ABP NO CONTROLE DE ESTABILIDADE DE DRONE COMO FERRAMENTA DE APRENDIZADO COM INTERDISCIPLINARIDADE ENTRE CONTROLE DIGITAL E PROJETO ASSISTIDO POR COMPUTADOR

Afonso Henriques Fontes Neto Segundo – afonsof@unifor.br
Professor na Universidade de Fortaleza (UNIFOR)
Endereço: Av. Washington Soares, 1321 – Edison Queiroz, Fortaleza – CE, Brasil

Joel Sotero da Cunha Neto – joelsotero@unifor.br
Professor na Universidade de Fortaleza (UNIFOR)
Endereço: Av. Washington Soares, 1321 – Edison Queiroz, Fortaleza – CE, Brasil

Reginaldo Florencio da Silva – reginaldoflorencio@edu.unifor.br
Pesquisador na Universidade de Fortaleza (UNIFOR)
Endereço: Av. Washington Soares, 1321 – Edison Queiroz, Fortaleza – CE, Brasil

Daniel Maia Evangelista – danielmenator@gmail.com
Engenheiro de Controle e Automação pela Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

Thiago Lima Soares
Graduando em Engenharia de Controle e Automação na Universidade de Fortaleza

Adriano de Araújo Viana
Graduando em Engenharia de Controle e Automação na Universidade de Fortaleza

Matheus da Costa Miranda
Graduando em Engenharia de Controle e Automação na Universidade de Fortaleza

Resumo: *Visto a dificuldade dos integrantes dos cursos de engenharia em aplicar o conhecimento teórico em situações práticas, as propostas de Aprendizagem Baseada em Projetos (ABP) e materiais experimentais visam expor ao aluno a realidade profissional aplicando os conhecimentos teóricos aprendidos em sala de aula e laboratórios de experimentos. Aplicando a ABP na disciplina de Controle Digital, foi proposto que os alunos desenvolvessem um drone, uma tecnologia que para sua implementação precisa da aplicação dos conhecimentos de controle digital, eletrônica, mecânica, programação e modelamento em software CAD (Computer Aided Design). Ao fim são apresentados os resultados que o projeto trouxe para o aprendizado das disciplinas sobre a ótica do professor orientador e dos alunos.*

Palavras-chave: *ABP. Interdisciplinaridade. Controle de estabilidade. Controle Digital. Drone. Projeto Assistido por Computador.*

1 INTRODUÇÃO

Uma grande dificuldade dos ingressantes nas graduações de engenharia é aplicar o conhecimento teórico e visualizar situações práticas na sua realidade profissional

(RAPKIEWCZ et al., 2007). Visando aplicar o conhecimento teórico e expor aos alunos os desafios da realidade profissional, a Aprendizagem Baseada em Projeto (ABP ou PBL em inglês – *Project Based Learning*), que consiste em um estilo de aprendizagem que busca expor os alunos a novos desafios, pode ser aplicada usando veículos aéreos não tripulados (*Unmanned Aerial Veihicle, UAV*), ou drones, como são mais conhecidos, como meio de visualizar a aplicação da teoria (RAHMAN et al., 2016).

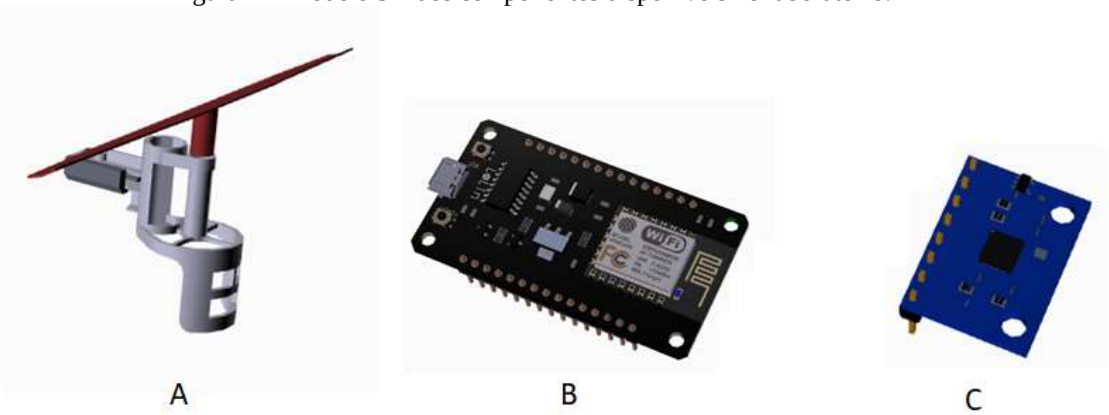
O uso de drones está crescendo em diversas áreas e se tornando uma das tecnologias mais comercializadas. Assim, o desenvolvimento de projetos que possibilitam o aprendizado da tecnologia ganha bastante destaque na academia (SATTAR; TAMATEA; NAWAZ, 2017). Esta tecnologia possibilita a aplicação de matérias como: controle digital, uma das principais matérias do curso de graduação da Engenharia de Controle e Automação, algoritmos e diversas outras (RAHMAN et al., 2016).

Este artigo tem como objetivo expor o desenvolvimento e controle de estabilidade de um drone através de práticas na disciplina de Controle Digital da Universidade de Fortaleza (UNIFOR).

2 PROTÓTIPO

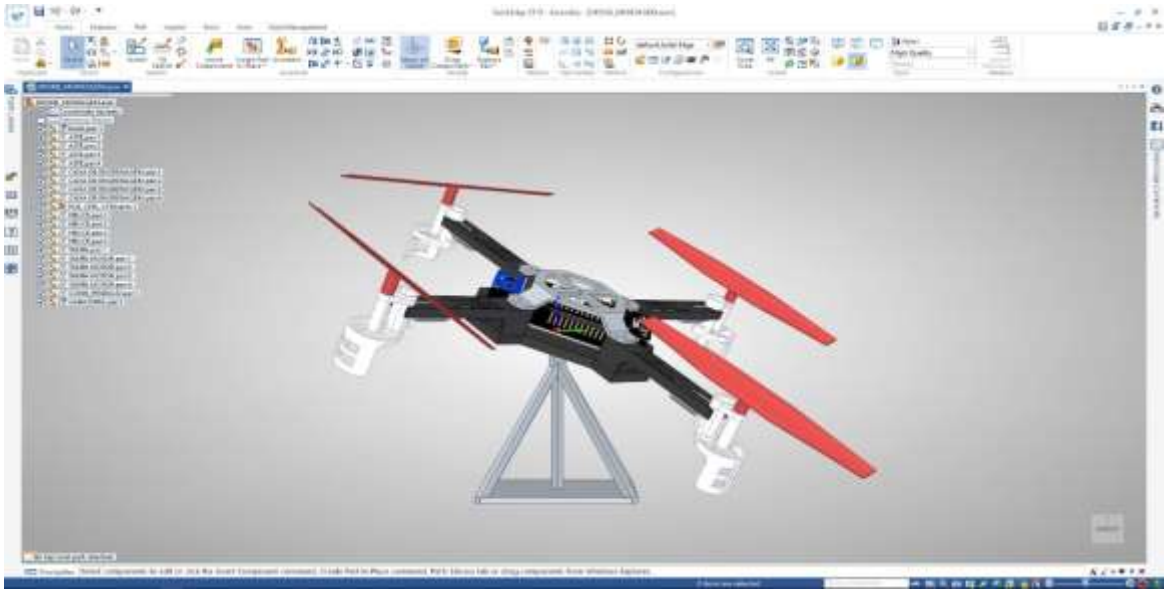
Partindo dos objetivos específicos e com o conhecimento adquirido na disciplina de Projeto Assistido por Computador, que agrega ao aluno o conhecimento de modelar peças tridimensionalmente em software a partir de um modelo real ou de uma ideia de projeto. Os alunos desenvolveram no software Solid Works as peças que compõem o drone a ser utilizado nas práticas de Controle Digital de forma que a estrutura completa comporte (ou se encaixe) com os componentes disponíveis no laboratório, são eles: motores e helices modelo SIMA x5 (Figura 1A); microcontrolador ESP32 (Figura 1B); e módulo acelerômetro/giroscópio MPU6050 (Figura 1C). Além da estrutura do drone em si, também foi projetada uma base piramidal que servirá como suporte para testes de calibração, o projeto completo pode ser visto na Figura 2. O protótipo foi impresso em 3D, como mostra a Figura 3. Os arquivos necessários para imprimir a estrutura foram disponibilizados aos alunos, porém, a possibilidade da utilização de outras estruturas e/ou componentes ficou a critério dos mesmos.

Figura 1 – Modelo 3D dos componentes disponíveis no laboratório.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 2 – Projeto 3D do drone no software SolidWorks.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 3 – Partes do drone impressas em 3D.

Fonte: Elaborado pelos autores.

3 DESENVOLVIMENTO

Drones como quadricópteros consistem em sistemas dinâmicos eletromecânicos complexos. Para um quadrirotor se manter estável, de acordo com o desejado, é necessário um controle robusto. Ogata (1995) explica que sistemas de controle digital são sistemas que possuem um computador digital responsável por processar o controle do sistema e controlar a dinâmica do mesmo. De acordo com a teoria de controle, sistemas de controle constituem em processos e subsistemas que são construídos com o fim de obter em um sistema uma determinada resposta, dada uma determinada entrada (DORF; BISHOP, 1998).

Sistemas de controle em malha fechada, também denominados sistemas de controle com realimentação, operam através de medições da resposta, comparando a resposta obtida com a resposta desejada, obtendo desta forma o erro. A partir disto, alteram suas atuações sobre o sistema de modo a minimizar o erro (DORF; BISHOP, 1998).

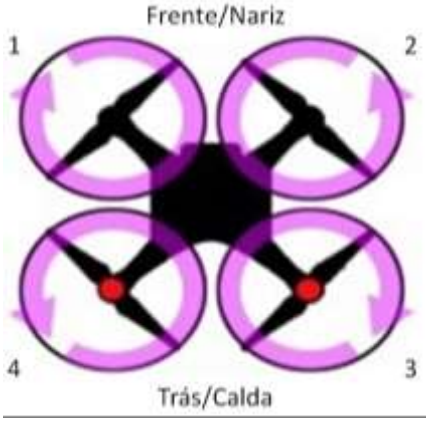
O controlador PID é um exemplo de controlador viável para se estabilizar um drone, como indica Badu (BABU; DAS; KUMAR, 2017), pois este atua sobre o sistema através da soma de três operações calculadas sobre o erro obtido, pela realimentação do sistema de

controle. Cada operação tem sua relevância determinada por coeficientes distintos, a sintonização destes faz que o controle ocorra com sucesso e que o comportamento do sistema esteja de acordo com o desejado (ASTRÖM; MURRAY, 2010). O controlador PID pode ser representado matematicamente pela Equação 1.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(T)dT + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{1}$$

Os trabalhos de Prakosa et al. (2019) e de Devos, Ebeid e Manoon-pong (2018) explicam que, para alcançar a estabilidade durante o voo de um drone, os sentidos de rotação das helices devem ser alternados como ilustra a Figura 4, onde os rotores de número 1 e 3 rotacionam no sentido horário enquanto os de número 2 e 4 rotacionam no sentido oposto. Sendo assim, caso as velocidades dos motores 1 e 3 sejam maiores que as dos motores 2 e 4, o drone rotacionará no seu próprio eixo no sentindo horário e vice-versa. A altitude pode ser controlada a partir da velocidade de rotação de suas quatro hélices em conjunto. A inclinação para frente e para trás se dá ao se atuar nos pares de motores 3 e 4 ou 1 e 2 nesta ordem, enquanto para esquerda e direita ao se atuar nos pares 2 e 3 ou 1 e 4, também nesta ordem.

Figura 4 – Esquemático de acionamento.



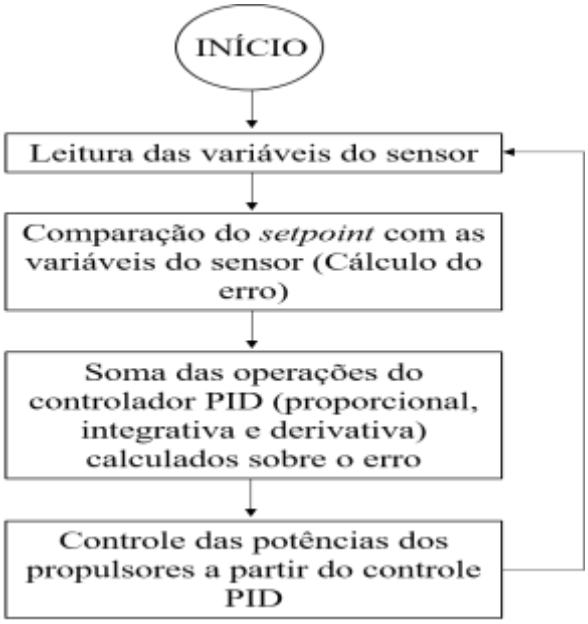
Fonte: O autor.

O controlador PID, apresentado na Equação (1), precisa sofrer modificações para transformá-lo em um algoritmo que possa ser implementado em uma plataforma digital como um microcontrolador. Essas modificações são necessárias devido a Equação (1) estar escrita no domínio do tempo continuo enquanto o ESP32, como plataforma digital, funciona no domínio do tempo discreto. Yang e Bi (2010) expõem que para a implementação do PID em microcontroladores deve-se usar a formulação abaixo, como apresentado na Equação (2):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \sum e(t) * dt + K_d \frac{(e(t) - e(t-1))}{dt} \tag{2}$$

Onde *e(t)* é a diferença entre o *setpoint*, valor desejado, e o valor obtido. Desta maneira o controlador PID tem o mesmo funcionamento e resultado, mas com esta definição o algoritmo é mais fácil de se implementar em sistemas digitais. O algoritmo gerado segue o fluxo apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Algoritmo do controlador PID.

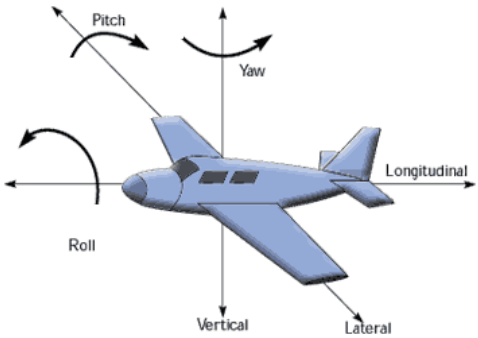


Fonte: Elaborado pelos autores.

3.1 Leitura dos sensores

Para realizar a leitura da orientação e da movimentação do drone este trabalho utiliza um módulo MPU6050, que tem embutido em seu hardware um sensor acelerômetro de 3 eixos e um giroscópio de 3 eixos. A partir desses sensores é capaz de medir as angulações referentes a X, Y e Z, na aviação conhecidos por *yaw*, *pitch* e *roll*. Estes eixos estão representados na Figura 6.

Figura 6 – Representação de Eixos Comuns da Aviação.



Fonte: Novatel (2019).

O trabalho de Carlos et al. (2015) converte os valores dos dados de aceleração (*ax*, *ay* e *az)* em grau da inclinação em relação a superfície da terra. Essas conversões são obtidas através da aplicação das Equações (3), (4) e (5).

$$X = \arctan\left(\frac{ax}{\sqrt{ay^2 + az^2}}\right) * \frac{180}{\pi} \qquad (3)$$

$$Y = \arctan\left(\frac{ay}{\sqrt{ay^2 + az^2}}\right) * \frac{180}{\pi} \tag{4}$$

$$Z = \arctan\left(\frac{az}{\sqrt{ay^2 + az^2}}\right) * \frac{180}{\pi} \tag{5}$$

De maneira semelhante ao que foi feito com os dados de aceleração do MPU6050, os dados do giroscópio também foram transformados em uma unidade mais usual para facilitar o entendimento e o desenvolvimento das aplicações. As Equações (6), (7) e (8) representam o cálculo para transformar os valores *gx*, *gy* e *gz*, que são valores brutos dos giros lidos, respectivamente para os eixos X, Y e Z, para *vX*, *vY* e *vZ*, que são valores dos giros em grau por segundo para os eixos X, Y e Z, respectivamente. A constante *g_gain* é a constante de calibração para a resolução configurada no sensor; ela está contida no *datasheet* do mesmo.

$$vX = gx * g_gain \tag{6}$$
$$vY = gy * g_gain \tag{7}$$
$$vZ = gz * g_gain \tag{8}$$

Segundo Baerveldt e Klang (1997), as leituras realizadas por acelerômetros são bastante sensíveis a ruídos de vibrações. Por conta disso, é importante usar um filtro para melhorar a precisão das medições. Baerveldt e Klang (1997) recomendam a aplicação do filtro complementar (*complementary filter*), que integra as leituras de um acelerômetro e de um giroscópio em um só resultado de orientação. Aplicando o filtro complementar se obtém:

$$FiltX = AA * (FiltX + gX\,\text{int} * dT) + (1 - AA) * X \tag{9}$$
$$FiltY = AA * (FiltY + gY\,\text{int} * dT) + (1 - AA) * Y \tag{10}$$
$$FiltZ = AA * (FiltZ + gZ\,\text{int} * dT) + (1 - AA) * Z \tag{11}$$

Onde *FiltX*, *FiltY* e *FiltZ* são respectivamente os valores das angulações dos eixos X, Y e Z, obtidos pela aplicação do filtro complementar. *AA* é o fator de consideração do acelerômetro na fusão dos sensores. Este valor determina a confiança que se tem nos valores obtidos pelo acelerômetro. Deve ser escolhido um valor entre 0 e 1 para a variável. *gXint*, *gYint* e *gZint* são integrais dos giros respectivamente nos eixos X, Y e Z, encontrados pelas Equações (11), (12) e (13). *dT* é o tempo demorado para se realizar uma nova amostragem das leituras do MPU6050.

$$gX\,\text{int} = gX\,\text{int} + vX * (dT) \tag{12}$$
$$gY\,\text{int} = gY\,\text{int} + vY * (dT) \tag{13}$$
$$gZ\,\text{int} = gZ\,\text{int} + vZ * (dT) \tag{14}$$

3.2 Práticas de sala

Nas práticas relalizadas em sala, os alunos foram desafiados a implementar e calibrar um controlador PID robusto para a nível de altitude (Figura 7 item 1) e para eixo de rotação (Figura 7 itens 2, 3 e 4). Os controladores podem/devem ser testados e calibrados separadamente. Em um segundo momento, todos os controladores foram implementados simultâneamente. O código fonte utilizado como exemplo pode ser encontrado no github através do link: https://github.com/afonsohfontes/DroneStabilityControl, enquanto os

vídeos dos resultados das práticas podem ser vistos nos links:

- http://youtu.be/gNNePRGetCc
- http://youtu.be/07HaDTp5J7c
- http://youtu.be/fimDQZ_pDu0

Figura 7 – Estrutura de gangorra para teste do PID.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

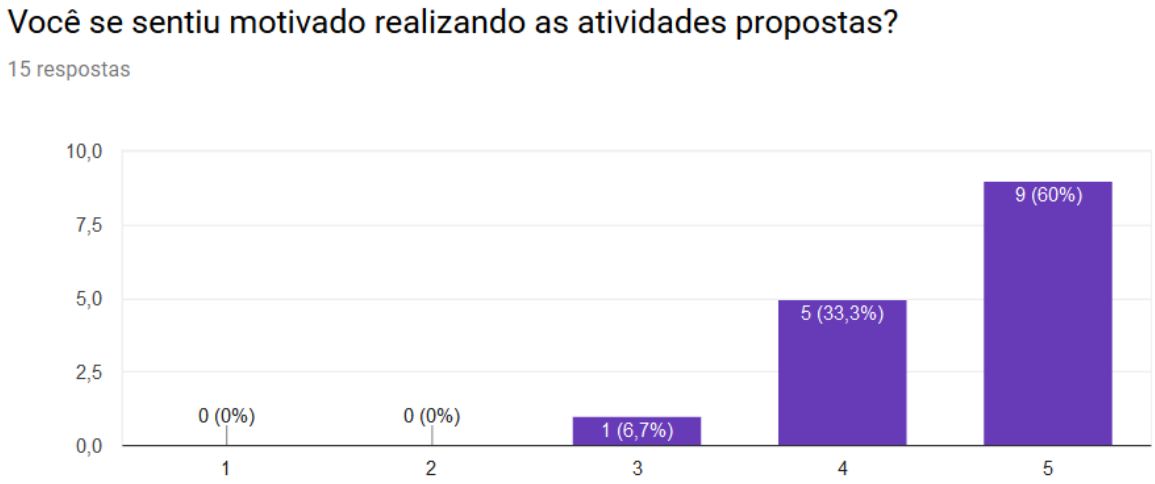
Este trabalho aliou os conhecimentos multidisciplinares adquiridos em sala de aula e laboratórios experimentais, apoderando-se da proposta de Aprendizagem Baseada em Projetos (ABP) para a construção de um drone, onde foi utilizado conhecimentos e técnicas que são exigidas do engenheiro de Controle e Automação, diminuindo assim a lacuna que existe entre o ambiente acadêmico e o mercado de trabalho. Os alunos que o desenvolveram se encontram mais experientes e mais preparados ao se depararem com situações problemáticas no decorrer do curso ou em sua carreira profissional, conforme se espera da aplicação da ABP. O aprendizado dos envolvidos sobre o conteúdo da disciplina é confirmado pelos resultados obtidos, o êxito do projeto e na explicação dele. De acordo com Babu, Das e Kumar (2017)

para a equipe que desenvolveu este projeto inúmeras oportunidades se abrirão com a adição deste trabalho no currículo.

Como fruto deste trabalho construiu-se um protótipo experimental de boa qualidade e baixo custo que poderá ser utilizado por outros alunos da disciplina de Controle Digital da Universidade de Fortaleza, na aplicação e simulação de algoritmos de controle.

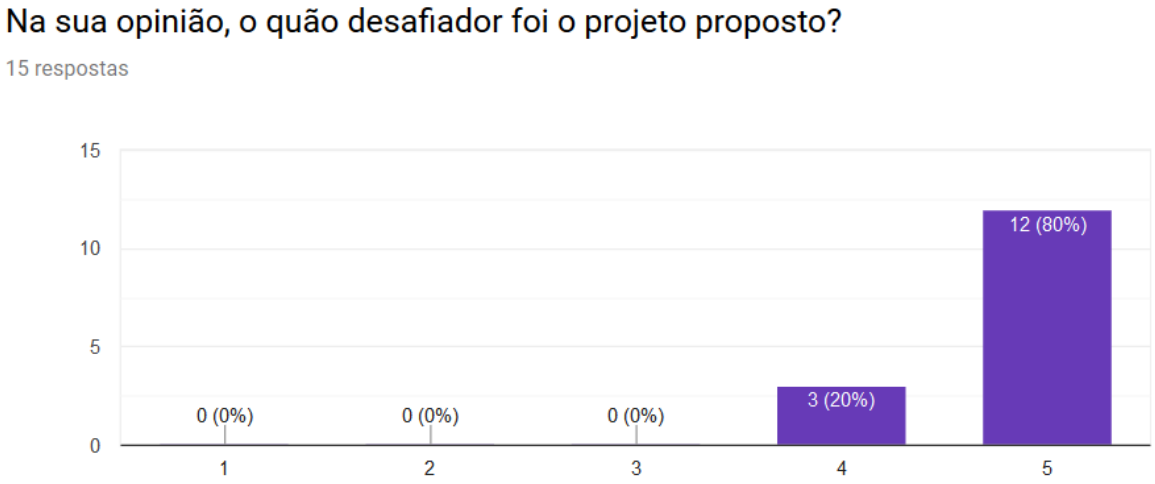
Os alunos que participaram das práticas relatadas neste trabalho responderam um questionário contendo os questionamentos levantados pelo professor orientador. Todas as perguntas feitas poderam ser respondidas em uma escala de 1 a 5, onde 1 seria a resposta mais negativa possível e 5 a mais positiva. A Figura 8 retrata o quão motivados os alunos estavam durante as práticas, enquanto a Figura 9 mostra o quão desafiador o projeto proposto foi para eles. Em um universo de 15 alunos nota-se que 80% deles viram o projeto como muito desafiador e, mesmo assim, 93,3% deles se sentiram motivados ou muito motivados. Nota-se pelas Figuras 10 e 11 que todos os alunos apoiam a aplicação de ABP e que esta prática os ajudou a entender melhor o conteúdo da disciplina de controle digital, grande motivadora da realização deste trabalho interdisciplinar. De posse dos resultados obtidos neste projeto, observa-se a possibilidade do uso constante de drones na disciplina de Controle Digital, com a finalidade de ampliar o desenvolvimento do aluno, facilitando a compreensão do conteúdo estudado.

Figura 8 – Pesquisa realizada com alunos que realizaram as práticas.



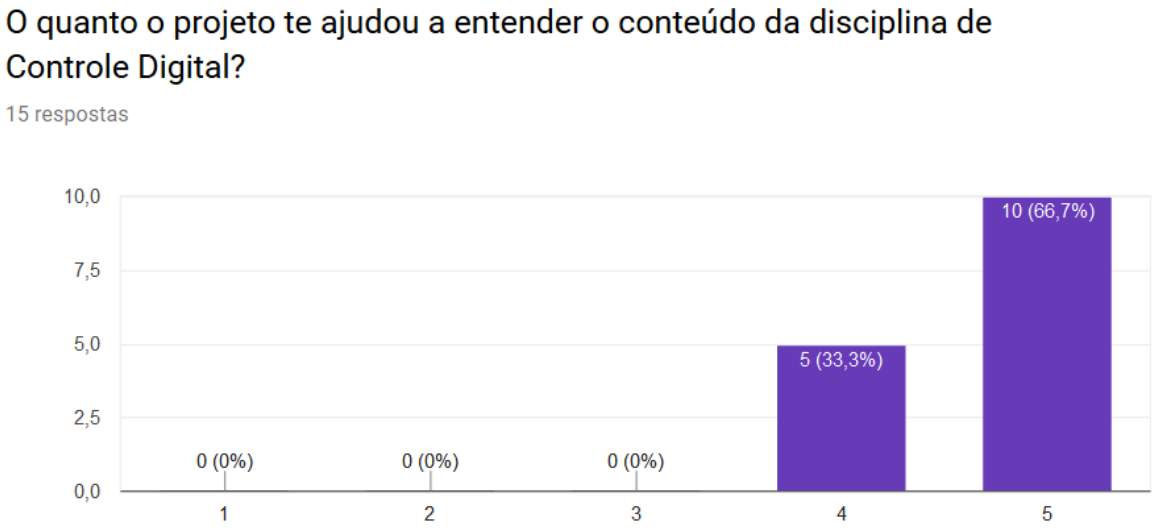
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 9 – Pesquisa realizada com alunos que realizaram as práticas.



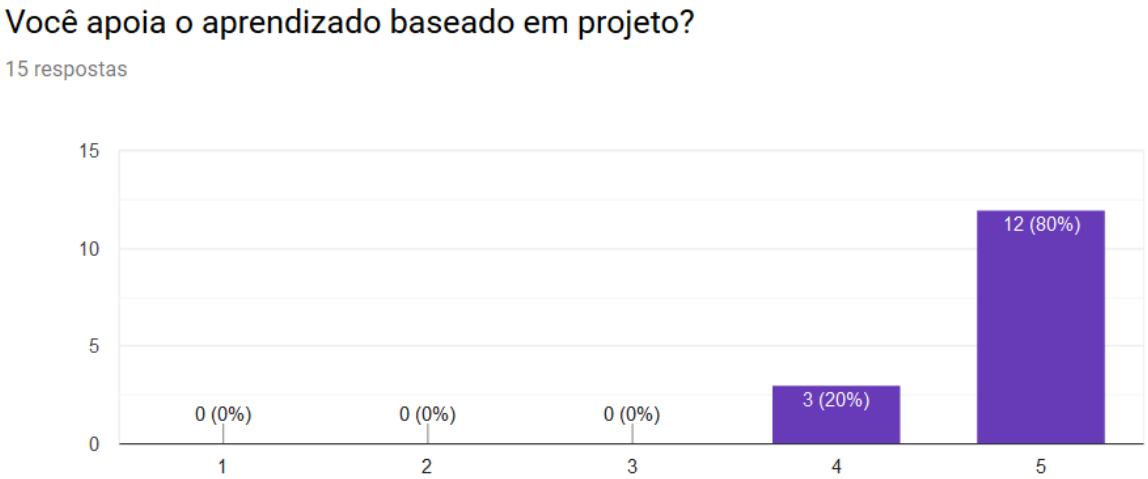
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 10 – Pesquisa realizada com alunos que realizaram as práticas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 11 – Pesquisa realizada com alunos que realizaram as práticas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

REFERÊNCIAS

ASTRÖM, K. J.; MURRAY, R. M. **Feedback systems: an introduction for scientists andengineers**. [S.l.]: Princeton university press, 2010.

BABU, V. M.; DAS, K.; KUMAR, S. Designing of self tuning pid controller for ar dronequadrotor. In: IEEE. **2017 18th international conference on advanced robotics (ICAR)**. [S.l.], p. 167–172. 2017.

BAERVELDT, A.-J.; KLANG, R. A low-cost and low-weight attitude estimation system foran autonomous helicopter. In: IEEE. **Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems**. [S.l.], p. 391–395. 1997.

CARLOS, B. B.; OLIVEIRA, P.; SA, R. C.; RODRIGUES, W.; ALEXANDRIA, A. **Desenvolvimento, metodologia de testes e simulação de um quadrotor**. In: . [S.l.: s.n.], 2015.

DEVOS, A.; EBEID, E.; MANOONPONG, P. Development of autonomous drones for adaptive obstacle avoidance in real world environments. In: IEEE. **2018 21st Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)**. [S.l.], p. 707–710. 2018.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. Modern control systems. Pearson (Addison-Wesley), 1998.

OGATA, K. **Discrete-time control systems**. [S.l.]: Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, v. 2. 1995.

NOVATEL (Brasil). **Attitude - Pitch/Roll/Yaw.** 2019. Disponível em: <https://www.novatel.com/solutions/attitude/>. Acesso em: 25 mar. 2019.

PRAKOSA, J. A.; SAMOKHVALOV, D. V.; PONCE, G. R.; AL-MAHTURI, F. S. Speed controlof brushless dc motor for quad copter drone ground test. In: IEEE.2019 IEEE Conference ofRussian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). [S.l.], p. 644–648. 2019.

RAHMAN, M.; ANI, A.; YAHAYA, S.; HUSSAIN, Z.; BOUDVILLE, R.; AHMAD, A. Implementation of quadcopter as a teaching tool to enhance engineering courses. In: IEEE. **2016 IEEE 8th International Conference on Engineering Education (ICEED)**. [S.l.], p. 32–37. 2016.

RAPKIEWICZ, C. E.; FALKEMBACH, G. A. M.; SEIXAS, L. M. J. d.; SANTOS, N. d. S.R. S.; CUNHA, V. V. d.; KLEMANN, M.et al. Estratégias pedagógicas no ensino de algoritmos e programação associadas ao uso de jogos educacionais. **RENOTE: revista novas tecnologias na educação [recurso eletrônico]**. Porto Alegre, RS, 2007.

SATTAR, F.; TAMATEA, L.; NAWAZ, M. Droning the pedagogy: Future prospect of teaching and learning. **International Journal of Educational and Pedagogical Sciences**, v. 11, n. 6, p.1632–1637, 2017.

SUGAYA, J.; OHBA, Y.; KANMACHI, T. Simulation of standing upright control of an inverted pendulum using inertia rotor and the swing type inverted pendulum for engineering education. In: IEEE. **2017 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)**. [S.l.], p. 1–6. 2017.

STEPHENS, Ric. **Quadcopter Axes and Motions.** 2015. Disponível em: <https://diydrones.com/photo/quadcopter-axes-and-motions>. Acesso em: 28 abr. 2019.

YANG, J.-h.; BI, X.-y. High-precision temperature control system based on pid algorithm. In: IEEE. **2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010)**. [S.l.], v. 12, p. V12–568. 2010.

DRONE DEVELOPMENT AS A DIGITAL CONTROL LEARNING TOOL

Abstract: *Considering the difficulty of the members of the engineering courses in applying theoretical knowledge in practical situations, the proposals of Project-Based Learning (ABP) and experimental materials aim to expose the student to the professional reality applying the theoretical knowledge learned in the classroom and laboratories of experiments. Applying ABP in the discipline of Digital Control, it was proposed that the students develop a drone, a technology that for their implementation needs the application of the knowledge of digital control, electronics, mechanics, programming and modeling in Computer Aided Design (CAD) software. At the end are presented the results that the project has brought to the learning of the disciplines on the optics of the tutor and students.*

Key-words: *PBL. Interdisciplinary. Stability control. Digital Control. Drone. Computer Assisted Design.*