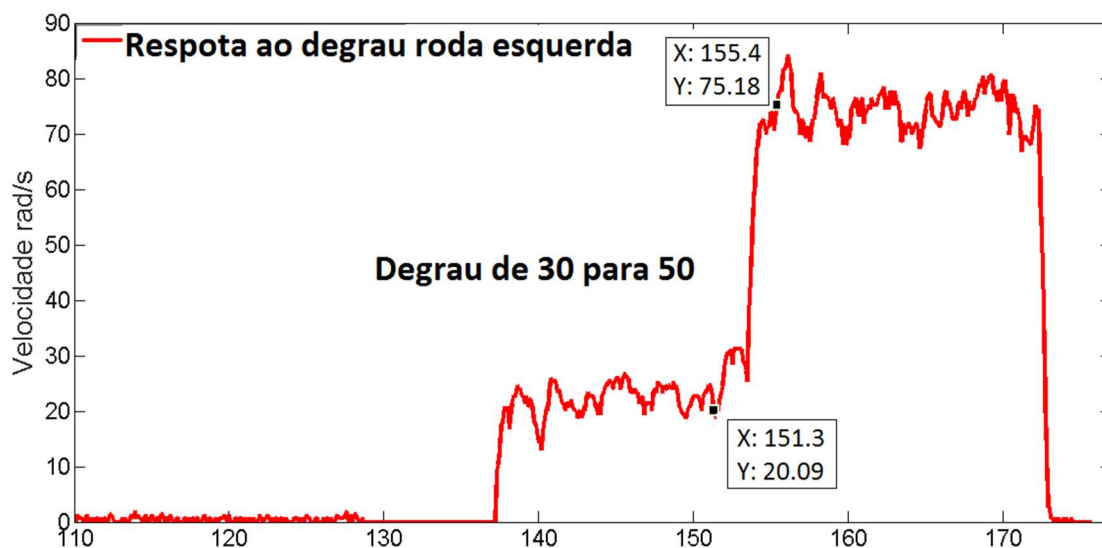


Figura 7 - Resposta ao degrau em malha aberta da roda esquerda



Para a obtenção das funções de transferências referentes às rodas do robô, foram utilizadas as equações $t_p = \pi/w_d$, $M_p = e^{-\frac{\pi \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$ e $w_d = w_n \sqrt{1-\xi^2}$. Desta forma, partiu-se para obtenção dos parâmetros, extraindo-se do gráfico os valores de t_p , M_p e OS . Os resultados para a roda direita podem ser observados nas Equações (3), (4), (5) e (6).



$$t_{pRd} = 2.9 \text{ seg} \quad (3)$$

$$w_{dRd} = \frac{\pi}{t_d} = \frac{3.14}{2.9} = 1.083 \text{ rad/s} \quad (4)$$

$$M_{pRd} = 58.33 = e^{-\pi \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (5)$$

$$w_{nRd} = \frac{1.083}{0.612} = 1.77 \text{ rad/s} \quad (6)$$

Assim, é possível deduzir a equação de segundo grau referente à roda direita do robô conforme Equação (7).

$$G_{Rd}(s) = \frac{3.13}{s^2 + 2.8s + 3.13} \quad (7)$$

Realizando o mesmo procedimento para a roda esquerda obtém-se a Equação (8).

$$G_{Re}(s) = \frac{4.26}{s^2 + 3.24s + 4.26} \quad (8)$$

2.3 Ajuste da odometria do robô

A odometria é um método muito utilizado para estimar a posição e a orientação de robôs através da integração dos deslocamentos incrementais de suas rodas, medidos a partir de um referencial fixo. Os encoders mais utilizados são foto codificadores acoplados diretamente aos eixos dos motores ou engrenagens. Como a ideia fundamental da odometria é a integração contínua e incremental da informação que descreve o movimento ao longo do tempo, é inevitável o acúmulo de erros locais a cada iteração (FERNANDES, 2003).

Seguindo a teoria abordada por FREITAS *et al* (2016), para especificar a posição do robô, na Figura 1 foi escolhido o ponto C, que a partir de agora será chamado de ponto P. O ponto P que é o ponto médio entre as rodas, é utilizado como ponto de referência da posição. A posição *P* pode ser descrita pelas coordenadas *x* e *y* e pelo ângulo θ ($P = [x \ y \ \theta]$). A distância de cada pulso (*DistPulsos*), é calculada através da Equação (9).

$$DistPulsos = 2\pi R/NP \quad (9)$$



onde R é o raio da roda e NP é a quantidade de pulsos por uma volta. Posteriormente é calculada a distância percorrida por cada roda através das equações $\Delta S_d = DistPul * P_d$ e $\Delta S_e = DistPulsos * P_e$, sendo ΔS_d e ΔS_e são as distâncias percorridas no intervalo Δt das rodas direita e esquerda, respectivamente. A distância percorrida pelo ponto médio do robô (P) é calculada por $\Delta S = (\Delta S_d + \Delta S_e) / 2$ e $\Delta S = (\Delta S_d + \Delta S_e) / L$, onde L é a distância entre as rodas. Em seguida são calculados os deslocamentos nos eixos x e y no intervalo de tempo Δt através das equações $\Delta x = \Delta S \cos[(\theta + \Delta\theta / 2)]$ e $\Delta y = \Delta S \sin[(\theta + \Delta\theta / 2)]$. Assim, a partir das variações de deslocamento e de θ , pode-se calcular a posição atualizada (P') através da Equação (10).

$$P' = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\theta \cos(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}) \\ \Delta\theta \sin(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}) \\ \Delta\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + \Delta x \\ y + \Delta y \\ \theta + \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

A odometria é então utilizada para calcular a velocidade das rodas do robô. Nela os sensores e encoders óticos instalados no robô, transmitem os dados de rotação das rodas para o sistema de controle. Assim, através da razão do perímetro da roda pela quantidade de pulsos do encoder por volta, é determinada a velocidade de cada roda, obtida pelo número absoluto de pulsos fornecido instantaneamente pelos encoders, conforme apresentado na Equação (11).

$$V_r = ((|Pi| * Pr / Pv) / t) \quad (11)$$

onde V_r é a velocidade calculada de cada roda, Pi é a quantidade de pulsos num intervalo de tempo t , Pr é o perímetro de cada roda, Pv é a quantidade de pulsos por volta pré-determinada e t é o intervalo de tempo estabelecido.

2.4 Sintonia dos PIDs

Conforme descrito no item 2.3, foram obtidas as funções de transferência correspondentes aos modelos de cada uma das rodas. De posse das FTs correspondentes, o circuito é implementado no Matlab/Simulink e através do auto *tuning* do bloco controlador PID do Simulink, é possível o alcance de uma sintonia adequada (K_p , K_i e K_d) ao sistema, conforme demonstrado na Figura 7 através da resposta ao degrau do sistema. Os parâmetros K_p , K_i , K_d apresentados na Tabela 1.



Tabela 1 -Sintonia dos controladores

	Kp	Ki	Kd
Roda direita	2.12	2.95	0.28
Roda esquerda	2.20	2.67	0.33

2.5 Resultados práticos

Com a sintonia alcançada dos PID's das duas rodas, foi possível uma resposta satisfatória dos sistemas de acionamentos, o que associado ao sistema de controle de trajetória já implementado, possibilitou uma melhora considerável no processo de sintonia do controle de trajetória do robô móvel. Os resultados de simulação e práticos são mostrados nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 – Resposta em malha fechada simulação

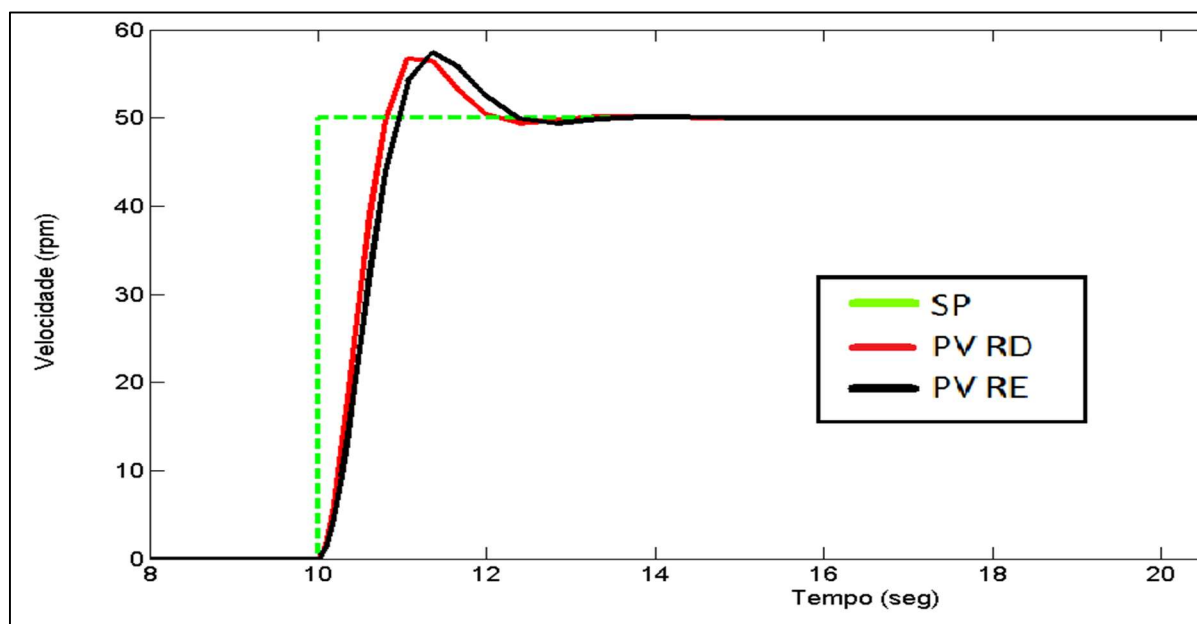
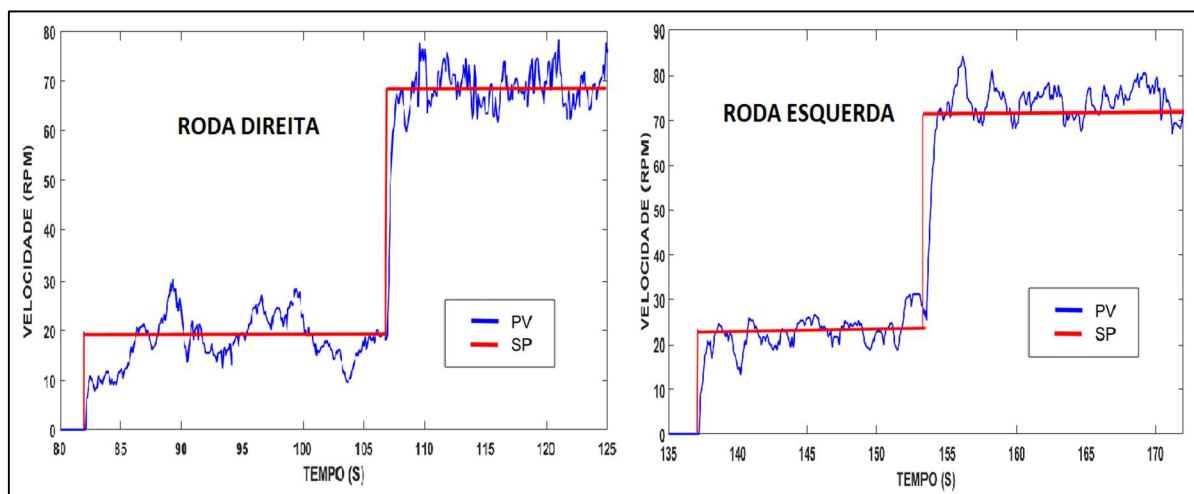


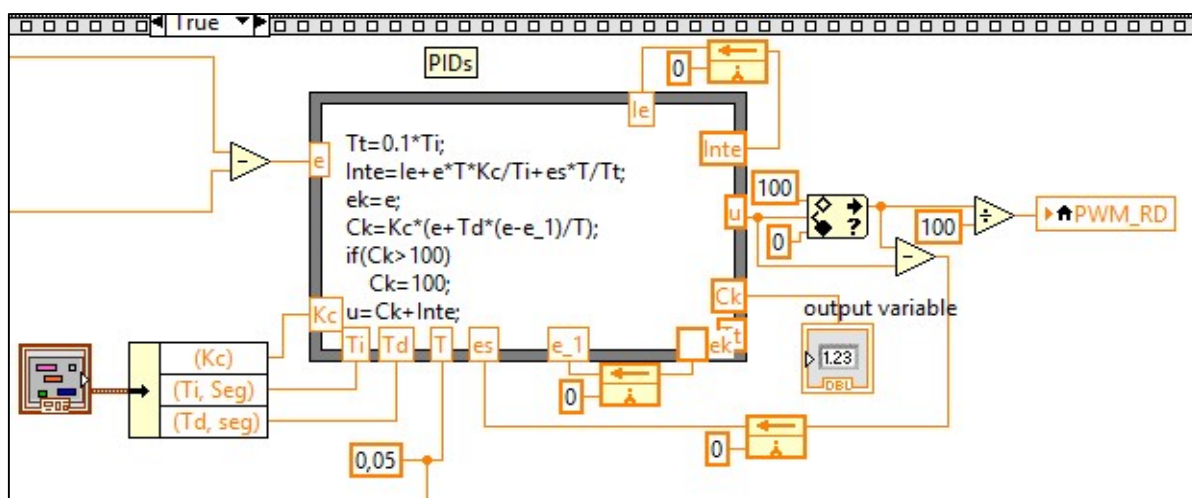


Figura 9 - Resposta em malha fechada prática



O ambiente de implementação dos PID's no Labview segue demonstrado na Figura 10, sendo este baseado em AMARAL *et al.* (2011).

Figura 10 - Controlador PID no Labview



3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo implementar um sistema embarcado para controle de velocidade de um robô móvel diferencial, considerando a temática pedagógica necessária e essencial para uma abordagem prática das disciplinas de automação e instrumentação.

Conforme apresentado através da odometria, os alunos conseguiram determinar o deslocamento do robô e a velocidade das suas rodas, a partir das dimensões dos acionamentos



e dos sinais provenientes dos encoders embarcados. A fim de controlar a velocidade mencionada, foi implementado e sintonizado um controlador PID tradicional na configuração ideal.

Ao final do trabalho, foi realizada uma avaliação entre os alunos participantes da elaboração do artigo e mais dez outros alunos de engenharia, a fim de avaliar a qualidade do desenvolvimento, aplicabilidade, metodologia utilizada, abrangência e motivação de estudos similares futuros e a aceitação do trabalho. O resultado qualitativo da pesquisa está mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Pesquisa de aceitação

ITEM AVALIADO	GRAU DE ACEITAÇÃO
Qualidade	Alto
Abrangência	Médio
Aplicações adicionais	Alto
Metodologia	Médio
Motivação para trabalhos futuros	Muito alto
Avaliação geral	Alto

Por fim os alunos ficaram estimulados ao ver que foi possível alcançar bons resultados com a aplicação dos conhecimentos da teoria de controle, eletrônica, sistemas embarcados, entre outros, num robô móvel diferencial.

Desta forma, como proposta de trabalhos futuros, será implementado um controlador de trajetória proporcional no mesmo robô móvel diferencial, utilizando-se como base o trabalho realizado por SALAROLLI et al (2016), também desenvolvido no GAIN.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL R. S.; ALMEIDA, G. M.; SALLES, J. L. F.; MUNARO, C. J., CUADROS M. A. S. L. Ambiente para simulação e aplicação numa planta didática de um controlador PID com anti *wind-up*, Blumenau, SC, Cobenge 2011.

ARANIBAR, D. B.; GURGEL, V.; SANTOS, M.; ARAUJO, G. R.; ARAUJO, V. C.; ROZA, R. A.; NASCIMENTO, A. F. S.; SILVA, A.; NASCIMENTO, L. M. G. A software for teaching robotics to technological excluded children using lego prototypes. In 3rd IEEE Latin 2006.

FERNANDES, L. C.; Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, ICMC-USP. Análise e Implementação de algoritmos para localização de robôs móveis, 2003. Dissertação (Mestrado).



FREITAS, B. P. S.; MEDEIROS, M. G.; SILVA, J. R.; ALMEIDA, G. M.; CUADROS, M. A. S. L.; INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO – CAMPUS SERRA. Utilização de exemplo criados no software LabView implementados no starter kit 2.0 como ferramenta no ensino-aprendizagem da robótica, Natal, RN, Cobenge 2016.

PANCERI, J. A. C.; PIMENTEL L. S. S.; PANCERI R. C.; SOUZA M. A. Q. L.; ALMEIDA G. M.; PEREIRA R. P. A. Construção de um robô móvel como plataforma didática para o ensino de microcontroladores, Gramado, RS, Cobenge 2013.

ROMERO, Roseli Aparecida F. Robótica Móvel. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

SALAROLLI P. F.; MOTTA, V.R.; BATISTA, L. G.; ALVES, R. S.; SILVA, J. R.; QUADROS, M. A. S. L. Implementação de um controlador proporcional de seguimento de trajetória de um robô diferencial para o ensino de robótica, Natal, RN, Cobenge 2016.

DIDACTIC IMPLEMENTATION OF A PID DRIVER CONTROLLER FOR SPEED CONTROL ON A MOBILE ROBOT

Abstract: *In engineering teaching there is a great need to relate theory to practice, which limits the ability of the student to apply the theoretical apparatus in a practical way. Thus, in this work robotics is used to demonstrate an application of control theory and embedded systems in a subject that arouses students' interest, which is mobile robotics. Specifically, it presents the didactic implementation of a PID controller for speed control in a mobile robot built and instrumented by the students.*

Key-words: *Mobile robot, PID, NI myRIO, Odometry.*