

Uma Nova Metodologia para o Controle Adaptativo Híbrido de um Manipulador Pneumático

Marcelo H. S. Bomfim* Eduardo J. Lima, II* Neemias S. Monteiro**

* *Laboratório de Automação e Controle, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Caixa Postal 31270-901, Belo Horizonte, MG, BRASIL (e-mail: marcelo.bomfim@ifmg.edu.br, eduardo@demec.ufmg.br).*

***Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, BRASIL (e-mail: neemias@ufmg.br)*

Abstract: The Mckibben muscle is a low-cost option that is widely used, when the application requires actuators with variable stiffness. As advantages, the actuator has natural compliance and high specific power. On the other hand, the muscle presents a non-linear behavior, due to hysteresis, dead band and friction, which makes the phenomenological modelling and pose and force control complex. Thus, this paper proposes to develop an adaptive hybrid controller based on references model for simultaneous pose and force control. As a methodology, Lyapunov's theory will be used as an adaptation mechanism. The results are compared with a conventional PID controller, with an improvement in the characteristics of the transient and steady-state response for an elbow manipulator, when the reference model is overdamped, position EE (root mean square error) is 35,45% lower for joint 1 and 48,66% for joint 2 in operating condition C2, or the operating frequency is 1,59Hz (10 rad/s), EE is 65,26% lower for joint 1 and 42,61% for joint 2, in operating condition C6. Force showed a 22,84% lower error (C2).

Resumo: O músculo de Mckibben é uma opção de baixo custo que é largamente empregada, quando a aplicação exige atuadores com rigidez variável. Como vantagens o atuador possui complacência natural e elevada potência específica. Em contrapartida, o músculo apresenta comportamento não linear, devido à histerese, banda morta e atrito, o que torna complexo o modelamento fenomenológico e o controle de pose e de força do músculo. Assim, esse artigo propõe desenvolver um controlador adaptativo híbrido baseado em modelos de referência para o rastreamento simultâneo de pose e força. Como metodologia, será utilizada a teoria de Lyapunov para o desenvolvimento do mecanismo de adaptação. Os resultados do controlador proposto são comparados com um controlador PID convencional, sendo observada melhoria nas características da resposta transitória e de regime permanente para um manipulador cotovelo, quando o modelo de referência é superamortecido, EE (erro eficaz) de posição é 35,45% menor para a junta 1 e 48,66% para a junta 2 na condição operacional C2, ou a frequência de operação é 1,59 Hz (10 rad/s), EE é 65,26% menor para junta 1 e 42,61% para a junta 2, na condição operacional C6. Já a força apresentou um erro 22,84% menor (C2).

Keywords: Cooperative robotics; human-robot physical interaction; varying stiffness; Mckibben muscle; adaptive hybrid controller; Lyapunov's theory; reciprocal bases; hybrid control law; elbow manipulator.

Palavras-chaves: Robótica cooperativa; interação física homem-robô; rigidez variável; músculo de Mckibben; controlador adaptativo híbrido; teoria de Lyapunov; bases recíprocas; lei de controle híbrida; manipulador cotovelo.

1. INTRODUÇÃO

O músculo de Mckibben é um tipo de músculo artificial pneumático (MAP) desenvolvido na década de 1950 para o emprego em órteses de baixo custo. Isso deve-se ao fato do atuador apresentar características que se assemelham aos músculos biológicos, em termos de alcance dinâmico, densidade de trabalho, velocidade máxima de operação e eficiência energética (Chou and Hannaford, 1996).

Como desvantagem o atuador possui não linearidades de complexo modelamento. As não linearidades devem-se à histerese intrínseca aos materiais poliméricos, presença de volume morto em baixas pressões e atrito de Coulomb com resposta não linear. Assim, o uso de técnicas que utilizam controladores de ganhos fixos, tais como o controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é proibitivo, pois o sistema apresentará diferentes desempenhos, quando houver mudanças nas condições operacionais.

Pujarra-Arrese e colaboradores (2010) compararam quatro controladores (PID, robusto, por modos deslizantes e por

malha de pressão) para o rastreamento de posição em um mecanismo de 1 grau de liberdade (GDL) atuado por músculos de Mckibben. Como resultados o controlador por malha de pressão apresentou o menor erro em regime permanente.

A equipe do professor Kazuhiza Ito desenvolveu controladores PI para o acionamento de um músculo de Mckibben hidráulico (Kobayashi e Ito, 2015). No artigo foi analisado que um controlador convencional não possui desempenho satisfatório, sendo necessário a utilização de técnicas de controle avançadas. Tal técnica foi apresentada em Kobayashi *et al.* (2014), em que a trajetória do músculo foi rastreada através de um MPC (*Model Predictive Controller*), com boa precisão.

Controladores adaptativos de posição aplicados à músculos de Mckibben, em que a regra do MIT (*Massachusetts Institute of technology*) foi utilizada como mecanismo de adaptação, foram analisados em Tonietti e Bicchi (2002), Skorina *et al.* (2017), Moučka (2019) e Irshaidat *et al.* (2019). Já em Jitosh e Fujii (2017) a teoria de Lyapunov foi utilizada como algoritmo de adaptação. No presente trabalho a teoria de Lyapunov foi utilizada para o desenvolvimento do algoritmo da adaptação. Apesar da teoria de Lyapunov ter maior complexidade para implementação, ela tem a vantagem de incorporar a análise de estabilidade em seu desenvolvimento, o que garante estabilidade assintótica ao sistema.

Controladores adaptativos de pose e força em mecanismos acionados por músculos de Mckibben não foram observados na literatura, o que caracteriza uma investigação inédita analisar sua resposta. Dessa forma, o artigo propõe analisar e avaliar o uso de uma lei de controle híbrida única, o que formaliza a proposta de uma contribuição inédita, pois propostas anteriores utilizam matrizes de comutação para chavear as leis de pose e força em controladores híbridos (Craig, 2005) ou controladores baseados em leis acopladas e que necessitam do conhecimento prévio das propriedades mecânicas da interação física entre o manipulador e o ambiente (Perdereau e Drouin, 1993; Adorno e Albán, 2017).

Assim, a finalidade da pesquisa é desenvolver um controlador adaptativo híbrido, a fim de rastrear a força e a pose de um modelo de referência. O controlador será utilizado em um mecanismo de 2 GDL atuado por músculos de Mckibben na configuração agonista/antagonista ou simplesmente manipulador J2 na presente pesquisa. Dessa forma, a escolha do controlador adaptativo converge para um sistema adaptativo por modelo de referência ou MRAC (*Model Reference Adaptive Controller*) (Aström e Wittenmark, 2008; Scherer *et al.*, 2014; Silva Júnior e de Araújo, 2016).

Em seu aspecto organizacional, o presente trabalho é dividido em 6 seções. A Seção 2 tem o objetivo de apresentar a metodologia proposta e o aparato experimental. Fica a cargo da Seção 3 o modelamento fenomenológico do músculo e do manipulador. Na Seção 4 a inédita teoria de controle é formulada. A Seção 5 é responsável pelas simulações. Finalizando, a Seção 6 apresenta as considerações finais e os próximos passos para a continuidade da pesquisa.

2. METODOLOGIA E O APARATO EXPERIMENTAL

2.1 Métodos para o desenvolvimento do sistema de controle

A presente pesquisa pode ser dividida basicamente em três macroetapas, a saber:

1. Formulação da teoria de controle;
2. Simulações; e
3. Validação da teoria.

A primeira macroetapa é a formulação da teoria de controle híbrida adaptativa. O desenvolvimento do sistema de controle é baseado nos controladores adaptativos por modelo de referência (MRAC). O mecanismo de adaptação utilizado é a teoria de Lyapunov. A segunda macroetapa consiste na realização de simulações com o auxílio do *software* Matlab/Simulink®. Nessa etapa, o desempenho do controlador será analisado para diferentes condições de operação, diferentes valores de referência e formas de onda de entrada. Finalizando, a validação tem a finalidade de analisar o comportamento do manipulador em ensaios experimentais, o que fará parte de pesquisas futuras.

2.2 O manipulador cotovelo

A Fig. 1 apresenta o manipulador cotovelo acionado por músculos de Mckibben (Manipulador J2). Pela figura, pode ser analisado que o mecanismo possui 2 GDL e juntas articuladas.

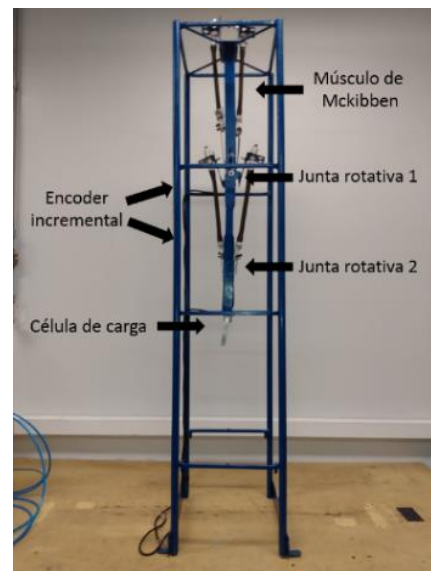


Fig. 1. Manipulador cotovelo acionado por músculos de Mckibben.

Os instrumentos de medição, equipamentos e softwares utilizados encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Instrumentos de medição, equipamentos e *softwares* utilizados na pesquisa.

Instrumentos /equip./software	Modelo	Fabricante	Resolução
Pressostato digital	-	FESTO	0,01 bar
Válvula reguladora de pressão proporcional	P31PA12 AD2VD1 A	Parker	Tensão elétrica (1 V/1 bar)
Encoder incremental	MTI-EI01	Meganotti	600 PPR
Célula de carga	-	-	98 N/24 bits
Módulo Conversor PWM	-	-	PWM/0-10 V
Simulink®	2016 a)	MATHWORKS	-
Placa de desenvolvimento	Arduino Uno®	Arduino	-

A Fig. 2 apresenta o esquema de ligações de *hardware* para o manipulador J2. Pela Fig. 2 pode ser analisado que a interface sensores/atuadores foi desenvolvida a partir de uma placa de desenvolvimento ArduinoUno®.

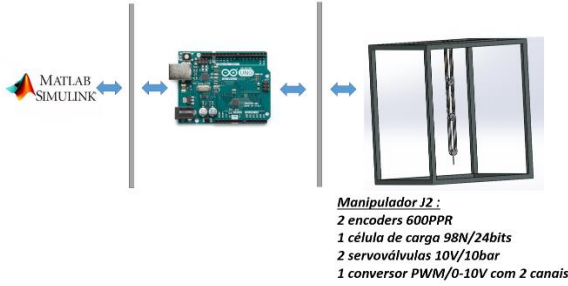


Fig. 2. Esquema de ligações de *hardware* para o manipulador J2.

Cabe ressaltar que o sistema de controle foi desenvolvido no Simulink®. Um sinal de comando PWM (*Pulse Width Modulation*) é enviado para um módulo de conversão PWM/analógico e um comando de 0-10 V é enviado para a válvula proporcional. A leitura dos encoders é realizada a partir de portas digitais e a leitura da célula de carga é realizada a partir de portas analógicas.

3. MODELAMENTO FENOMENOLÓGICO DO MANIPULADOR E MÚSCULO

3.1 Modelos cinemático e dinâmico do manipulador

As expressões (1) e (2) apresentam o modelo cinemático inverso para o manipulador cotovelo (Bomfim al., 2014). Para a simplificação da notação, s_n representa $\sin(q_n)$ e c_n representa $\cos(q_n)$.

$$q_2 = \text{atan2}(D, \pm\sqrt{1-D^2}) \quad (1)$$

$$q_1 = \text{atan2}(P_y, P_x) - \text{atan2}(L_2 s_2, L_1 + L_2 c_2) \quad (2)$$

em que q_n é o ângulo da respectiva junta; P é a coordenada desejada do efetuador e L_n é o comprimento do elo e $D = \frac{P_x^2 + P_y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2}$.

Por outro lado, (3) e (4) apresentam o modelo dinâmico.

$$\tau_1 = d_{11}\ddot{q}_1 + d_{12}\ddot{q}_2 + C_{121}q_1\dot{q}_2 + C_{211}q_2\dot{q}_1 + C_{221}\dot{q}_2^2 + g_1 - [F_x(L_1 s_1 + L_2 s_{12}) + F_y L_2 s_{12}] \quad (3)$$

$$\tau_2 = d_{21}\ddot{q}_1 + d_{22}\ddot{q}_2 + C_{112}\dot{q}_1^2 + g_2 + F_x(L_1 c_1 + L_2 c_{12}) + F_y(L_2 c_{12}) \quad (4)$$

no qual τ_n é o torque da respectiva junta; d_{nn} é o termo da matriz de inércia; C_{nnn} são os símbolos de Christoffel; g_n são os termos gravitacionais e F é a força no efetuador (Spong *et al.*, 2020).

3.2 Modelo fenomenológico do músculo de Mckibben

Do ponto de vista dinâmico, o músculo pode ser modelado em analogia a um sistema massa-mola-amortecedor. Assim, (5) apresenta o comportamento do atuador (Reynolds *et al.*, 2003).

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = F_c - Mg \quad (5)$$

sendo que M é a carga suportada pelo músculo (kg); B é o amortecimento do sistema (Ns/m); K é a rigidez do músculo (N/m); F_c é a força de contração (N); e g é a aceleração gravitacional (9,81m/s²).

Bomfim e Lima II (2019) propuseram um modelo fenomenológico em que foram criados modelos equivalentes para a massa, rigidez e amortecimento da junta robótica. Assim, (5) pode ser reescrita por meio de (6).

$$\ddot{q} = \frac{F_c}{M} - g - \frac{B}{M}\dot{q} - \frac{K}{M}q \quad (6)$$

em que $q = [q_1, q_2]^T$ é um vetor coluna que representa o Espaço de Configurações do manipulador.

Assim, dado um manipulador de n GDL, cada junta pode ser representada por uma equação diferencial representada por (7).

$$\ddot{q} = -2\xi w_n \dot{q} - w_n^2 q + \frac{F_c}{M} - g \quad (7)$$

no qual ξ e w_n são, respectivamente, o coeficiente de amortecimento e a frequência natural equivalentes da junta robótica.

4. TEORIA DE CONTROLE HÍBRIDA ADAPTATIVA

4.1 Estrutura do controlador

Para um manipulador de n GDL, a lei de controle para a enésima junta robótica pode ser dada por (8).

$$u_n = \theta_{n1} u_{cn} - \dot{\theta}_{n2} y_n - \theta_{n3} y_n \quad (8)$$

em que θ_{n1} , θ_{n2} e θ_{n3} são os parâmetros de ajuste das parcelas *feedforward*, derivativa e de realimentação ordinária, respectivamente; u_{cn} é o valor de referência; y_n é a saída e u_n é a ação de controle.

4.2 Estrutura do modelo de referência

O modelo de referência a ser rastreado pelo controlador, pode ser dado pela função de transferência representada por (9). Nessa equação são informados o desempenho esperado

na planta em termos de sobressinal, tempo de subida e acomodação, que podem ser controlados indiretamente pelos valores de ξ e w_n do modelo.

$$\frac{Y_{mn}(s)}{u_{cn}(s)} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2} = \frac{b_m}{s^2 + a_{1m}s + a_{2m}} \quad (9)$$

sendo Y_{mn} é a saída do modelo de referência; u_{cn} é a referência ou sinal de comando; ξ é o coeficiente de amortecimento e w_n é a frequência natural, ambos desejados na junta.

4.3 Equação do erro

De uma forma geral, o erro é dado por (10).

$$e_n = y_n - y_{mn} \quad (10)$$

em que e_n é o erro; y_n é o sinal de saída da planta e y_{mn} é a saída do modelo de referência. A expressão (10) pode ser derivada em relação ao tempo, o que originará (11).

$$\begin{aligned} \frac{de_n}{dt} = \frac{dy_n}{dt} - \frac{dy_{mn}}{dt} = -a_{2m}e_n - a_{1m} - y_n(a_2 + b\theta_{n3} - \\ a_{2m}) - \frac{dy_n}{dt}(a_2 + b\theta_{n2} - a_{2m}) + u_{cn}(b\theta_{n1} - b_m) \end{aligned} \quad (11)$$

4.4 Função candidata de Lyapunov

Via de regra as funções candidatas de Lyapunov são funções quadráticas que têm a finalidade de garantir estabilidade assintótica para o sistema, isto é, há garantia de convergência do erro para zero. Assim, definiu-se (12) como a função de Lyapunov para a junta do manipulador.

$$\begin{aligned} V_n(e_n, \theta_{n1}, \theta_{n2}, \theta_{n3}) = \frac{1}{2}(e_n + \frac{1}{b\gamma_{n3}}(a_2 + b\theta_{n3} - a_m))^2 + \\ \frac{1}{b\gamma_{n1}}(b\theta_{n1} - b_m)^2 + \frac{1}{b\gamma_{n2}}(a_1 + b\theta_{n2} - a_{1m})^2 \end{aligned} \quad (12)$$

sendo que γ_n são os ganhos de adaptação para a enésima junta.

Teorema 1. Lei de controle adaptativa híbrida: considere o problema do controlador adaptativo híbrido de uma junta robótica na configuração agonista/antagonista. Assumindo um modelo linearizado através de uma função de transferência real estritamente positiva, os parâmetros de ajuste são representados por (13), (14) e (15).

$$\frac{d\theta_{n1}}{dt} = -\gamma_{n1}u_{cn}e_n \quad (13)$$

$$\theta_{n2} = \gamma_{n2}y_n e_n \quad (14)$$

$$\frac{d\theta_{n3}}{dt} = \gamma_{n3}y_n e_n \quad (15)$$

Prova: dada a função candidata de Lyapunov (expressão (12)), sua derivada temporal é fornecida por (16):

$$\begin{aligned} \frac{dV_n}{dt} = \frac{a_{2m}e_n^2}{2} - a_{1m}e_n + \frac{1}{\gamma_{n1}}(b\theta_{n1} - b_m)\left(\frac{d\theta_{n1}}{dt} + \right. \\ \left. \gamma_{n1}u_{cn}e_n\right) + \frac{1}{\gamma_{n2}}(a_2 + b\theta_{n2} - a_{2m})\left(\frac{d\theta_{n2}}{dt} - \gamma_{n2}\frac{dy_n}{dt}e_n\right) + \\ \frac{1}{\gamma_{n3}}(a_2 + b\theta_{n3} - a_{2m})\left(\frac{d\theta_{n3}}{dt} - \gamma_{n3}y_n e_n\right) \end{aligned} \quad (16)$$

Substituindo os valores das expressões (13), (14) e (15) em (16), as expressões (17) e (18) podem ser obtidas:

$$\frac{dV_n}{dt} = -\left(\frac{a_{2m}e_n^2}{2} + a_{1m}e_n\right) \quad (17)$$

$$\frac{dV_n^2}{dt^2} = -(a_{2m}e_n + a_{1m})\frac{de_n}{dt} \quad (18)$$

A expressão (17) informa que há garantia de estabilidade na resposta do sistema e (18) informa que há garantia de estabilidade assintótica de acordo com a teoria de Lyapunov (Åström e Wittenmark, 2008).

De forma generalizada, a pressão de controle aplicada em cada junta é representada por (19), em que os parâmetros α são levantados através da metodologia BLII (Bomfim e Lima II, 2019).

$$U_n = \alpha_{n1} + \alpha_{n2}u_{pn} + \alpha_{n3}u_{Fn} \quad (19)$$

em que U_n é a ação de controle enviada para a planta (bar); u_{pn} é a ação de controle de pose (rad) e u_{Fn} é a ação de controle de força (N).

Consideração 1. Para que o controlador híbrido possa atuar é necessário que haja uma restrição de pose, de acordo com a teoria das bases recíprocas.

Consideração 2. Diferentemente do controlador híbrido construído em Craig (2005) e em Adorno e Albán (2017), com o Teorema 1 é possível desenvolver uma lei de controle adaptativa única, ou seja, que contemple pose e força, sendo desnecessária a utilização de matrizes de comutação ou sistemas em cascata.

Para o caso específico do manipulador J2, as pressões de controle são dadas por (20) e (21). A expressão (20) representa a ação de controle em unidade de pressão para a junta 2 e (21) para a junta 1.

$$U_2 = 1,4142 + 0,074u_{p2} + 1,0779u_{F2} \quad (20)$$

$$U_1 = -0,0278 + 0,3695u_{p1} + 0,0572u_{p2} + 1,8584u_{F1} \quad (21)$$

4.5 Diagrama em blocos do sistema de controle proposto

A Fig. 3 apresenta um controlador adaptativo híbrido acoplado. Nessa configuração existe apenas um MRAC de pressão e (20) ou (21) são utilizadas como leis de controle. A vantagem de utilizar a malha acoplada é que é necessária apenas uma válvula proporcional por junta.

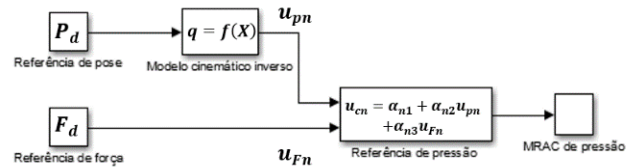


Fig. 3. Diagrama em blocos do sistema de controle proposto acoplado.

A Fig. 4 apresenta o MRAC proposto no artigo. Pela figura, pode ser analisado que o diagrama em blocos corresponde ao núcleo do sistema de controle e pode ser utilizado para o controle de pressão, pose ou força, na presente pesquisa. O controlador pode ser dividido em três parcelas descritas

analiticamente por (13), (14) e (15). A primeira parcela consiste em um controlador *feedforward*. A segunda parcela é um derivador e a terceira é uma realimentação ordinária.

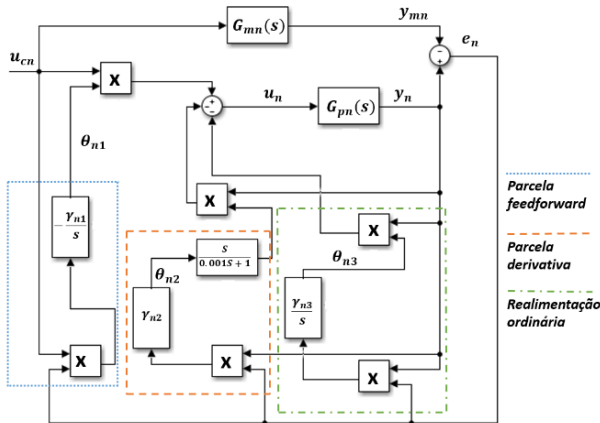


Fig. 4. Diagrama em blocos do MRAC proposto.

A parcela *feedforward* tem a finalidade de adicionar ao sistema uma ação de controle antecipatória, atenuando os efeitos das perturbações. Já o derivador ou controlador tipo D reduz as oscilações do sistema, tendo em vista que a junta robótica atuada por músculos pneumáticos tem baixo coeficiente de amortecimento ($0,01 \leq \xi \leq 0,35$), no caso do manipulador J2. A última parcela é a realimentação ordinária, que tem a finalidade de reduzir o erro do sistema em regime permanente.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

5.1 Simulações com o controlador adaptativo híbrido

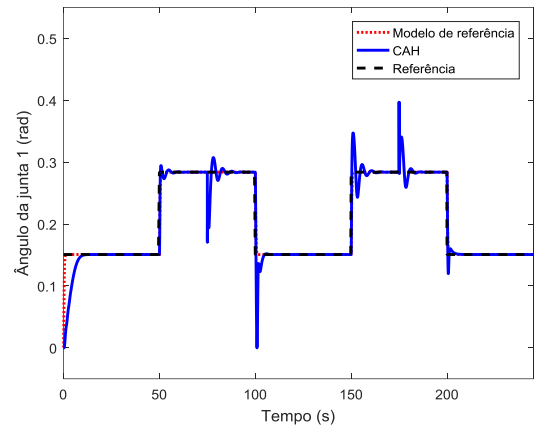
Para simulações do sistema é proposta uma referência de pose ($P_x = 0,45 \text{ m}$ e $P_y = 0,25 \text{ m}$), concomitante a uma referência de força ($F_x = 0,0 \text{ N}$ e $F_y = 4,0 \text{ N}$) no efetuador do manipulador. Um sinal de onda quadrada com amplitude de $0,05 \text{ m}$, período de 100 segundos e largura de pulso de 50% do período foi adicionado ao valor de P_x . Em todas as simulações, uma perturbação de $3,92 \text{ N}$ foi aplicada no efetuador do manipulador no tempo de 75 segundos , sendo removida 100 segundos após sua aplicação.

Os parâmetros ξ e w_n que compõem (7) e representam a resposta dinâmica para cada junta foram obtidos a partir da metodologia BLII (Bomfim e Lima II, 2019). A Tabela 2 apresenta os parâmetros de cada junta. Pela tabela, pode ser analisado que a junta 1 possui menor ξ e w_n , quando comparada com a junta 2. Tal resposta fenomenológica é facilmente elucidada quando analisada em analogia com o sistema pendular. À medida que o peso e o comprimento do pêndulo são ampliados, seus parâmetros ξ e w_n são reduzidos.

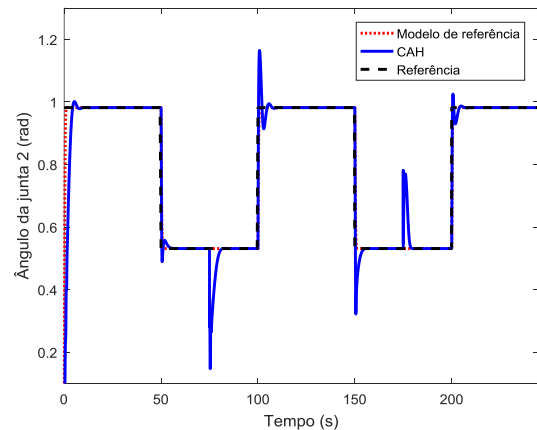
Tabela 2. Parâmetros equivalentes da junta robótica calculados a partir da metodologia BL2.

Parâmetro	Junta 1	Junta 2
Pressão	4,58 bar	4,74 bar
w_n	5,5 rad/s	13,5 rad/s
ξ	0,21	0,27

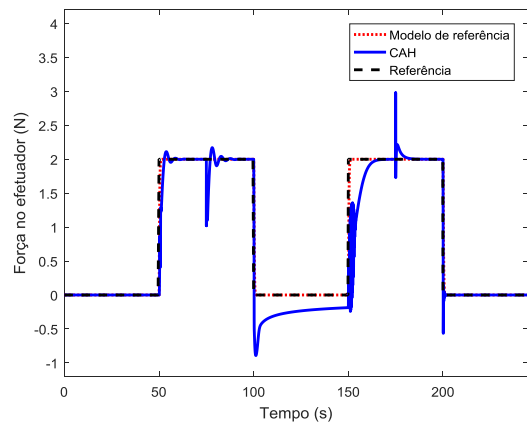
A Fig. 5 apresenta a resposta do sistema para uma entrada do tipo onda quadrada, rica em frequência, com amplitude de $0,05 \text{ metros}$ e período de 100 segundos . Tal forma de onda foi adicionada ao valor de P_x . Para força, um sinal de $-4,0 \text{ N}$ foi adicionado em F_y com período de 100 segundos . O modelo de referência possui frequência natural de $7,0 \text{ rad/s}$ e coeficiente de amortecimento igual a 1 . Pelas figuras, pode-se concluir que o controlador proposto é capaz de rejeitar perturbações. Nas próximas figuras CAH na legenda é o controlador adaptativo híbrido proposto, PID é o controlador PID e MR é o modelo de referência.



a)



b)



c)

Fig. 5. Resposta do sistema para C1. a) resposta da junta 1, b) resposta da junta 2 e c) força no efetuador.

A Fig. 6 apresenta os parâmetros de ajuste θ_{11} , θ_{12} e θ_{13} . Pela figura, pode ser observado que em um tempo de 10 segundos cada parâmetro de ajuste converge para seu valor final. Pela Fig. 6, pode ser analisado que nos tempos de 75 e 175 segundos os parâmetros de ajuste se adequam às novas condições operacionais devido a perturbação de 3,92 N.

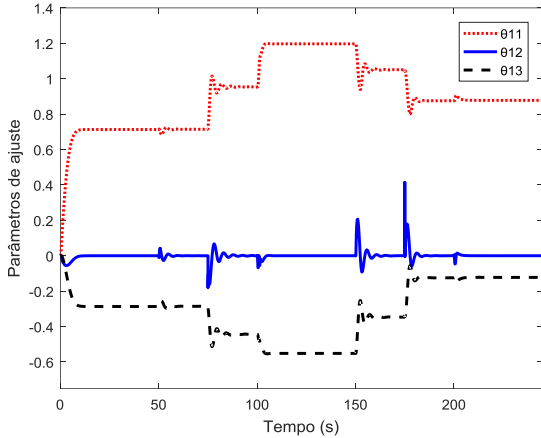


Fig. 6. Parâmetros de ajuste θ_{11} , θ_{12} e θ_{13} para a junta 1.

5.2 Controlador híbrido adaptativo versus controlador PID clássico - simulações

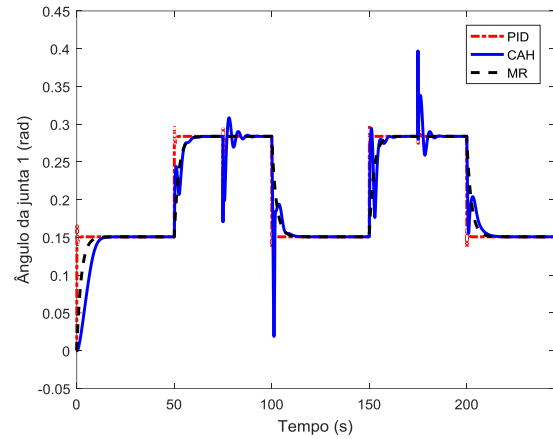
Para a comparação entre o controlador adaptativo híbrido e um controlador PID clássico foram propostas seis condições de operação. Essas condições são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Condições de operação para análise de desempenho do controlador.

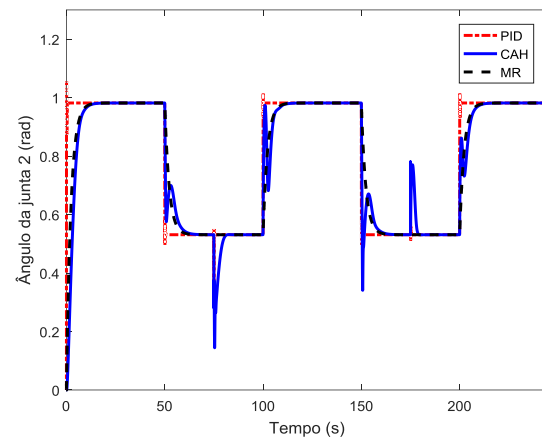
Condição	Amplitude (rad) P_x	w_n do modelo (rad/s)	ξ do modelo	Força no efetuador (N)	Período (s)/freq. (rad/s)
C1	0,45+0,05	7	1	4	100s
C2	0,45+0,05	7	8	4	100s
C3	0,45+0,05	7	0,14	4	100s
C4	0,45+0,01	7	1	-	0,1rad/s
C5	0,45+0,01	7	1	-	1rad/s
C6	0,45+0,01	7	1	-	10rad/s

A Fig. 7 apresenta as respostas das juntas 1 e 2 para variações no valor de ξ . Na Fig. 7 um ξ de 8 foi utilizado no modelo de referência. Pela figura, pode ser observado que o MRAC segue a condição de superamortecimento imposta pelo modelo. Já o controlador PID apresentou uma resposta similar a $\xi = 1$.

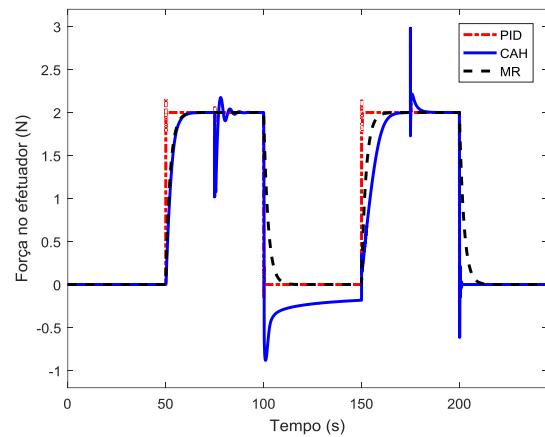
Na Fig. 8 o sinal de onda quadrada foi substituído por uma entrada senoidal. A ideia consiste em variar a frequência do sinal de entrada, analisando seu efeito na resposta do sistema. Em todas as condições, C4, C5 e C6 um sinal senoidal de amplitude 0,01 m e velocidade angular variando entre 0,1, 1 e 10 rad/s foram utilizados. Pela Fig. 8, pode ser analisado que houve uma redução da amplitude do sinal de referência, juntamente com sua defasagem. Assim, caso o manipulador opere em velocidades angulares acima de 7 rad/s, a frequência natural deve ser modificada para um valor superior no modelo de referência, para que não haja atenuação e defasagem do sinal de referência.



a)



b)



c)

Fig. 7. Estudo comparativo entre o controlador MRAC híbrido e o PID com $\xi = 8$, condição C2. a) resposta da junta 1, b) resposta da junta 2 e c) força no efetuador.

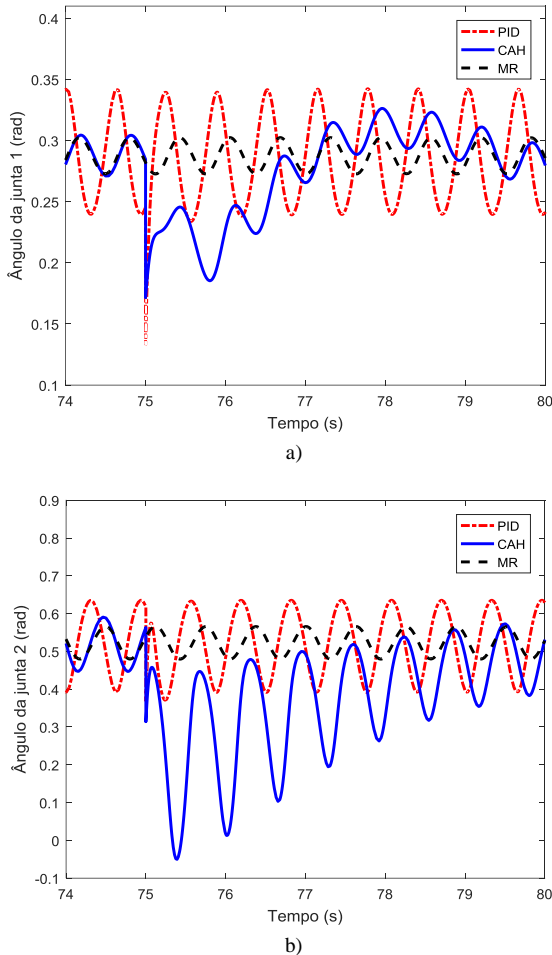


Fig. 8. Estudo comparativo entre o controlador MRAC híbrido e o PID com $\xi = 1$, condição C6. a) resposta da junta 1 e b) resposta da junta 2.

5.3 Análise do erro eficaz das simulações

A métrica utilizada para mensuração da divergência entre o sinal de referência e as respostas dos controladores será a raiz do erro quadrático médio ou erro eficaz (EE). As Tabelas 4 e 5 apresentam os erros encontrados. Pelas tabelas, pode ser analisado que o EE é menor no MRAC apenas quando o modelo de referência é superamortecido (C2) ou a frequência de operação é alta (C6). Isso ocorre devido ao tempo de convergência dos parâmetros de ajuste, durante a rejeição de distúrbios e mudanças de borda de subida e descida da forma de onda quadrada.

Tabela 4. Erro eficaz de posição (rad) para as diferentes condições de operação.

Condição	EE – PID (junta 1)	EE – MRAC (junta 1)	EE – PID (junta 2)	EE – MRAC (junta 2)
C1	0,0256	0,0295	0,0951	0,1144
C2	0,0519	0,0335	0,2082	0,1069
C3	0,0302	0,0339	0,1195	0,1619
C4	0,0169	0,0234	0,02962	0,0690
C5	0,0154	0,0193	0,0338	0,0583
C6	0,0403	0,0140	0,0995	0,0571

Tabela 5. Erro eficaz de força (N) para as diferentes condições de operação.

Condição	EE – PID	EE – MRAC
C1	0,6671	1,2472
C2	1,2805	0,9880
C3	0,7968	1,5617

Nas condições de operação C4 e C5, o controlador PID apresentou menor EE, pois rejeita perturbação mais facilmente. Para analisar a condição C6 é necessário avaliar o desempenho do sistema no domínio da frequência. A junta 1 possui frequência natural de 5,5 rad/s e na junta 2 essa frequência é de 13,5 rad/s. Na C6 o sinal de entrada tem uma frequência de 10 rad/s. Assim, a resposta do MRAC da junta 1 apresenta mesma amplitude e fase do modelo de referência. Na junta 2 ocorre uma defasagem e aumento da amplitude do MRAC em relação ao modelo de referência, pois a frequência do sinal de entrada está próxima da frequência ressonante da junta.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRÓXIMOS PASSOS DA PESQUISA

O presente trabalho atingiu seu objetivo de desenvolver um controlador adaptativo híbrido por modelo de referência. Para tanto, foi desenvolvida uma lei de controle que contemplasse parâmetros de ajuste para a pose e a força no efetuador do manipulador.

Nas simulações C1 e C3 o controlador adaptativo apresentou EE maior que o controlador PID. Quando o modelo de referência é sintonizado em $\xi = 8$ o EE é menor no MRAC híbrido. Apesar do EE ser maior no MRAC nas condições C1 e C3, o controlador é forçado a seguir o modelo de referência no caso adaptativo. Já o PID apresenta respostas aproximadas, mesmo com a variação de ξ .

Já nas simulações C4 e C5 as respostas do controlador adaptativo e do PID foram próximas, sendo que o MRAC apresentou maior erro. Isso ocorre devido ao tempo de convergência dos parâmetros de ajuste. Na C6 a junta 1 segue o modelo de referência e a junta 2 sofre um aumento da amplitude e defasagem do sinal, devido ao fato da frequência do sinal de entrada estar próxima da frequência natural da junta. Assim, frequências acima de 0,159 Hz não são recomendadas para a operação do sistema.

Pelas Fig. 5 a) e Fig. 6 fica evidente que o MRAC necessita de um tempo de aproximadamente 10 segundos para que ocorra a convergência dos parâmetros de ajuste. Durante esse período, o desempenho do sistema de controle é deteriorado, ocasionando em um maior EE nas condições operacionais C1, C3, C4 e C5. Uma possível solução a ser analisada como próximos passos da pesquisa é a junção do controlador PID com o MRAC, com a finalidade de melhorar o desempenho do controlador adaptativo durante o tempo de convergência.

Como direções para a continuidade da pesquisa os autores sugerem a troca do látex, por outros materiais elásticos, tais como câmara de ar de bicicleta, por exemplo. Propõem

também a utilização da técnica de controle proposta em exoesqueletos, órteses e próteses, em que o modelo de referência possa ser oriundo de EMG (eletromiograma), EEG (eletroencefalograma) ou de banco de dados existentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao IFMG/Congonhas pelo empréstimo do Lab. de Hidropneumática para a realização de testes e aos revisores pelas contribuições relevantes. Agradecemos também ao professor Taniel Silva Franklin pela ajuda na geração dos gráficos nas simulações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albán, D.S. and Adorno, B.V. (2017). External Hybrid Force/Pose Controller for Manipulator Robots using Dual Quaternion Algebra. IEEE. In 2017 Latin American Robotics Symposium (LARS) and 2017 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), pp. 1- 6.
- Aström, K. and Wittenmark, B. (2008). *Adaptive Control*, 573p. Dovler: New York, USA.
- Bomfim, M.H.S.; Bracarense, A.Q.; Coelho, F.G.F.; Lima II, E.J.; Gontijo, R.A. (2014). A Low Cost Methodology Applied To Remanufacturing of Robotic Manipulators. XX Congresso Brasileiro de Automática, pp. 1506-1513.
- Bomfim, M.H.S. e Lima II, E.J. (2019). Uma Nova Metodologia para a Caracterização de Músculos de McKibben e sua Aplicação em um Manipulador Pneumático. XIV Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações, USP, São Carlos.
- Chou, C.P. and Hannaford, B. (1996). Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscles. *IEEE Transactions on robotics and automation*, Vol. 12, No 1, pp. 90- 102.
- Craig, J. (2005). *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, ser. Reading.
- Irshaidat, M.A.E.; Soufian, M.; Al-Ibadi, A.; Nefti-Meziani, S. (2019). A Novel Elbow Pneumatic Muscle Actuator for Exoskeleton Arm in Post-Stroke Rehabilitation. IEEE. In 2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), pp. 630- 635.
- Jitosho, H. and Fujii, F. (2017). A Reference Augmentation Design for the Adaptive Control of a Wearable Assist Robot Powered by the McKibben Actuator. In 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), pp. 1099- 1104.
- Kobayashi, W.; Ito, K.; Yamamoto, S.I. (2014). Displacement Control of Water Hydraulic McKibben Muscle with Load Compensation-Application of Model Predictive Control. In Proc. of the 9th JFPS International Symposium on Fluid Power 2014.
- Kobayashi, W. and Ito, K. (2015). Displacement Estimation of Tap-Water Driven McKibben Muscles. IEEE. In 2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), pp. 672- 676.
- Moučka, M. (2019). Model Reference Adaptive Control of Pneumatics Artificial Muscle. IEEE. In 2019 22nd International Conference on Process Control (PC19), pp. 156- 160.
- Perdereau, V. and Drouin, M. (1993). A New Scheme for Hybrid Force-Position Control. *Robotica*, Vol. 11, No 5, pp. 453- 464.
- Pujana-Arrese, A.; Mendizabal, A.; Arenas, J.; Prestamero, R.; Landaluze, J. (2010). Modelling in Modelica and Position Control of a 1-DoF Set-up Powered by Pneumatic Muscles. *Mechatronics*, Vol. 20, No 5, pp. 535- 552.
- Reynolds, D.; Repperger, D.; Phillips, C. and Bandry, G. (2003). Modeling the Dynamic Characteristics of Pneumatic Muscle. *Annals of biomedical engineering*, Vol. 31, No. 3, pp. 310- 317.
- Scherer, L.G.; Tambara, R.V.; de Camargo, R.F.; Gründling, H.A. (2014). Controle Adaptativo Discreto Aplicado à Regulação de Tensão de Sistemas com Gerador de Indução. XX Congresso Brasileiro de Automática, pp. 1188- 1195.
- Silva Junior, F.C. e de Araújo, A.D. (2016). Um Controlador Adaptativo por Posicionamento de Polos e Estrutura Variável de Ordem Fixa para Plantas Intervalares. XXI Congresso Brasileiro de Automática, pp. 3673- 3678.
- Skorina, E.H.; Luo, M.; Tao, W.; Chen, F.; Fu, J.; Onal, C.D. (2017). Adapting to Flexibility: Model Reference Adaptive Control of Soft Bending Actuators. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 2, No 2, pp. 964-970.
- Spong, M.W.; Hutchinson, S.; Vidyasagar, M. (2020). *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Sons.
- Tonietti, G. and Bicchi, A. (2002). Adaptive Simultaneous Position and Stiffness Control for a Soft Robot Arm. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, pp. 1992- 1997.