

UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O CONTROLE DE VELOCIDADE DE UM ROBÔ SOLDADOR

JUSOAN LANG MÓR* PAULO JEFFERSON DIAS DE OLIVEIRA EVALD* CRISTIANO RAFAEL STEFFENS*
BRUNO QUARESMA LEONARDO* SILVIA SILVA DA COSTA BOTELHO* RODRIGO ZELIR AZZOLIN*

* *Universidade Federal do Rio Grande - FURG*

Km 8 - Av. Itália - Carreiros, 96203-900, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil

Email: [jusoan66@gmail.com, paulo.evald@gmail.com, steffens.bola@gmail.com,
bqcory@gmail.com, silviacb.botelho@gmail.com, rodrigoazzolin@gmail.com]

Abstract— This paper presents the modeling and control proposal for velocity control of a linear welding robot. Through bench tests, it was possible observe an inappropriate behavior when the robot moves, such as a stationary error, fluctuations in speed measurement and abnormal behavior when a load is applied to the robot. These issues affect performance of robot and, sometimes, the overall quality of weld. Solving these issues are the main focus in this work. A mathematical model for linear movement of robot was obtained and its parameters were identified. An external closed loop controller PI (Proportional-Integral) is proposed to stabilize robot speed. Simulation results of proposed control system are presented and its performance is discussed.

Keywords— Welding Robot, Transfer Function Modeling, PI Controller.

Resumo— Este trabalho apresenta a modelagem do controle de velocidade linear de um robô soldador. Em testes de bancada foi observado um comportamento inadequado quando o robô se movimenta, apresentando erro estacionário, oscilações na medida de velocidade e comportamento anormal quando uma carga é aplicada ao robô. Esses problemas afetam a performance do robô soldador e suas soluções são o foco desse artigo. Um modelo matemático do movimento linear do robô foi obtido e seus parâmetros foram identificados. Um controle externo em malha fechada do tipo PI é proposto para estabilizar a velocidade do robô. Resultados de simulação do sistema de controle proposto são apresentadas e sua performance é discutida.

Palavras-chave— Robô soldador, Modelagem da Função de Transferência, Controlador PI.

1 Introdução

O processo de soldagem é fundamental para muitas aplicações industriais (Bingul and Cook, 2006). As dimensões e propriedades do chanfro refletem nas ações de controle afetando variáveis como velocidade de deslocamento do robô, regime de oscilação da tocha de soldagem, valor de tensão e valores de velocidade do alimentador de arame (Steffens et al., 2015). A qualidade da solda pode ser degradada pela inconsistência de qualquer uma dessas variáveis. Portanto, o foco principal deste trabalho é a modelagem do movimento do robô para atuação no seu controle de velocidade.

Robôs são largamente utilizados em uma grande variedade de indústrias. Eles são usados para aumentar as taxas de produção, executando tarefas repetitivas ou insalubres, aumentando a qualidade geral do produto e reduzindo custos de fabricação. Um robô industrial consiste de uma máquina de múltiplo propósito com habilidades programadas, que tem características e habilidades como seres humanos, sendo capazes de executar diversas tarefas por hora de trabalho (Daeinabi and Teshnehlal, 2007). De acordo com a Sociedade Americana de Soldagem (*American Welding Society*) (AWS A3.0M/A3.0:2010, 2010), métodos de soldagem são classificados como: manual, semi-automático, mecanizado, automático, robótico e robótico com controle adaptativo. Segundo (II

and Bracarense, 2011), o processo de soldagem classificado como mecanizado é aquele no qual, a tocha de soldagem é manipulada por um equipamento mecânico. Solda mecanizada é definida como: soldagem com equipamento que necessita de ajuste manual constante, em resposta a observação visual durante a soldagem, com a tocha sendo segurada por um sistema mecânico (II and Bracarense, 2011).

Neste trabalho foi utilizado um robô *BUG-O MDS System* para realizar o processo de soldagem. Foi observado em testes de bancada que este robô apresenta problemas na medição de velocidade, tais como: erro de regime permanente, oscilações na medida e efeitos de distúrbios de carga, os quais podem degradar o processo de controle da velocidade. O objetivo deste trabalho é reduzir o erro de regime permanente, as oscilações e efeitos de distúrbios de carga já mencionadas no comportamento da velocidade linear do robô de solda. Isso é feito através de uma malha de controle externa ao controle original do motor do robô. Além disso, será realizada a modelagem e obtenção de parâmetros do sistema que representa o comportamento da velocidade linear do robô soldador.

2 Robô de Soldagem Linear BUG-O

O robô *BUG-O MDS System* é um equipamento projetado para aplicações de soldagem linear, o sistema é portátil, modular e flexível, fornecendo

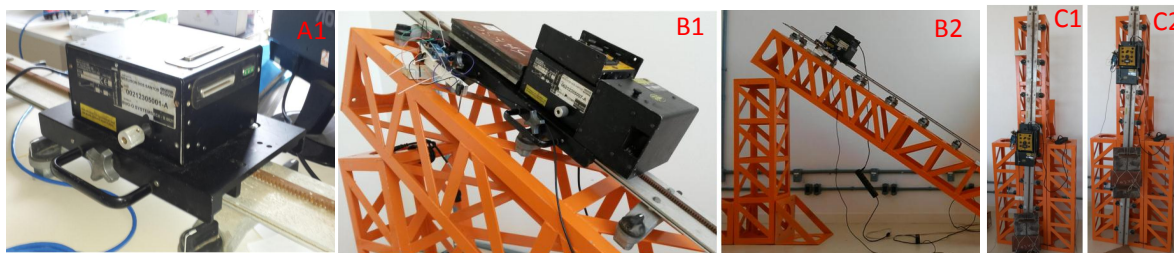


Figura 1: (A1) Robô no Trilho Horizontal (B1 - B2) Robô no Trilho Inclinado (C1 - C2) Robô no Trilho Vertical.

uma plataforma estável para soldadores experientes. O robô se movimenta por um trilho metálico fixado paralelamente ao chanfro de soldagem carregando a tocha de soldagem, executando um movimento pré-definido pelo operador. O sistema é dividido em três módulos básicos: unidade de tração mestre ou *Master Drive Unit*, responsável por movimentar o robô, unidade tecedora ou *Weaver Unit*, utilizado para realizar a trama ou costura de soldagem e o módulo de controle ou *Control Module*, que é uma interface de controle analógica, composta de chaves de seleção e potenciômetros que permitem ao operador controlar o robô.

O movimento linear do robô é dado por um motor do tipo panqueca (Charles, 1962), localizado na unidade de tração mestre. Testes de bancada revelaram que este motor opera sob malha fechada de controle de velocidade, realimentada por um estimador de velocidade do tipo *sensorless*. Desta forma, pode-se associar os problemas de erro estacionário, oscilações na medição de velocidade e efeito de distúrbio ao estimador de velocidade adotado, principalmente em baixas velocidades.

3 Testes de Bancada

Testes de bancada foram realizados para avaliar a performance do robô até que alcançasse a máxima escala de velocidade, mantendo a mesma com pouca variação, mesmo com rápidas trocas no sentido de direção de movimentação do robô. Além disso, a função de transferência do sistema de movimentação foi identificada e utilizada para implementar uma lei de controle para reduzir os erros na velocidade e melhorar o desempenho do robô. A velocidade do robô foi coletada utilizando um microcontrolador e uma placa de condicionamento de sinais que obtém os dados dos *encoders* do robô (Bug-O Systems Corporation, 2014). O sinal da velocidade coletada indica a direção de rotação do motor, sendo o sentido horário o sinal positivo e o sentido anti-horário o sinal negativo. Ainda, o sistema de freio do motor, que é acionado quando o motor é desenergizado, foi retirado pois o mesmo estava prejudicando os sinais coletados

dos *encoders*.

Quatro tipos de testes foram executados para encontrar a função de transferência do robô: i) *Motor a vazio e desacoplado do trilho* (Utilizado apenas para avaliar o comportamento da velocidade coletada); os outros três testes são com movimento livre do robô acoplado ao trilho, sendo: ii) *Trilho na horizontal*; iii) *Trilho inclinado* (aproximadamente 30°); e iv) *Trilho na vertical*.

Em todos os testes, duas referências de velocidade são aplicadas ao motor: $12,5 \text{ mm/s}$ e 38 mm/s , sendo a primeira referência uma velocidade de soldagem usual e a segunda referência a velocidade máxima desenvolvida pelo motor. As velocidades de referência foram aplicadas no motor no tempo de dois segundos em todas as imagens observadas nos testes do *trilho na horizontal*, *trilho inclinado* e *trilho na vertical*. As figuras apresentam a velocidade de saída do motor (V_0), a velocidade de referência aplicada no motor (V_i) e marcações que representam a velocidade em regime de operação (sempre no tempo de quatro segundos) e 63,2% da velocidade em regime. Essas marcações são mostradas para encontrar a função de transferência do motor. Além disso, ressalta-se que as velocidades possuem valores positivos e negativos, que apenas diferenciam o sentido de rotação (horários e anti-horários) do motor.

3.1 Motor a Vazio e Desacoplado do Trilho

Nesse teste o motor foi removido do trilho e nenhuma carga foi aplicada. A Figura 2 mostra a velocidade de saída do motor quando as referências de velocidade são aplicadas nele.

É observado na Figura 2 que o motor apresenta um erro permanente de velocidade, uma vez que ele nunca alcança a referência de velocidade. Além disso, o motor apresenta um comportamento oscilatório¹ que não é causado pelo acoplamento trilho/motor.

¹Esse comportamento oscilatório pode ser visto em todas as outras figuras dos testes com o robô acoplado no trilho, entretanto as figuras com aproximação (que melhor apresentam o comportamento oscilatório) foram omitidas pela limitação de espaço do artigo.

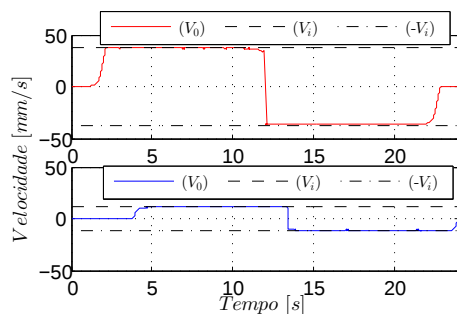


Figura 2: Velocidade (V_0) do Robô a Vazio e De-sacoplado do Trilho.

A Figura 3 mostra a ampliação da velocidade apresentada na Figura 2, onde o comportamento oscilatório pode ser visto de claramente.

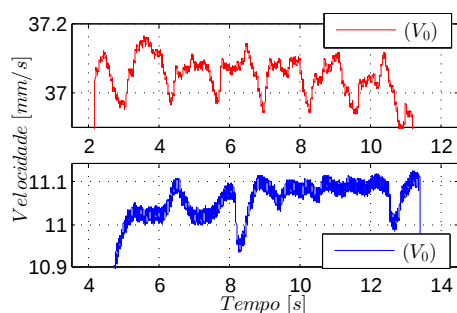


Figura 3: Velocidade (V_0) do Robô a Vazio e De-sacoplado do Trilho, Vista com Aproximação.

3.2 Trilho na Horizontal

Para os testes na horizontal o robô foi acoplado ao trilho, como pode ser visto na Figura 1(A1) e as mesmas velocidades de referência foram aplicadas no robô. As velocidade medidas podem ser observadas na Figura 4 e Figura 5, o erro permanente de velocidade, citado anteriormente, também pode ser observado nessas figuras.

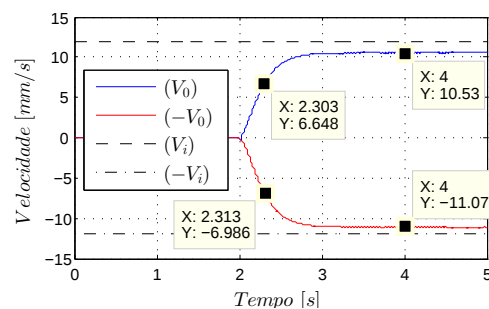


Figura 4: Velocidade (V_0) do Robô no Trilho Horizontal com $12,5 \text{ mm/s}$ de Velocidade de Referência (V_i).

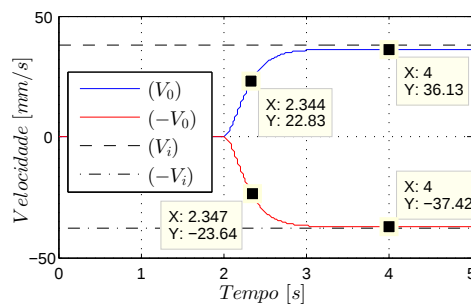


Figura 5: Velocidade do Robô no Trilho Horizontal com 38 mm/s de Velocidade de Referência (V_i).

3.3 Trilho Inclinado

O robô foi acoplado ao trilho com uma inclinação de 30° , como pode ser observado na Figura 1(B1 - B2). Uma carga mecânica de 35 kg (que respeita os limites estabelecidos pelo fabricante do robô) foi aplicada no robô para simular o peso dos equipamentos de solda. As mesmas referências de velocidade foram aplicadas no robô e os resultados podem ser observados na Figura 6 e na Figura 7.

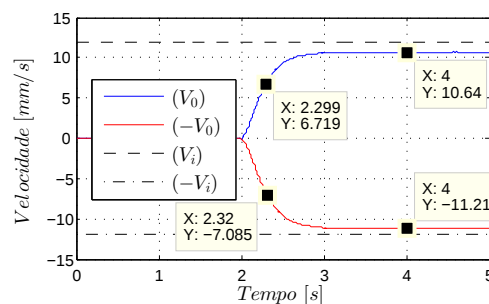


Figura 6: Velocidade (V_0) do Robô no Trilho Inclinado com $12,5 \text{ mm/s}$ de Velocidade de Referência (V_i).

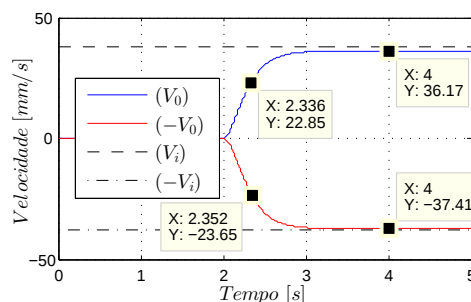


Figura 7: Velocidade (V_0) do Robô no Trilho Inclinado com 38 mm/s de Velocidade de Referência (V_i).

3.4 Trilho na Vertical

Para esse teste o robô foi acoplado ao trilho na vertical, como observado na Figura 1(C1 - C2).

Novamente, uma carga mecânica de 25 Kg (que respeita os limites estabelecidos pelo fabricante do robô), foi aplicada ao robô para simular o peso dos equipamentos de solda. As mesmas referências de velocidade 12,5 e 38 mm/s foram aplicadas no robô, apenas no sentido ascendente do trilho, pois no sentido descendente a coleta de velocidade ficou comprometida. Dessa forma, o robô não permanecia parado na mesma posição do trilho quando desenergizado, devido ao seu peso e a ausência do freio, resultavam em um deslocamento na direção descendente. A velocidade medida pode ser observada na Figura 8.

Um cabo não tensionado segura a carga que vai ser aplicada no robô, depois o mesmo começa a subir no trilho alcançando a velocidade de regime, então o cabo é tensionado e a carga é aplicada no robô. O sistema que aplica carga no robô permite apenas um sentido de direção de velocidade no teste, como pode ser observado na Figura 8.

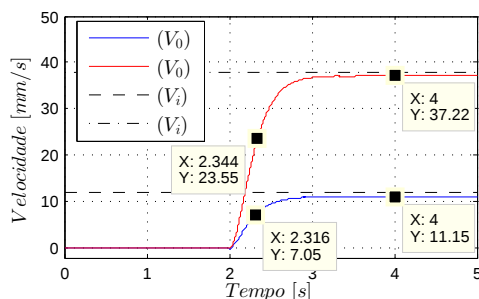


Figura 8: Velocidade (V_0) do Robô no Trilho Vertical com 12 e 38 mm/s de Velocidade de Referência (V_i).

Uma aproximação da velocidade medida na Figura 8 pode ser vista na Figura 9. Na figura da referência 12,5 mm/s ao tempo de 6,5s mostra uma variação na velocidade. Esse é o momento que a carga é aplicada ao sistema, onde um comportamento anormal é observado, pois a velocidade aumenta após a aplicação na carga, quando a mesma deveria diminuir. Já na figura de referência 38 mm/s não é possível observar tão claramente a aplicação da carga, mas o mesmo comportamento anormal do aumento de velocidade pode ser levemente observado. Esse comportamento anormal pode estar associado ao estimador de velocidade utilizado. Como era de se esperar, quanto menor a velocidade, menor são os módulos das variáveis medidas e maior o nível de incerteza na estimativa.

4 Modelagem da Função de Transferência do Motor e o Controlador PI

4.1 Função de Transferência

Depois de todos os testes de bancada, algumas informações sobre o comportamento do motor foram

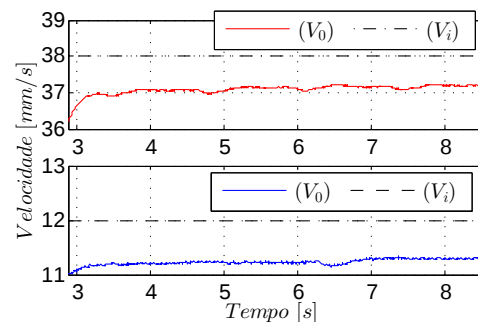


Figura 9: Velocidade (V_0) do Robô no Trilho Vertical com 12 e 38 mm/s de Velocidade de Referência (V_i), com Aproximação.

encontradas. A Tabela 1 mostra as marcações de velocidade de todas as figuras. Baseado nessas marcações, o ganho do sistema K_0 e a constante de tempo $\mathcal{T}$ do sistema foram encontradas. As referências de velocidade sempre iniciam no tempo de dois segundos e a velocidade de regime sempre é medida no tempo de quatro segundos. Então, o tempo que a velocidade alcança 63,2% da velocidade de regime, é subtraído do tempo de início da aplicação da referência (dois segundos) gerando $\mathcal{T}$. Além disso, o K_0 é a relação entre a velocidade de regime, ao tempo de quatro segundos, e a velocidade de referência aplicada ao motor (Ogata, 2001). Por fim, a última linha da Tabela 1 mostra a média dos valores para $\mathcal{T}$ e K_0 .

Tabela 1: Tabela da Constante de Tempo $\mathcal{T}$ e Ganho do Sistema K_0 .

V_i	Fig.	V_0 em Regime	$\mathcal{T}$	K_0
12,5	4	10,53	0,303	0,842
		11,07	0,313	0,885
	6	10,64	0,299	0,851
38	8	11,21	0,230	0,896
		11,15	0,316	0,892
	5	36,13	0,344	0,950
		37,42	0,347	0,984
	7	36,17	0,336	0,951
		37,41	0,352	0,984
	8	37,22	0,344	0,979
$\Sigma / 10$			0,318	0,921

A função de transferência do motor CC pode ser definida como (1) (Siqueira et al., 2015), sendo $G(s)$ a função de transferência no domínio da frequência.

$$G(s) = \frac{V_0(s)}{V_i(s)} = \frac{K_0}{\mathcal{T}s + 1} \quad (1)$$

Aplicando os valores médios de $\mathcal{T}$ e K_0 da Tabela 1 em (1), encontra-se a função de transferência do motor, que pode ser vista em (2), relacionando a velocidade linear de saída do robô com a velocidade de referência do mesmo. Além disso, a placa de aquisição de sinais transforma linearmente a velocidade de entrada em um sinal de tensão.

$$G(s) = \frac{0,921}{0,318s + 1} \quad (2)$$

A validação do modelo obtido, realizada em ambiente *Matlab*, é observada na Figura 10, que representa a saída do motor coletada na prática versus a saída do motor modelado na função de transferência. Uma entrada degrau com as referências de velocidade de 12,5 e 38 mm/s foram aplicadas tanto na prática quanto na simulação.

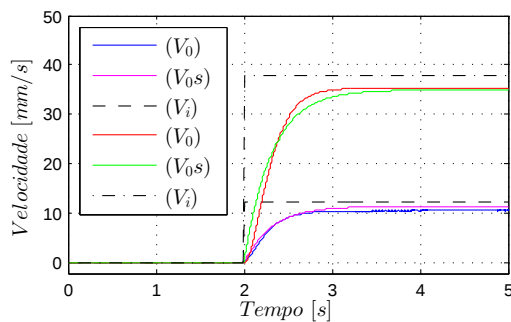


Figura 10: Velocidades (V_0) do Robô no Trilho Vertical com 12,5 e 38 mm/s de Velocidade de Referência (V_i), Comparada a Velocidade de Saída Obtida pela Função de Transferência (V_{0s}) no *Matlab* com a Mesma Velocidade de Referência (V_i).

Observa-se que as curvas apresentam desempenho semelhante, comprovando que a função de transferência modelada se comporta como o motor do robô.

4.2 Controlador PI

Para reduzir o efeito do erro em regime permanente, oscilações e distúrbio de carga foi proposto um controlador externo ao controle original do robô, do tipo PI conforme mostrado na Figura 11 (um controlador apenas com ganho proporcional não eliminaria o erro de velocidade em regime permanente e um controlador do tipo derivativo acabaria adicionando um comportamento oscilatório por se tratar de um sistema que possui uma rápida dinâmica (Ogata, 2001)). Desta forma, o controlador PI atua na variável de entrada da planta, ou seja, a referência V_i . Utilizando o método de alocação de pólos, os ganhos (k_p and k_i) do controlador PI foram modelados, como pode ser observado em (3). Mais informações podem ser encontradas em (Siqueira et al., 2015).

$$k_p = \frac{2\zeta\omega_n T - 1}{K_0} \quad \text{and} \quad k_i = \frac{\omega_n^2 T}{K_0} \quad (3)$$

Onde ζ é o coeficiente de amortecimento e ω_n é a frequência natural não amortecida, que representam os parâmetros de performance do controlador. Por fim, os ganhos do controlador PI são encontrados aplicando os parâmetros $\omega_n = 15$, $\zeta = 0,7$, $K_0 = 0,921$ e $T = 0,318$ em (3). O valor de ω_n é definido heurísticamente levando em consideração que o valor atribuído é refletido no tempo que o controlador precisa para alcançar a referência.

$$k_p = 6,165 \quad \text{and} \quad k_i = 77,687 \quad (4)$$

5 Resultados de Simulação

A simulação do sistema foi desenvolvida em ambiente *Matlab* considerando o diagrama de blocos da Figura 11. A simulação é executada em um tempo de discretização de 1 milissegundo. Foram adicionados ao sistema um ruído de processo (R_1), um ruído de medição (R_2) e um distúrbio (D) para alterar o comportamento do sistema. Também constam no modelo, o erro (E) entre a velocidade de referência (V_0^*) e (V_{0m}) que é a soma da velocidade medida (V_0) com o ruído (R_2), a ação de controle (V_i) somada ao ruído (R_1) que gera (V_{in}), que é aplicado na planta ($G(s)$). A saída de velocidade do sistema é (V_0) e o bloco ($PI(s)$) é o controlador PI.

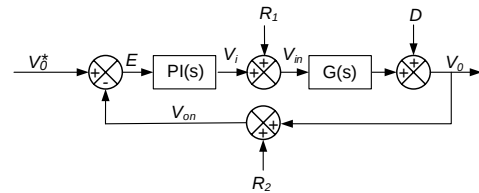


Figura 11: Diagrama de Blocos do Sistema de Controle.

Os valores utilizados na simulação foram: Ruído $R_1 = 3\%$, de variação de carga; Ruído $R_2 = +/ - 0,2$, de um número randômico; Distúrbio $D = 0,1rad$ de amplitude em uma onda senoidal; Velocidade de referência V_0^* foram 12,5 e 38 mm/s, como o valor utilizado nos testes de bancada; Os ganhos do controlador PI são $K_p = 6,165$ e $K_i = 77,687$ de acordo com (4).

A saída de velocidade na simulação em malha aberta pode ser observada na Figura 12, onde é possível notar a similaridade com a velocidade coletada nos testes de bancada, conforme pode ser observado nas Figuras 3 e 9. Além disso, o distúrbio de carga pode ser visto no tempo de 4 segundos, assim como o comportamento anormal de aumentar a velocidade quando a carga é aplicada. Os mesmos parâmetros da simulação em malha aberta foram aplicados na simulação de malha fechada com o controlador PI. A velocidade de saída V_0 e a ação de controle V_{in} podem ser observadas

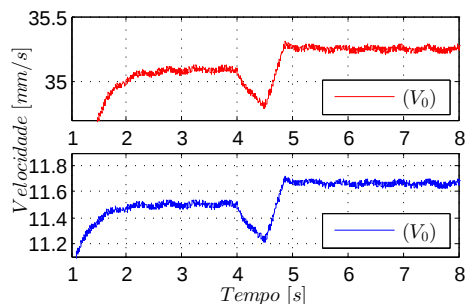


Figura 12: Velocidade do robô em Simulação de Malha Aberta, com 12, 5 e 38 mm/s de Velocidade de Referência (V_i).

nas Figuras 13 e 14. Também é observado que o erro de velocidade em regime permanente é rapidamente minimizado quando o distúrbio de carga é aplicado, assim como o comportamento anormal de aumento de velocidade.

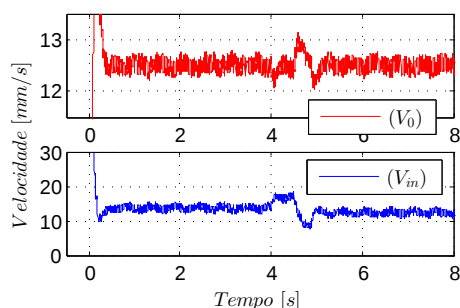


Figura 13: Velocidade (V_0) do Robô e Ação de Controle em Simulação, Malha Fechada com o Controlador PI, com 12, 5 mm/s de Velocidade de Referência (V_i^*).

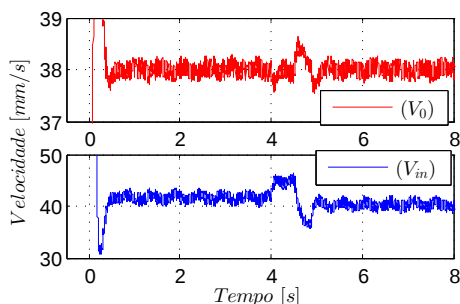


Figura 14: Velocidade (V_0) do Robô e Ação de Controle em Simulação, Malha Fechada com o Controlador PI, com 38 mm/s de Velocidade de Referência (V_i^*).

6 Conclusões

Este trabalho apresentou a modelagem, identificação de parâmetros e proposta de controle da velocidade linear de um robô soldador. Através

de testes práticos, foram identificados os parâmetros da função de transferência do sistema da velocidade linear de saída em relação a velocidade de referência. Além disso, nos testes práticos foram observados problemas de erro de estado estacionário, oscilações e efeito de distúrbio na lei de controle original do robô. Foi então proposto uma malha de controle externa, do tipo PI, com objetivo de aumentar o desempenho do controle. Resultados de simulação foram apresentados e foi possível evidenciar uma melhoria no desempenho.

Referências

- AWS A3.0M/A3.0:2010 (2010). *Standard Welding Terms and Definitions*, American Welding Society (AWS).
- Bingul, Z. and Cook, G. E. (2006). A real-time prediction model of electrode extension for gmaw, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* **11**(1): 47–54.
- Bug-O Systems Corporation (2014). Instructions and parts manual: modular drive system, http://www.bug-o.com/administrator/files/downloadables/MDS_ipm_2_15_1423511987.pdf. [Online; acessado 20-fevereiro-2016].
- Charles, B. (1962). Pancake motor, <http://www.google.com.br/patents/US3061750>. US Patent 3,061,750 [Online; acessado 16-janeiro-2016].
- Daeinabi, K. and Teshnehlab, M. (2007). Industrial arc welding robot defect tracking system in automotive industry, *International Conference on Mechatronics and Automation*.
- II, E. J. L. and Bracarense, A. Q. (2011). *Arc Welding Automation*, InTech.
- Ogata, K. (2001). *Modern Control Engineering 5 Ed.*, Prentice Hall PTR.
- Siqueira, E. B., Mór, J. L., Azzolin, R. Z. and de Oliveira, V. M. (2015). Algorithm to identification of parameters and automatic reproject of speed controller of bldc motor, *11th IFAC - Symposium on Robot Control, SY-ROCO*.
- Steffens, C. R., Leonardo, B. Q., Rosa, V., Silva, Filho, S., Aguiar, M. R., Hüttner, V. and Botelho, S. S. C. (2015). Automated control module based on vbm for shipyard welding applications: Study case on the bug-o matic weaver, *LARS/SBR 2015 I*.