

RASTREADOR LINEAR QUADRÁTICO APLICADO AO CONTROLE DE DESLOCAMENTO DE UM ROBÔ SOLDADOR

Andreyana Sárila Ramos Ferreira¹; Paulo Jefferson Dias de Oliveira Evald²; Jusoan Lang Mór²; Rômulo Thiago Silva da Rosa²; Débora Debiaze de Paula²; Rodrigo Zelir Azzolin³

¹Universidade Federal do Rio Grande – andreynasrf@gmail.com

²Universidade Federal do Rio Grande –

(paulo.evald, jusoan66, romulothiago, deboradebiaze)@gmail.com

³Universidade Federal do Rio Grande – rodrigoazzolin@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A atividade de soldagem é um dos processos mais aplicados na indústria. Essa atividade pode ser classificada segundo o método de sua realização: manual, semiautomático, mecanizado, automático, robótico e com controle adaptativo (MARQUES et al., 2011), sendo o manual e o mecanizado os mais encontrados na indústria naval. Devido aos riscos que a soldagem oferece ao operador, cada vez mais, a robótica tem sido empregada. Além de reduzir tais perigos, a robotização traz mais qualidade a solda, pois mantém maior uniformidade.

O robô soldador Bug-O *Modular Drive System Linear Weaver*, utilizado como plataforma para este trabalho, é bastante utilizado na indústria naval, por ser modular e adequado a soldagens lineares. A modularidade é uma vantagem deste robô, pois facilita a compra e utilização dos módulos. O robô Bug-O é composto por dois módulos principais: a unidade de deslocamento do robô sobre o trilho (*tractor*), que possui um motor de alto torque e baixa inércia, o que resulta em paradas e arrancadas precisas; e o módulo de costura (*weaver*), o qual movimenta a tocha de solda de forma linear realizando a costura da soldagem (BUG-O Systems, 2017).

Sabe-se que uma variação repentina na velocidade do módulo de deslocamento do robô pode afetar a solda de forma prejudicial. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo controlar a velocidade deste módulo, aplicando um controle ótimo, o rastreador linear quadrático.

2. METODOLOGIA

O controle ótimo é uma técnica que atua em um sistema considerando um custo mínimo. A aplicação do controle ótimo em um controlador consiste no projeto de um Regulador (LQR) ou de um Rastreador Linear Quadrático (LQT). O LQR visa guiar os estados para a origem da variável com um erro mínimo possível, enquanto o LQT objetiva o rastreamento de uma referência com o menor erro aceitável (OGATA, 2000). Neste trabalho, será projetado um LQT.

Dado um sistema representado no espaço de estados por (1) e (2), a aplicação do controle ótimo determina uma lei de controle que minimiza um índice de desempenho J, dado por (3).

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx + Du \quad (2)$$

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (3)$$



onde x é o vetor de estado, u o vetor de controle, A, B, C, D são as matrizes invariantes no tempo que representam o sistema no espaço de estados, e Q e R são matrizes *Hermitianas*, definidas positivas, que representam a covariância de medida e de processo, respectivamente. Ressalta-se que o sinal T representa a transposta da matriz.

Para a definição das matrizes diagonais Q e R , será utilizada a Regra de *Bryson*, que consiste em ponderar elementos das matrizes em função dos valores máximos admitidos pelo sistema (FRANKLIN; et al. 2013), conforme apresentado em (4) e (5).

$$Q_{ii} = \frac{1}{\text{maior valor aceitável de } [x_i^2]} \quad (4)$$

$$R_{ii} = \frac{1}{\text{maior valor aceitável de } [u_i^2]} \quad (5)$$

Tais matrizes são utilizadas para o cálculo da matriz definida positiva P que é encontrada solucionando-se a equação reduzida de Riccati, apresentada em (6).

$$A^T P + P A = -Q \quad (6)$$

A matriz de ganho ótima é dada por (7), e a ação de controle por (8).

$$K = R^{-1} B^T P \quad (7)$$

$$u(t) = -Kx(t) \quad (8)$$

onde P é uma matriz real simétrica.

Explicitadas as principais definições da técnica, será apresentado o projeto do LQT para o motor do módulo *tractor*. A representação desse sistema no espaço de estados é mostrada em (9).

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2816,6 & -175,3 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 8,4812 \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0 \quad 0], D = [0] \quad (9)$$

Sabe-se que a posição, velocidade, aceleração e tensão máximas são 1 m, 0,0508 m/s, 0,0026 m/s² e 8 V, respectivamente. Assim, utilizando a Regra de *Bryson* para realizar a ponderação das matrizes Q e R , foram encontradas as seguintes matrizes de ponderação, mostradas em (10).

$$Q = \begin{bmatrix} 150160 & 0 & 0 \\ 0 & 387,5008 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R = 0,0156 \quad (10)$$

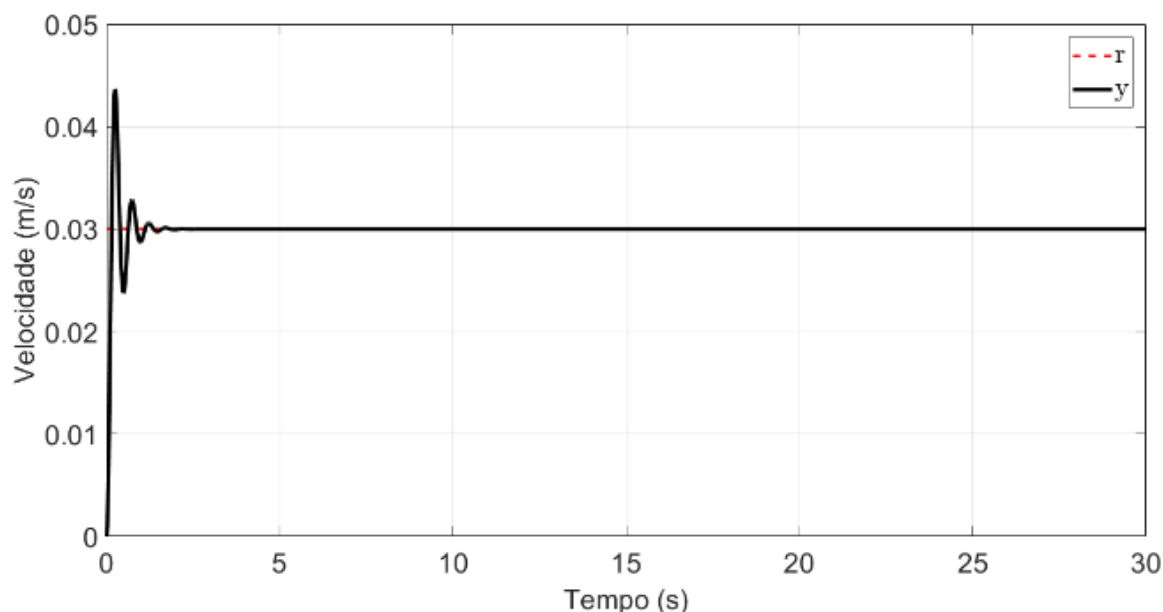
Aplicando-se a fórmula de *Ackermann* para a definição da matriz de ganho ótima (OGATA, 2000), foram encontrados os seguintes ganhos:

$$K = [3100 \quad 195,9 \quad 2,5] \quad (11)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para simulação do controle proposto, a planta e o controlador foram discretizados pelo método de *Euler*. O tempo de amostragem utilizado foi de 1 ms. A simulação durou 30 segundos, tempo suficiente para avaliar o desempenho do controlador. A velocidade de referência é de 30 mm/s, valor usual em campo. A Figura 1 apresenta o rastreamento da referência.

Figura 1 – Rastreamento da referência.



Como pode ser observado, a resposta do sistema apresentou variações ao rastrear a referência, ultrapassando a referência em até 45,57%.

Sabendo que, para a realização da solda, deseja-se ter uma velocidade constante, foi realizada uma refinação na matriz Q , que afeta a matriz de ganho ótima. De forma empírica, foi encontrada a matriz apresentada em (12). Como pode ser visto, apenas o primeiro termo foi alterado, visto que este está relacionado à posição do sistema, variável que está sendo diretamente controlada. Ressalta-se que a velocidade é controlada por consequência, pois é a derivada da posição.

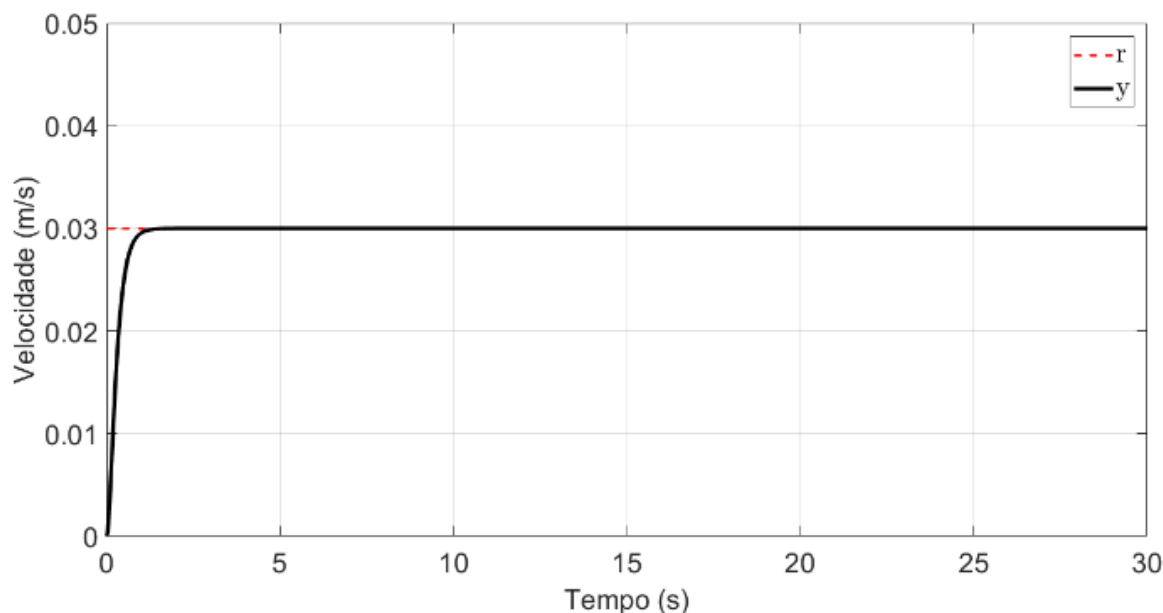
$$Q = \begin{bmatrix} 10000 & 0 & 0 \\ 0 & 387,5008 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Com esta nova matriz, foi realizada uma nova simulação. A Figura 2 apresenta o rastreamento da referência, com a nova matriz de ganho apresentada em (13).

$$K = [800 \quad 81,7127 \quad 1,9247] \quad (13)$$

Note que com esse novo ajuste da matriz de ponderação, a resposta do sistema não apresentou oscilações ao alcançar a referência. Além disso, a referência foi alcançada em um intervalo de tempo muito similar ao intervalo de tempo requerido com a sintonização pela Regra de *Bryson*.

Figura 2 – Rastreamento da referência após a refinação da matriz de ponderação.



4. CONCLUSÕES

Analizando as simulações, pode ser concluído que o Rastreador Linear Quadrático, aplicado ao sistema, modificou sua dinâmica positivamente, fazendo-o atingir a velocidade de referência em 1,89 s, sem apresentar erro em regime permanente. Além disso, o sistema rastreou o valor referencial sem *overshoot*. Desta forma, é perceptível que o controle ótimo é uma alternativa adequada ao controle de velocidade desse sistema. O próximo passo é aplicar esse controle experimentalmente sobre o robô.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUG-O Systems. **Powerful Automation Solutions for Welding and Cutting**. Acessado em 02 out. 2017. Disponível em: <http://www.bugo.com/component/products/?view=product&id=11>.

FRANKLIN, Gene F., POWELL, J. David, EMAMI-NAEINI, Abbas. **Sistemas de Controle para Engenharia**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000.