

# Controladores Take-Off

## RESUMO

O presente trabalho versa sobre a investigação das melhores estratégias de controle, partindo da análise de testes experimentais utilizando controladores lineares de posicionamento comumente aplicados no âmbito industrial. Dessa maneira, objetiva-se alcançar melhorias no estudo de controle, empregando como microcontrolador a placa de desenvolvimento ESP 32 Wifi LoRa que atuará como elemento de comando ao sistema físico, composto por motores de aeromodelismo, uma bancada de braço articulado e o acelerômetro. A investigação proposta possibilita a identificação das melhores formas de aplicação e a reação de cada controlador ao ser exposto às interferências externas, no ambiente controlado. O processo metodológico se dá através da pesquisa básica estratégica, estudos de caso e testes empíricos, fundamentando-se em conceitos primordiais para o ramo, partindo da pesquisa bibliográfica à trabalhos relacionados e livros conceituados da área da engenharia de controle. Para o desenvolvimento dos estudos, mostrou-se necessário a aplicação de conhecimentos matemáticos, metrologicos, físicos, mecânicos, lógicos, de eletrônica e de desenho gráfico, que promoveram a base e o suporte necessários para o engendramento do trabalho. Por fim, os resultados das análises são fornecidos através dos dados obtidos no acelerômetro, juntamente com a verificação gráfica dos sinais de saída emitidos pelo sistema físico, durante suas reações para a estabilização, a partir de softwares específicos – Arduino, Scilab –, assim, identificando a atuação de resposta de maior eficiência e o melhor controlador a ser implementado, no sistema proposto.

Palavras-chave: Wifi LoRa 32, Ambiente controlado, Estratégias de controle.

## ABSTRACT

The present work deals with the investigation of the best control strategies, starting from the analysis of experimental tests using linear positioning controllers commonly applied in the industrial field. Thus, the objective is to achieve improvements in the control study, using as a microcontroller the Wifi LoRa 32 development board that will act as a command element to the physical system, consisting of aeromodelling engines, an articulated arm bench and the accelerometer. The proposed investigation enables the identification of the best application forms and the reaction of each controller when exposed to external interference in the controlled environment. The methodological process takes place through strategic basic research, case studies and empirical tests, based on fundamental concepts for the branch, starting from bibliographic research to related works and concept books in the field of control engineering. For the development of the studies, it was necessary to apply mathematical, metrological, physical, mechanical, logical, electronic and graphic design knowledge, which provided the necessary basis and support for the engendering of the work. Finally, the results of the analyzes are provided through the accelerometer data, together with the graphical verification of the output signals emitted by the physical system, during its stabilization reactions, using specific software - Arduino, Scilab -, thus identifying the most efficient response performance and the best controller to be implemented in the proposed system.

Keywords: Wifi LoRa 32, Controlled environment, Control strategies.

## 1. Introdução

Na automação industrial, os sistemas de controle - ou simplesmente controladores - são de fundamental importância para o desenvolvimento e a melhoria de operações e projetos que se tornam inviáveis por métodos distintos (COSTA; LISBOA; SANTOS, 2003). Esses sistemas são responsáveis pelo controle em processos industriais que realizam essa função por meio de algoritmos específicos. Estratégias assim vêm sendo utilizadas a muito tempo, evoluindo-se em conjunto com ele, visto que os primeiros equipamentos eram pneumáticos, não eletrônicos, como atualmente no mercado. Isso se deu ao surgimento do transistor, na década de 1950, que ampliou grandemente o ramo das tecnologias e principalmente da eletrônica (GUERRA, 2009).

Atualmente, esses instrumentos possuem uma vasta área de aplicação, para o controle de temperatura, pressão, vazão, posicionamento, entre outros, desde os mais simples aos mais avançados. Tendo em vista a relevância do estudo proposto, o presente trabalho almeja a investigação de melhores estratégias para o controle de posicionamento a partir da utilização de uma bancada de análises, constituída por um braço oscilante, fixado a uma base, que será controlado utilizando uma vasta gama de controladores, desde os mais simples utilizados industrialmente até os mais complexos como o controlador PID (Proporcional Integrativo Derivativo), que utiliza princípios integrativos e derivativos para o controle da resposta do sistema às interferências externas. Durante o desenvolvimento do estudo, ainda será investigada a resposta e a eficiência de outros meios de controle, como o controlador P (Proporcional), PI (Proporcional Integrativo) e o PD (Proporcional Derivativo) explicitando o seu funcionamento e exemplificando sua utilização no sistema físico referido, em ambiente controlado. A bancada de braço articulado será de fundamental importância para os experimentos com os controladores, visto que possibilitará a comprovação e o fortalecimento da parte teórica estudada, que desenvolvem, a busca pelas melhores estratégias para o controle de aparatos físicos.

No decorrer do trabalho, serão explanadas as pesquisas e os estudos realizados para o desenvolvimento dos experimentos, que por sua vez, abrangem uma grande área de conhecimento nos ramos da mecânica, eletrônica e principalmente engenharia de controle, assim como os resultados obtidos a partir das análises advindas do processo de investigação.

## 2. Metodologia

O processo metodológico de trabalho desse estudo baseia-se na realização de uma pesquisa básica estratégica com foco explicativo, na qual torna-se possível, através dos resultados obtidos, a contribuição do conhecimento adquirido para o meio acadêmico e científico e o aprofundamento de conhecimento existente na ampla área da engenharia de controle.

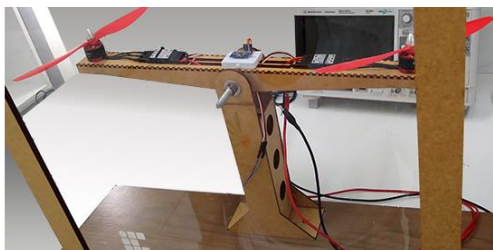
Inicialmente, o procedimento é descrito por meio da pesquisa bibliográfica em busca de trabalhos relacionados que podem fornecer referenciais teóricos necessários para a investigação e desenvolvimento das melhores estratégias de controle em um sistema de controladores de posicionamento, como também para a compreensão sobre as especificidades de cada controlador a ser estudado e implementado.

O levantamento bibliográfico vem sendo realizado através de referências físicas (livros), como Engenharia de Controle Moderno (OGATA, 2010) e Sistemas de Controle (BAZANELLA; SILVA JR., 2005), que apresentam métodos de sintonia para a descrição de controladores utilizados, além dos referenciais eletrônicos/online, por meio de artigo e dissertações, obtidos em portais de periódicos online. Visto tamanha competitividade e complexidade para encontrar a melhor estratégia de sintonia desses controladores, torna-se necessária a absorção desses insumos teóricos.

O projeto também visa – além da pesquisa bibliográfica – a inclusão do método experimental, a partir da construção de uma bancada de análises, composta pelos motores F450, o ESP 32 Wifi LoRa e o acelerômetro MPU 92/65, mostrada na figura 1. Nela serão realizados estudos de caso partindo das perturbações que serão impostas propositalmente ao sistema, nos quais serão analisadas (a cada controlador) a maneira que se dará sua forma de reação e correção dos erros.

Os dados a serem analisados, são mensurados através do MPU 92/65, que por sua vez são processados pelo ESP 32 Wifi LoRa e enviados via serial pelo protocolo UART. Desse modo, as informações obtidas durante os testes são carregadas no software Scilab, que possibilita a representação gráfica dos resultados e as análises posteriores a eles.

**Figura 1: Bancada para estudo de controle.**



Fonte: Acervo dos autores.

Para o desenvolvimento dos estudos em sistemas de controle é necessário obter uma expressão que descreva a forma de atuação do controlador nesse sistema, que pode ser chamada de método de sintonia, ele fornece as maneiras de obtenção das variáveis para o ajuste dos ganhos do controlador atuante. O processo de descrição de sintonia de cada controlador, ou seja, os ajustes dos ganhos, inicialmente encontrava-se sendo descrito pela expressão presente na equação (1), na qual  $K_p$  (constante proporcional),  $K_i$  (constante integrativa) e  $K_d$  (constante derivativa) eram as variáveis para o ajuste dos ganhos.

$$Sinal = K_p * Erro + K_i \int Erro + K_d * dErro \quad (1)$$

O método supracitado não obteve resultados eficientes, devido a dependência existente entre as variáveis e necessidade da descrição matemática completa do sistema, portanto tornou-se necessária a busca e a aplicação de uma nova forma de sintonia a partir da pesquisa bibliográfica. O meio que se apresentou mais eficiente para a aplicação foi o Método de Sintonia de Ziegler-Nichols, que reduz essa dependência supracitada e dispensa a descrição matemática do sistema físico, como mostrado na equação (2). Dessa maneira, a implementação dos controladores tornou-se possível, partindo – obrigatoriamente – do controlador mais simples (Proporcional), para a obtenção das demais características necessárias as quais descrevem os controladores posteriores.

$$Sinal = K_p(Erro + 1/ti \int Erro + td * dErro) \quad (2)$$

O processo metodológico, então, passou a ser constituído pelos testes experimentais e estudos de caso, no ambiente controlado utilizando a plataforma, que possibilitaram a obtenção dos resultados expostos posteriormente no decorrer do trabalho.

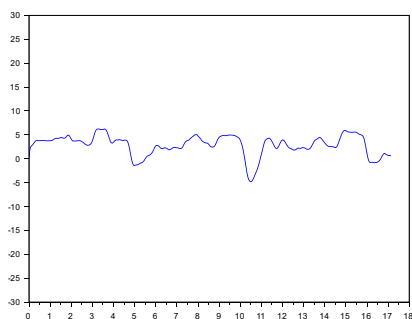
### 3. Resultados e Discussões

Diante vários estudos e testes para os ajustes (ganhos) da sintonia dos controladores, alguns dados foram absorvidos durante o processo de manter oscilações sustentadas no sistema a partir da variação do degrau de *setpoint* (medida de referência para o sistema de controle). O primeiro tipo de controlador implementado na bancada de estudos foi o do tipo On/Off, que por ser um controlador simples para aplicação na indústria em áreas que não necessitam de uma ótima estabilidade e velocidade - quando se refere ao quão rápido ele age - ele não apresentou nenhum aspecto de estabilidade para o uso no controle do sistema, seu funcionamento é bastante simples, o sinal de saída é o elemento analisado pelo controlador, se o sinal foi maior que a referência, o sistema é desligado, caso contrário, age para o processo de ativação do equipamento. Para iniciar testes com o controlador Proporcional (P), alguns conceitos matemáticos vieram à tona, agora o sinal irá variar de acordo com a diferença na amplitude do que é almejado e o estado real, conhecida como erro.

Durante a implementação do controlador Proporcional, algumas limitações foram empecilhos que levaram a geração de erros nas análises, no primeiro método utilizado de tentativa e erro. Essa primeira maneira de sintonia não possibilitava perceber o que os ganhos estavam realizando no controlador, visto que algumas constantes não agiam de forma eficiente a corrigir a instabilidade do sistema. Com a readaptação para o método de sintonia de Ziegler-Nichols, as análises foram facilitadas e desse modo, a implementação do controlador Proporcional apresentou maior eficiência, sendo observado apenas um leve erro de regime - diferença entre o ponto no qual o sistema estabilizou e o *setpoint* - de valores próximos a 5 e 6 graus em relação ao ângulo de referência 0°. O resultado pode ser observado na figura 2, em que o eixo y do gráfico apresenta a angulação de saída do sistema e o eixo x o tempo de atuação.

Os picos de variação obtidos no gráfico são explicados pelas perturbações impostas ao sistema através de esforços físicos sobre o braço oscilante da plataforma, com o intuito de observar a atuação de resposta do sistema a possíveis casos de desestabilização. A atuação de resposta se deu de forma eficiente, retornando ao seu ponto de estabilização, apenas com uma pequena lentidão de 2-3 segundos para atingir tal estado. Esse atraso é característica de sistemas controlados apenas proporcionalmente, no entanto o controlador Proporcional é de fundamental importância para a descrição dos demais controladores pelo Método de Ziegler-Nichols, pois através de suas especificidades se torna possível o ajuste de ganhos desses.

**Figura 2: Controlador Proporcional.**



Fonte: Acervo dos autores.

A partir da obtenção do valor do  $K_p$  crítico ( $K_{CR}$ ), ou seja, o último valor em que o sistema pode se manter estável, extraído de forma empírica, foi possível realizar a medição do período de oscilação do sistema ( $P_{CR}$ ), através do gráfico. Essas características, são necessárias para a descrição dos controles PI e PID, utilizando os valores de  $T_i$  e  $T_d$ , conforme a tabela 1.

**Tabela 1 – Ajuste dos ganhos.**

| Tipo de controlador | $K_p$        | $T_i$                               | $T_d$         |
|---------------------|--------------|-------------------------------------|---------------|
| PI                  | $0.45K_{CR}$ | $\left(\frac{1}{1.2}\right) P_{CR}$ | 0             |
| PID                 | $0.6K_{CR}$  | $0.5P_{CR}$                         | $0.125P_{CR}$ |

Fonte: Sintonização de controladores PID.

Os resultados dos controladores PI, PD e PID ainda estão sendo mensurados e analisados, por meio do ajuste dos ganhos, obtidos em função do  $K_p$  crítico para o controlador Proporcional.

### Considerações Finais

A pesquisa aqui abordada proporcionou a ampliação do conhecimento em diversas áreas, em especial a de engenharia de controle, fundamentando-se em referenciais teóricos e estudos de caso utilizando um microcontrolador para a realização da manutenção da estabilidade de um sistema físico. Os resultados obtidos durante o processo, apresentam-se satisfatórios, iniciando apenas com uma estratégia de controle, porém esses podem ser

maximizados com a implementação das demais estratégias propostas, atingindo dessa maneira todos os objetivos almejados com o estudo. Com o desenvolvimento do trabalho, foram necessárias correções de erros não previstos. O primeiro problema a ser resolvido, foi referente ao tipo de microcontrolador utilizado, sendo ele um elemento responsável por executar problemas lógicos com extrema rapidez e precisão, para se trabalhar com dados de posicionamento, muitos algoritmos são transferidos do sistema que está em execução, que por sua vez, exige do instrumento de processamento uma velocidade de apenas 4 *milis* segundos. Inicialmente, foi utilizado a plataforma de microprocessadores Arduino Due, que por apresentar falha na resolução dessas tarefas, causou um pequeno acidente que levou a quebra da haste articulada presente na bancada de estudos, para resolver tal questão, um novo tipo de microcontrolador foi necessário, o ESP 32 Wifi LoRa, que possui elevada velocidade de processamento e tornou possível o desenvolver do trabalho.

Com a plataforma de apenas um braço móvel, inicialmente usada, foi observado que havia a contribuição para um outro problema: a não linearidade do sistema; em muitos casos de usos de controladores é comum que sistemas reais apresentem essa não linearidade, no entanto, isso pode alterar os comportamentos e limites das ações de correções do controlador. Para diminuir esses efeitos, o projeto da bancada foi modificado, implementando um braço que comporta dois motores, assim, o novo motor ajuda como elemento de redução do problema de não linearidade. Desse modo, tornou-se possível a obtenção dos resultados preliminares apresentados, assim como possibilitará a continuação dos estudos para a conclusão dos objetivos inicialmente propostos.

## Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer a todos aqueles que colaboraram para o desenvolvimento do trabalho, pelo apoio, disponibilização de laboratórios e equipamentos, em especial aos orientadores que nos deram todo o suporte necessário, tanto teórico, como prático e se dispuseram a guiar-nos durante o trajeto até então percorrido.

## Referências

- ABREU, A. D. S. Arduino – **Plataforma Eletrônica Microcontrolada**. 2012. – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia – Departamento de Engenharia de Eletricidade, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2012.
- BAZANELLA, Alexandre Sanfelice; SILVA JR, João Manoel Gomes. **Sistemas de controle**: Princípios e métodos de projeto. 1. ed. RS: UFRGS, 2005. 306 p. v. 1. ISBN 8570258496.
- BROWN, Michael. Controladores digitais - Parte 8: O controlador PID. **Integração de Sistemas e Design de Sistemas de Controle**, [S. l.], 2 jul. 2002. Disponível em: <http://www.instrumentation.co.za/regular.aspx?pkIRegularid=936&pkICate>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- COSTA, I. M.; LISBOA, S. N. D.; SANTOS, Talita Pitanga. **AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL**. UFRN, Natal/RN, v. 1, n. 1, ed. 1, p. 1-4, 2003.
- GUERRA, Wladimir de Andrade. **Implementação de Controle Proporcional, Integral e Derivativo Digital em Controladores Lógico Programáveis**. Controladores e CLP, Universidade Federal de Pernambuco, 2009. Disponível em: [http://www2.ee.ufpe.br/instrumentacao/monografias/Wladimir\\_Guerra\\_PROMINP\\_I.pdf](http://www2.ee.ufpe.br/instrumentacao/monografias/Wladimir_Guerra_PROMINP_I.pdf). Acesso em: 15 jul. 2019.
- MCROBERTS, M. Arduino Básico. São Paulo: Novatec, 2011.
- OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Pearson, 2010.
- SILVA, Elaine de M.; ANTUNES, Richard. **Controle de um Pêndulo Invertido**. UERJ, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, ed. 1, p. 1-20, 1 set. 2010.
- SILVEIRA, Cristiano Bertulucci. **O Controle PID**: Automoção Industrial. 1.0. Citisystems: [s. n.], 6 fev. 2017. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/control-pid/>. Acesso em: 16 jun. 2019.
- SILVEIRA, P. R. e SANTOS, W. E. **Automação e Controle Discreto**. 2ª ed. São Paulo: Érica (1999).