Aplicação do IoTControl em laboratório remoto: controle sem modelo de um servomecanismo

Danilo Oliveira Martins * **Gabriel P. das Neves** ** **Bruno A. Angélico** ***

* *Depto. de Eng. de Telecom. e Controle, Escola Politécnica da USP (e-mail: danilo.oliveira.martins@usp.br)*
** *Insper São Paulo e Escola Politécnica da USP (e-mail: gabriel.pereira.neves@alumni.usp.br)*
*** *Depto. de Eng. de Telecom. e Controle, Escola Politécnica da USP (e-mail: angelico@usp.br).*

Abstract: The servo mechanism system is commonly used in introductory experiments in Control Laboratory. In this work, the experimental environment of the servo mechanism (MS15) is equipped with IoTControl, providing remote access via the Internet of Things to the control plant. Thus, the implementation of the open-source framework for servo mechanism control facilitates laboratory experimentation, providing graphical results and records to analyze the dynamic behavior of the system, and allows the user to visualize the behavior of the control plant through a camera. As an example of application, a model-free control based on ultra-local algebraic estimator is considered for the angular position loop. The results and conclusions are presented.

Resumo: O sistema de servomecanismo é comumente utilizado em experimentos introdutórios em Laboratório de Controle. Neste trabalho, o ambiente experimental do servomecanismo (MS15) é equipado com IoTControl proporcionando acesso remoto via internet das coisas à planta de controle. Dessa forma, a implementação do *framework open source* para controle do servomecanismo facilita a experimentação do laboratório de controle, fornecendo os resultados gráficos e registros para analisar o comportamento dinâmico do sistema, e permite ao usuário visualizar o comportamento da planta de controle através de uma câmera. Como exemplo de aplicação, um controle sem modelo, baseado em estimador algébrico ultra-local é considerado para a malha de posição. Os resultados experimentais de aplicação no servomecanismo e conclusões são apresentados nas seções finais deste trabalho.

Keywords: Control education; IoT; Model-free Control; DC Motor.

Palavras-chaves: Educação em Controle; Internet das coisas; Controle sem Modelo; Motor CC.

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço das telecomunicações é possível obter conectividade em áreas remotas antes inacessíveis. Em educação, um dos desafios é proporcionar o acesso de todas as comunidades a fim de tornar possível a disseminação global de conhecimentos (Rossiter et al., 2023), em Terzieva et al. (2022) observa-se que a internet das coisas é uma tecnologia avançada que pode ser integrada em ambientes educacionais para aumentar aprendizagem e criar escolas mais eficientes e mais envolventes com recursos aprimorados e processos educacionais eficientes. Meylani (2024) conclui que usar a internet das coisas na educação pode melhorar os resultados dos alunos e revolucionar o ensino e a aprendizagem, melhorando todo o ecossistema de ensino.

Neste trabalho, buscando integrar sistemas de controle que permitam acesso remoto através da internet das coisas, como visto em Martins et al. (2020), foi implementada uma integração do sistema IoTControl com o servomecanismo, MS15, que é utilizado na Escola Politécnica Universidade de São Paulo no curso de Laboratório de Controle.

Partindo de um experimento integrado, como demonstrado em Martins et al. (2024), foi possível avançar com a implementação de uma câmera a fim de permitir que o experimento seja monitorado em tempo de execução. Com dados gerados em experimentação através dos registros de saída, pode-se expandir a disseminação de conhecimentos com a realização de experimentos reais em laboratórios virtuais, como exposto em Hayashi et al. (2021).

Neste experimento, é aplicado o controle sem modelo como exposto em das Neves e Angélico (2022), que utiliza estimadores algébricos para se obter uma estimativa ultra-local da dinâmica da planta. Considera-se a malha de posição do servomecanismo que, com a câmera instalada no IoTControl, mesmo remotamente, o aluno consegue visualizar a posição do disco graduado fixado no eixo do equipamento, o que torna o experimento remoto mais interativo.

O controle sem modelo, aplicando estimação algébrica e uma abordagem ultra-local, foi inicialmente introduzido em Fliess e Join (2008), e posteriormente em Flies e

Join (2009). Nessa metodologia, o modelo do sistema não é necessário, mas apenas uma representação simples da dinâmica do sistema durante um curto período de tempo (ultra-local), que é obtida por meio de estimadores algébricos. Após a eliminação dessa dinâmica simplificada, a dinâmica desejada é imposta ao sistema em malha fechada. Uma revisão abrangente dessa técnica, incluindo exemplos de aplicação, está disponível em Fliess e Join (2013).

O sistema de controle experimental está exposto na Seção 2 e a teoria de controle aplicado está descrita na Seção 3. O programa computacional está detalhado na Seção 4, enquanto a implementação e os resultados dos testes experimentais são apresentados na Seção 5. O artigo é concluído na Seção 6, que também aponta algumas direções para trabalhos futuros.

2. O SERVOMECANISMO

O servomecanismo considerado é apresentado na Figura 1. Há um motor CC com um sensor de velocidade tipo tacogerador acoplado ao mesmo eixo. Há dois estágios de polias com correias, cada um com redução $n = 1/3$, que acopla o eixo do motor ao eixo do potenciômetro. Na configuração de controle de velocidade, utiliza-se o eixo do motor/tacogerador, para o controle de posição, utiliza-se o eixo do potenciômetro, no qual há também um disco com posição graduada para indicar a posição.

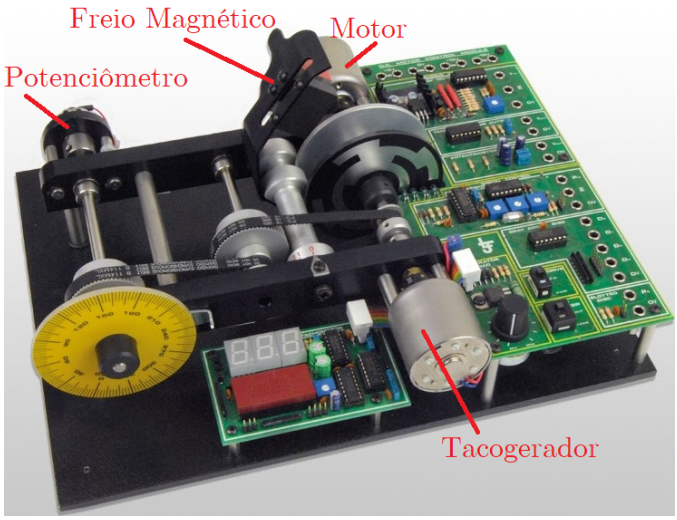

Figura 1. Foto do servomecanismo.

A tensão de armadura é representada por V_M. As tensões nas saídas do tacogerador e do potenciômetro são, respectivamente, representadas por V_T e V_P. A velocidade no eixo do motor é dada por Ω_M, enquanto a velocidade e a posição no eixo do potenciômetro são dadas por Ω_P e Θ_P. Assume-se que a relação entre tensão de armadura e velocidade no eixo de motor seja um sistema de primeira ordem com ganho K e constante de tempo T. Os ganhos do tacogerador e do potenciômetro são dados por K_T [V/(rad/s)] e K_P [V/rad]. O diagrama linear simplificado do sistema é apresentado na Figura 2.

Os parâmetros nominais do modelo são $K = 56,2824$ [(rad/s)/V] e $T = 0,2770$ [s], e $K_T = 0,017$ [V/(rad/s)]

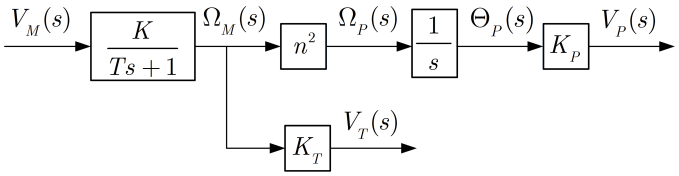

Figura 2. Modelo esquemático do sistema.

e $K_P = 1,7$ [V/rad]. No entanto, tais parâmetros não são utilizados para sintetizar o controlador, que é totalmente livre de modelo.

3. CONTROLE SEM MODELO COM ESTIMADORES ALGÉBRICOS

A estrutura do controle sem modelo utiliza os estimadores algébricos para obter um modelo ultra-local, dado por

$$\ddot{y} = \phi + \alpha u, \tag{1}$$

onde ϕ e α são parâmetros variantes no tempo. Para o projeto de controle será estimado um valor de α a ser definido pelo projetista enquanto o valor de ϕ é estimado ao longo do tempo.

Considere que $\hat{\alpha}$ o valor estimado do parâmetro α, a estrutura do controle é dado por

$$u = \frac{1}{\hat{\alpha}}\left(-\hat{\phi} + \ddot{y}_d - \lambda^2 e - 2\lambda\dot{e}\right), \tag{2}$$

onde $\hat{\phi}$ representa a estimativa de ϕ, e denota o erro dado por $e = y - y_d$, e λ é o parâmetro do controlador. Para definir $\hat{\alpha}$, é recomendado que esteja na mesma ordem de grandeza do valor real. É importante ressaltar que o valor real de α é desconhecido a priori. No entanto, essa recomendação não é excessivamente restritiva, pois α está relacionado à segunda derivada da saída (aceleração, no caso deste artigo) em relação à entrada (tensão do motor). Assim, é possível determinar a ordem de grandeza sem precisar conhecer exatamente o modelo. Além disso, mesmo que a estimativa apresente algum erro, o estimador de ϕ compensa o erro de $\hat{\alpha}$, conforme demonstrado em (das Neves e Angélico, 2022).

Para último, basta definir o estimador ϕ. Para isso, aplica-se a transformada de Laplace na Eq. (1), resultando em

$$s^2Y(s) - sy(0) - \dot{y}(0) = \frac{\phi}{s} + \alpha U(s), \tag{3}$$

que, em seguida, será derivada por s duas vezes, com o intuído do primeiro termo não depender mais dessa variável. Essa operação resulta em

$$2Y(s) + 4s\frac{d}{ds}Y(s) + s^2\frac{d^2}{ds^2}Y(s) = 2s^{-3}\phi + \alpha\frac{d^2}{ds^2}U(s). \tag{4}$$

Por último, basta dividir ambos os termos da igualdade por s^2

$$2\frac{1}{s^3}Y(s) + 4\frac{1}{s^2}\frac{d}{ds}Y(s) + \frac{1}{s}\frac{d^2}{ds^2}Y(s) = 2\phi\frac{1}{s^6} + \alpha\frac{1}{s^3}\frac{d^2}{ds^2}U(s), \tag{5}$$

para que cada termo da Eq. (5) tenha ao menos um integrador. Ao executar a anti-transformada e isolar a variável ϕ, obtém-se

$$\phi = \frac{60}{t^5}\int_0^t (t^2 - 6t\tau + 6\tau^2)y(\tau)\,d\tau - \frac{30\alpha}{t^5}\int_0^t (t-\tau)^2\tau^2 u(\tau)\,d\tau. \tag{6}$$

Pela Eq. (6) tem-se que o valor de ϕ é estimado apenas pelas informações de entrada e saída da planta. Desta forma, pode-se utilizar o controlador apresentado em (2) sem ter o conhecimento da planta.

Para uma implementação em software, pode-se aproximar a Eq. (6) em uma integral por janela considerando a aproximação trapezoidal, tal que

$$\phi = \frac{60}{T^5}\sum_{k=0}^{T/T_s} a_k(T^2 - 6TkT_s + 6(kT_s)^2)y[k] - \frac{30\hat{\alpha}}{T^5}\sum_{k=0}^{T/T_s} a_k(T - kT_s)^2(kT_s)^2 u[k], \quad (7)$$

onde

$$a_k = \begin{cases} T_2/2, & k = 0 \text{ and } k = T/T_s \\ T_s, & k = 1, \ldots, T/T_s - 1 \end{cases} \quad (8)$$

4. IOTCONTROL

Neste trabalho, o conceito proposto com a integração do IoTControl é a topologia de rede hierárquica em árvore, na qual os servidores são os equipamentos das bancadas de experimento do laboratório. O conjunto de ferramentas, IoTControl, inclui o programa computacional aplicativo desenvolvido para controlar o hardware de interface (entradas e saídas) de sinais elétricos e a interface do circuito eletrônico entre o dispositivo inteligente e o objeto de controle. O sistema dinâmico é o servomecanismo descrito na seção 2, equipado com o a interface eletrônica e unidade de processamento de dados que está conectada à rede local através de um dispositivo roteador sem fio. Então, o software baseado em rede permite a interface homem-máquina e máquina-máquina, com o sistema de controle e interface de rede, utilizando o sistema de gerenciamento de banco de dados que faz parte do programa computacional. Além disso, a ferramenta permite através dos resultados gráficos e registros de saída, análise gráfica do sistema dinâmico controlado. O servidor em rede está hospedado no hardware do controlador, proporcionando ao usuário a interação através da rede internet, incluindo acesso remoto a qualquer dispositivo conectado à mesma rede; a interface do usuário pode ser acessada com a utilização de um programa navegador em rede. Ferramentas para controle e monitoramento remotos permitem inclusão de acesso às pessoas geograficamente distantes dos grandes centros educacionais. Um servomecanismo utilizado no laboratório de controle da Universidade de São Paulo foi disponibilizado para demonstração.

No ambiente do programa computacional, o programa computacional AppControl é executado no dispositivo embarcado enquanto o NetControl pode ser instalado em qualquer dispositivo conectado à rede. A Figura 3 apresenta o diagrama do IoTControl.

Esta arquitetura, baseada em redes computacionais, permite a interface máquina-máquina. O banco de dados é a solução para armazenar e recuperar dados e também fornece o enlace para conexão entre o dispositivo computacional e as interfaces externas.

A estrutura do software IoTControl é composta pelo AppControl, que executa os algoritmos de controle e

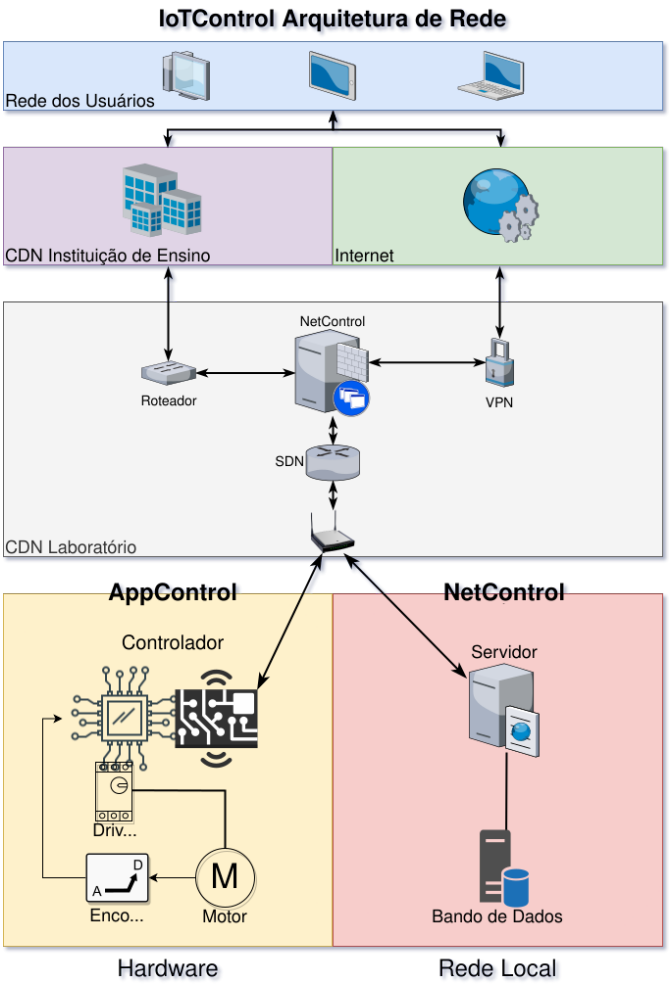

Figura 3. Diagrama esquemático IoTControl.

faz interface com o banco de dados NetControl, lendo e armazenando dados, e o NetControl, que faz interface com o banco de dados e hospeda o servidor em rede por meio de conexão sem fio.

Essa arquitetura pode ser expandida para múltiplos laboratórios, sendo cada laboratório uma rede de distribuição de conteúdo (CDNs). Nas instituições de ensino é possível criar as CDNs federadas (FCDNs).

O IoTControl pode ser aplicado como uma solução para comunicação de dados e acesso remoto aos experimentos dos laboratórios, sendo possível demonstrar esta proposta em um experimento prático entre laboratórios. Neste contexto de múltiplos centros de distribuição de conteúdo, muitos fornecedores de conteúdos laboratoriais em diversas localidades requerem maior capilaridade e escalabilidade na prestação de serviços. A interação entre os elementos da FCDN também exige segurança para evitar o uso indevido dos recursos.

Qualquer solicitação da rede do usuário é tratada pelo servidor em rede incorporado, NetControl, que faz interface com o banco de dados e fornece acesso remoto ao sistema através de uma página de internet onde, através da rede, o usuário pode interagir com os experimentos do laboratório. Para demonstrar a estrutura IoTControl, o servomecanismo é equipado com uma interface com o pro-

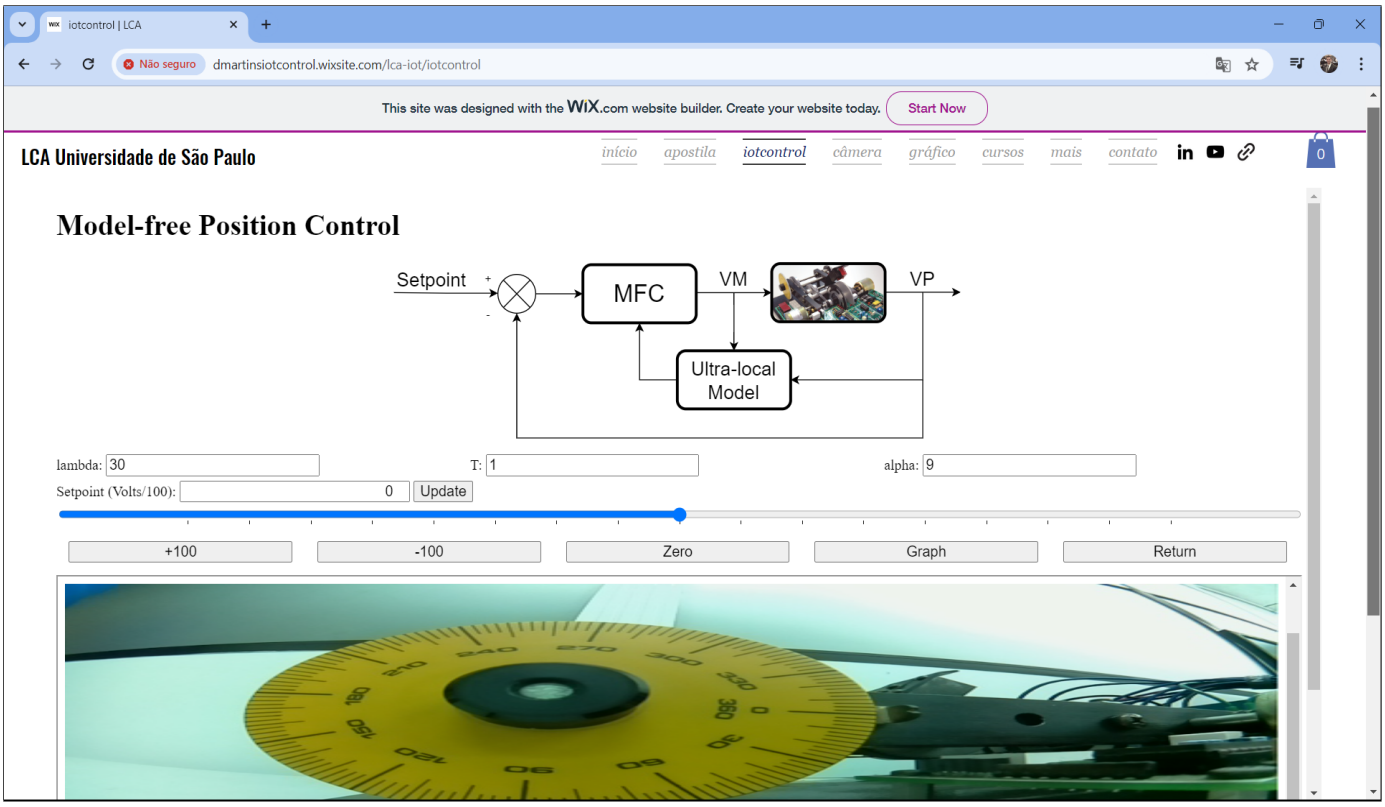

Figura 4. Interface.

grama computacional de gerenciamento de rede de dados para configuração do controlador em tempo real.

O código fonte do programa computacional desenvolvido está disponível em IoTControl:`https://github.com/DanMartins/IoTControl`. Os resultados são apresentados na seção 6, incluindo uma demonstração do experimento remoto com acesso à rede virtual privada (VPN), o que permite interagir com o experimento IoTControl.

5. APLICAÇÃO NO SERVOMECANISMO

Neste experimento, utilizou-se o circuito eletrônico de interface previamente desenvolvido e exposto em Martins et al. (2024). Para que o equipamento fosse monitorado remotamente, uma câmera foi adicionada com foco no disco graduado do servomecanismo.

A interface de acesso aos parâmetros do controlador e ajuste de referência foi desenvolvida com a ferramenta NetControl, permitindo ao usuário parametrizar o controlador e ajustar o *setpoint* desejado para a posição do disco graduado, de forma remota através de uma página de internet. Na interface, o *setpoint* é ajustado como V/100, sendo que a relação entre V e a posição angular em radiados é dada por $K_P = 1,7$ (ganho do potenciômetro). Os parâmetros do controlador são λ (lambda), α (alpha) e T, como apresentado na Figura 4.

A página de distribuição de conteúdo (CDN) desenvolvida, que pode ser acessada através da internet em `https://dmartinsiotcontrol.wixsite.com/lca-iot`. Para acessar o servomecanismo e o dispositivo embarcado do IoTCOntrol, é necessário estar na rede da Universidade de São Paulo, o que é feito via acesso à rede virtual privada (VPN). Na Figura 5 são apresentados o sistema de controle e o servomecanismo em bancada.

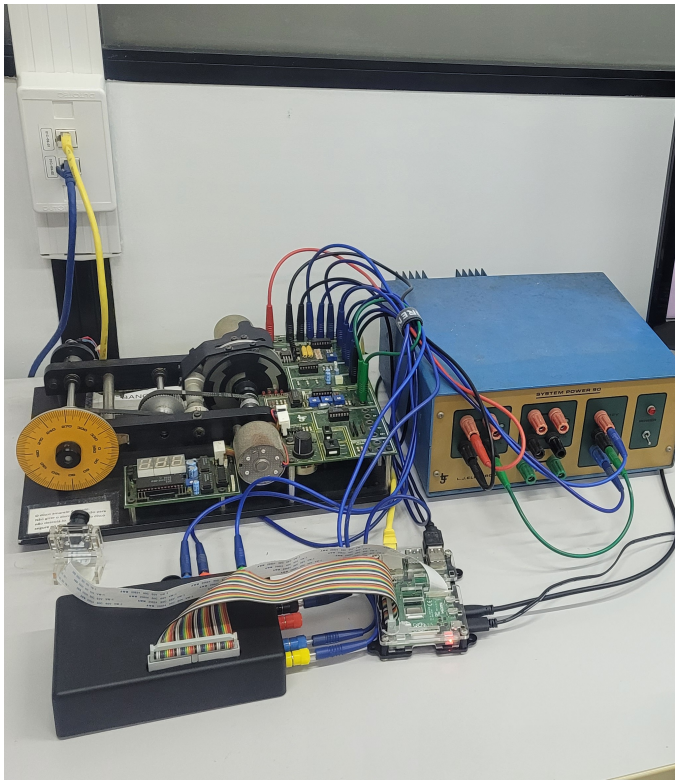

Figura 5. Servomecanismo, condicionamento de sinais (na caixa preta) e dispositivo embarcado do IoTControl, que é uma Raspberry Pi 4, 8GB.

Figura 6. Gáfico de resposta do sistema de controle.

Como metodologia de ensino, antes de aplicar o controlador no experimento real, uma simulação foi realizada em ambiente Matlab/Simulink com o intuito de refinar o ajuste dos parâmetros do controlador. O modelo não-linear do servomecanismo, envolvendo atrito seco e ruídos de medição, foi encapsulado em um subsistema no ambiente simulink para que o usuário não tenha acesso às equações e parâmetros do modelo [1], pois o foco é na aplicação de um controle não baseado em modelo. Após algumas tentativas, seguindo a metodologia apresentada em das Neves e Angélico (2022), foram obtidos os seguintes valores para o controlador: $\alpha = 9$, $\lambda = 30$, $T = 1$[s].

Na Figura 6 é apresentado o resultado do experimento prático. Com o sinal de referência representado no gráfico com a legenda (IN), a tensão elétrica aplicado no servomecanismo (VM), o sinal elétrico obtido pelo sensor de velocidade (VT) e o sinal elétrico do medidor de posição (VP), pode-se analisar o comportamento dinâmica do sistema de controle. Neste gráfico, o sinal de referência (IN) que inicia em zero, é alterado para 3 Volts, retornando a zero e por fim em menos 2 Volts. Verifica-se que o erro estacionário é nulo, e que o controlador funcionou de forma satisfatória.

Além disso, vale ressaltar que o controle projetado não se baseia no modelo. A interface proposta permite o uso em fins didático da técnica de controle, permitindo que o usuário sintonize o controlador e veja o resultado em uma planta real de qualquer lugar do mundo bastando obter conexão com a internet e acesso habilitado ao sistema.

[1] O simulador foi desenvolvido para auxiliar a sintonia do controlador sem o conhecimento do modelo. Já que o foco é o aprendoizado da ténica sem modelo.

6. CONCLUSÃO

Com a ferramenta IoTControl foi possível, de forma simples, implementar um controlador sem modelo com estimadores algébricos em um sistema já utilizado na disciplina de laboratório de controle da Universidade de São Paulo. Com a integração da câmera e a execução do experimento de forma remota via página web, o sistema está preparado para ser reproduzido e utilizado no Laboratório de Controle da Escola Politécnica da USP.

Esta ferramenta cria novas possibilidades sendo aplicada para o desenvolvimento de sistemas de controle, como trabalhos futuros, é possível a integração com outros sistemas e aplicações IoT, reduzindo a interação humana, implementando servidores para manipular acessos de múltiplos clientes, implementação de controle de computação em nuvem com estratégias à prova de falhas e perdas de comunicação. Os autores pretendem, escalar o ambiente em rede disponibilizando aos alunos cada experimento do curso PTC3312 - Laboratório de Controle. E desenvolver estruturas básicas de sistemas, como blocos de ganho, adição, multiplicação, integral e aproximação para derivada que sejam incorporados à ferramenta para definir a arquitetura do controlador de forma remota e em tempo real.

REFERÊNCIAS

das Neves, G.P. e Angélico, B.A. (2022). Model-free control of mechatronic systems based on algebraic estimation. *Asian Journal of Control*, 24(4), 1575–1584. doi:https://doi.org/10.1002/asjc.2596.

Flies, M. e Join, C. (2009). Model-free control and intelligent pid controllers: Towards a possible

trivialization of nonlinear control? *IFAC Proceedings Volumes*, 42(10), 1531 – 1550. doi:https://doi.org/10.3182/20090706-3-FR-2004.00256. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701638870X`. 15th IFAC Symposium on System Identification.

Fliess, M. e Join, C. (2008). Intelligent PID controllers. In *2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 326–331.

Fliess, M. e Join, C. (2013). Model-free control. *International Journal of Control*, 86(12), 2228–2252. doi:10.1080/00207179.2013.810345. URL `https://doi.org/10.1080/00207179.2013.810345`.

Hayashi, V., Martins, D., Arakaki, R., Teixeira, J., Angélico, B., e Hayashi, F. (2021). Laboratório virtual com dados reais. In *Anais do Simpósio Brasileiro de Educação em Computação*, 296–304. SBC, Porto Alegre, RS, Brasil. doi:10.5753/educomp.2021.14497. URL `https://sol.sbc.org.br/index.php/educomp/article/view/14497`.

Martins, D.O., Campo, A.B., e Angélico, B.A. (2024). Laboratório de sistemas de controle com acesso remoto baseado em internet das coisas. In *Práticas pedagógicas remotas em Engenharia - Volume 2*, chapter 5, 127–151. Editora Edgard Blucher, São Paulo.

Martins, D.O., Fernandes, A., e Campo, A.B. (2020). Tool for control systems development based on iot (iotcontrol). In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, volume 2. doi:10.48011/asba.v2i1.1366.

Meylani, R. (2024). Transforming education with the internet of things: A journey into smarter learning environments. *International Journal of Research in Education and Science*, 10(1), 161–178. doi:10.46328/ijres.3362. URL `http://dx.doi.org/10.46328/ijres.3362`.

Rossiter, J.A., Cassandras, C.G., Hespanha, J., Dormido, S., de la Torre, L., Ranade, G., Visioli, A., Hedengren, J., Murray, R.M., Antsaklis, P., Lamnabhi-Lagarrigue, F., e Parisini, T. (2023). Control education for societal-scale challenges: A community roadmap. *Annual Reviews in Control*, 55, 1–17. doi:https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.03.007. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578823000111`.

Terzieva, V., Ilchev, S., e Todorova, K. (2022). The role of internet of things in smart education. *IFAC-PapersOnLine*, 55(11), 108–113. doi:https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.08.057. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322011466`. IFAC Workshop on Control for Smart Cities CSC 2022.