

Drone use to Combat COVID-19: Adaptive Tuning Proposal of the Control System under Variable Load

I. P. Canal, M. M. P. Reimbold, and M. de Campos

Abstract—The spread of COVID-19 is rapidly increasing, and the fight against it is a priority globally. Multicopter drones can be utilized in fighting the pandemic by disinfecting the environment using sanitizers, thus, reducing the risk of contamination. Propellers are used to control the flight behavior of multicopter drones, but it is challenging to control propellers under conditions subjected to variable loads, such as the spraying of sanitizers. In this study, a prototype quadrotor was developed to collect flight data under loading conditions. We used white-box mathematical models of the quadrotor, considering the physical quantities and black-box mathematical models, to identify practical data models. The proportional-integral-derivative control system was applied, in addition to particularizing the system tuning using the Ziegler-Nichols (ZN) theory applied to the quadrotor. The results of the ZN theory applied to the quadrotor with and without load and those applied to the quadrotor with variable load were validated. It was found that the performance improved by up to 75%. The developed quadrotor with improved tuning sanitizing drone controllers can be used in the fight against COVID-19, achieving ease of implementation and low cost.

Index Terms— Multicopter, PID control, RPA, Spray drone, VANT.

I. INTRODUCTION

A COVID-19 é uma doença infecciosa causada pelo novo coronavírus SARS-Cov-2 [1] e o seu combate é uma prioridade mundial. A pandemia da COVID-19 cresce de forma exponencial, devido a facilidade de transmissão do vírus, principalmente pela propagação de pessoa por pessoa ou por contato com superfícies ou objetos contaminados [2]. Para conter e limitar a propagação de doenças patogênicas, com alta virulência, como no caso do vírus SARS-Cov-2, além das medidas de higiene pessoal e desinfecção de superfícies [1], também é recomendada a desinfecção de áreas públicas [2].

Os drones multirrotores podem contribuir como aliados no combate à COVID-19, tanto para a aplicação de saneantes em ambientes internos ou na desinfecção de grandes áreas públicas. A aplicação de saneantes através de drones é rápida e segura, considerando que essas pequenas aeronaves multirrotores têm alta flexibilidade de voo e manobras, sendo comandadas à distância por um operador, evitando a exposição de pessoas a situações de contaminação. Além disso, é crescente o desenvolvimento de drones para aplicações como transporte, agricultura, uso privado ou comercial e entregas em geral [3].

Entre outras situações, é pertinente no momento de pandemia o emprego da tecnologia de drones pulverizadores na área de saúde pública. Entretanto, é desafiadora a aplicação de drones multirrotores nesses contextos com carga útil variável, devido à complexidade dinâmica envolvida. A operação com variação de carga é um desafio para o sistema de controle de voo. Estudos de técnicas de controle de baixa complexidade são de extrema importância, permitindo produtos menos onerosos para subsidiar a rápida expansão aplicacional da tecnologia.

Nesse sentido, este artigo relata a experiência realizada na construção de um protótipo de Drone quadricóptero, para a coleta experimental de dados de desempenho de voo sob condições de carga variável. Os dados possuem informações, que englobam o desempenho da aeronave como resposta as características dinâmicas próprias da mesma, fornecendo fundamentos para o projeto do sistema de controle adaptativo do drone em função da carga. Nesse sentido, utilizou-se da modelagem matemática caixa branca do quadricóptero, para a simulação do sistema, além da modelagem caixa preta, para a identificação dos dados coletados em voo. O artigo relata ainda, a implementação do sistema de controle proporcional-integral-derivativo (PID), propondo sua sintonia através três novas particularizações distintas, quais sejam, sua sintonia através da teoria de Ziegler-Nichols (ZN) Aplicada à Quadricópteros à Vazio (ZNAQ), com Carga Plena (ZNAQC) e ainda com Carga Variável (ZNAQCV). Todas as propostas são características de uma aplicação pulverizadora de saneantes e foram validadas. A sintonia denominada nesse trabalho como ZNAQCV, apresenta significativa melhora no desempenho do sistema de controle, favorecendo o desenvolvimento e emprego de drones nessas condições de operação.

Este trabalho apresenta o contexto dos drones multirrotores, seu possível uso na aplicação de saneantes contra a COVID-19 e as características do drone quadricóptero; a metodologia e as ferramentas de modelagem matemática; os resultados da pesquisa; as conclusões do trabalho.

A. Drone Multirrotor e Saneantes contra a COVID-19

Uma Aeronave Remotamente Pilotada (*Remotely Piloted Aircraft* - RPA) é uma variação do termo Veículo Aéreo Não Tripulado (*Unmanned Aerial Vehicle* - UAV), a qual é utilizada para finalidade não-recreativa [4]. Um drone multirrotor é uma RPA, que recebe os conjuntos propulsores nas extremidades de seus braços, todos dispostos em um mesmo plano, separados de maneira equidistante circular.

Os drones multirrotores tem recebido destaque por sua flexibilidade de voo, manobras e capacidade de carga. O

I. P. Canal, IFFAR, Panambi, Brasil. (ivan.canal@iffarroupilha.edu.br).
M. M. P. Reimbold, UNIJUÍ, Ijuí, Brasil. (e-mail: manolo@unijui.edu.br).
M. de Campos, UNIJUÍ, Ijuí, Brasil. (e-mail: campos@unijui.edu.br).

quadrirotor é a estrutura que tem ganhado representatividade no mercado comercialmente, por agregar as qualidades de voo dos multirrotores com um número diminuído de componentes, sendo relacionada a pesquisa para o desenvolvimento de tecnologias de baixa complexidade e custo reduzido. E neste contexto, aliado ao combate da COVID-19, a área da saúde é atualmente uma das aplicações mais relevantes.

A flexibilidade de voo e realização de manobras, torna os drones multirrotores oportunos para a desinfecção de ambientes contaminados pelo novo coronavírus. Os drones possibilitam sua utilização para a pulverização de saneantes em ambientes diversos, tanto internos como em residências, áreas comerciais e hospitais, como também em ambientes públicos externos, inclusive onde há a dificuldade de alcance de maneira manual.

A utilização de drones na área da saúde, pode ser realizada através da pulverização de saneantes, seguindo as recomendações da ANVISA e também amparada por organismos internacionais. Para a desinfecção de objetos e superfícies em ambientes internos [1], assim como o álcool 70%, são recomendados: o hipoclorito de sódio a 0.5% [5]; alvejantes contendo hipoclorito (de sódio, de cálcio) a 2-3.9% [5]; iodopovidona 1% [5], [6]; peróxido de hidrogênio 0.5% [6]; ácido peracético 0,5% [6], [7]; quaternários de amônio 0.05% [6]; compostos fenólicos [6]; desinfetantes de uso geral com ação virucida. Na desinfecção de ambientes públicos externos [2], também como alternativa ao álcool 70%, são indicados: hipoclorito de sódio ou cálcio 0.5% [8]; alvejantes contendo hipoclorito (de sódio, de cálcio) [8]; peróxido de hidrogênio 0.5% [9]; ácido peracético 0,5% [9]; quaternários de amônio 0.05% [9]; desinfetantes com ação virucida.

Os drones são efetivas ferramentas no combate à COVID-19, proporcionando a aplicação de saneantes até cem vezes mais rápida que a aplicação manual [10], com flexibilidade de alcance e acesso a áreas (por suas capacidades de voo intrínsecas), além de evitar a exposição de pessoas e reduzir o contato do operador com as partículas dos saneantes (considerando que é uma aeronave remotamente pilotada).

B. Drone Quadrirotor

O drone quadrirotor tem conquistado lugar entre os multirrotores, absorvendo estudos como plataforma padrão de robótica aérea [11]. Os multirrotores são sistemas dinâmicos com habilidade de ficar pairando no ar, voar horizontalmente, assim como decolar e aterrissar verticalmente. O quadrirotor tem capacidade de manobras superior em comparação as aeronaves tradicionais, também aliando custo de fabricação inferior a essas aeronaves. A manutenção é de baixa complexidade, devido a reduzida quantidade de componentes mecânicos, além de ser uma plataforma receptiva para testes de sistemas de controle. Devido as suas características, a tecnologia de drones têm crescimento de aplicação em numerosas situações.

C. Voo do Drone Quadrirotor

A flexibilidade de voo do quadrirotor, é alcançada através do adequado controle de velocidade dos propulsores. Com o incremento da velocidade de um motor e redução proporcional

da velocidade do motor posicionado opostamente, realiza-se o movimento do conjunto paralelo ao solo, com giro em torno do eixo X (rolagem) ou giro em torno do eixo Y (arfagem). Incrementando ou reduzindo velocidade de rotação de todas as hélices simultaneamente, ocorre a variação de altitude do conjunto. Para girar o conjunto ao redor de seu eixo principal Z (guinada), a velocidade de rotação de um dos pares de hélices opostas é incrementada, enquanto a velocidade do outro par é reduzida proporcionalmente.

O voo de um quadrirotor é composto por sequências de manobras, sendo realizados transitórios com descontinuidades, com comandos impulsivos para mudanças na direção de voo (rolagem e arfagem). Controlar o quadrirotor em situação de manobra é um momento crítico, sendo um crucial ponto de estudo, somado ainda à variação da carga, representando características desafiadoras para projetos com soluções de controle linear. Frente a este cenário, serão abordados os sistemas de controle.

D. Sistemas de Controle de Voo em Multirrotores

Os sistemas de controle caracterizados com técnicas avançadas, são sistemas que operam com soluções não-lineares e preditivas, com controle adaptativo ou ainda designado como inteligente [3], observando aprimorar o desempenho do sistema. Nas aplicações de multirrotores com sistemas de controle de técnicas avançadas como em [3], trabalha-se controladores realimentados com projeto para reduzir distúrbios, limitando erros de rastreamento.

Porém, a implementação de técnicas avançadas, requer o conhecimento e a manipulação de um elevado montante de parâmetros, requerendo conhecimento especializado e a utilização de ferramentas matemáticas complexas, que normalmente resultam em soluções complicadas e de implementação onerosa, representando usos restritos.

No entanto, os sistemas de controle que utilizam técnicas convencionais, como o controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID), utilizam soluções de projeto conhecidas, com implementação matemática de baixa complexidade. Os sistemas PID são projetados através de relações lineares das variáveis do processo, e neste trabalho mostraram-se como soluções relevantes. O sistema de controle PID tem se mostrado um promissor campo de pesquisa, visto que essas soluções resultam em projeto e aplicação simplificadas, com intervenções e ajustes acessíveis, quando comparados a sistemas com técnicas avançadas.

A utilização de controle PID em sistemas de RPAs multirrotores é verificada com evidência em alguns trabalhos, com aplicações clássicas e limitações, ou como no estudo de [12], onde é apresentado o controle PID em cascata, composto por quatro estágios para configurar o sistema. Em [13] é utilizado um controlador PID com ajuste manual, mas propondo aprofundamento dos estudos para a determinação dos parâmetros do controlador. Em [14] demonstrou-se na aplicação do controle PID para a estabilização do quadrirotor, mas necessitando aprimorar a estabilização do sistema. Em [15] é investigado o autoajuste de controladores PID, devendo ser explorado um método para a determinação do coeficiente.

Da investigação realizada, verificou-se que o controlador PID é a principal estrutura de controle convencional utilizada

nos sistemas de controle de processos, sendo a sintonia de seus parâmetros de ganhos, o principal desafio de projeto. O controle PID é satisfatório para satisfazer a maioria dos requisitos de performance, entando, é um desafio projetar controladores de voo para quadricópteros alcançando estabilidade e desempenho de manobras [16], devendo-se contemplar ainda a variação de carga.

A utilização da teoria de ZN é difundida para a sintonia de ganhos de controladores PID em processos industriais, mas é ainda nova na temática de quadricópteros. No estudo de [17], é apresentada uma proposta de controle de quadricóptero que utiliza algoritmos genéticos em conjunto com a teoria de Ziegler-Nichols. Em [18] um sistema de controle para um quadricóptero foi determinado pela teoria de ZN. Nos estudos de [17] e [18] não é considerada a carga. O estudo realizado por [19] aplica a teoria de Ziegler-Nichols através de uma adaptação da teoria original, proposta em outra situação, representando espaço para novas aplicações em multirrotor.

Assim, contempla-se a oportunidade de investigar o sistema de controle PID particularizando-o para drones com sua sintonia em função da carga, contribuindo-se para o controle da pandemia da COVID-19.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

É apresentada a metodologia para os voos e materiais para a coleta de dados. Serão introduzidas as ferramentas de modelagem matemática utilizadas para a realização da pesquisa, além das ferramentas de controle PID e sintonia de ganhos de controladores PID através de ZN.

A. Coleta de Dados de Voo

A finalidade da construção de um protótipo quadricóptero é a coleta de dados de voo, observando situações críticas, onde o sistema de controle deve ter uma atuação efetiva. Neste sentido, estabeleceu-se que os voos experimentais são iniciados em um período de estabilidade, que posteriormente é atingido por uma descontinuidade, que representa de maneira equivalente, um impulso sofrido por fator externo de turbulência, como rajada de vento, gradiente de temperatura, alteração das propriedades do ar ou choque físico em barreira. Os experimentos são realizados em local de acesso controlado e seguro. Caracterizando-se os dados de velocidade angular no eixo de rolagem, tem-se também os dados para o eixo de arfagem, que são replicados devido a estrutura simétrica do quadricóptero.

Os experimentos são realizados em condições reais de voo, sem controle de temperatura ou umidade, pressão atmosférica e vento, reproduzindo um ambiente cotidiano de utilização de multirrotor. O ensaio consiste em inicialmente estabelecer uma condição de voo pairado, onde a aeronave deve manter uma altura de voo fixa, anulando a força gravitacional, sem a realização de manobras. Estabelecido o voo pairado, o operador do sistema através do rádio transmissor, realiza um comando de manobra impulsiva de rolagem, progredido pelo retorno a condição inicial de voo pairado, submetendo o multirrotor a um transitório de descontinuidade.

O experimento constituído, é caracterizado por uma condição de estabilidade, passagem por um ápice de manobra impulsiva e retorno a condição de estabilidade. Neste sentido, são realizados voos experimentais, elencando os que melhor

representaram a construção de uma curva, composta por condição inicial de estabilidade, ápice impulsivo e retorno a estabilidade. A realização de voos distintos, resulta em dados obtidos em condições reais, com diferenças de distúrbios externos naturais, assim como de distúrbios internos nos comandos de rolagem, que representam um sistema complexo, mas que vem a qualificar a pesquisa pela diversidade de situações contempladas, representando desafios para o sistema de controle.

A obtenção dos dados do voo, é realizada através do sensor giroscópio de um smartphone, acoplado fisicamente ao protótipo. O uso do smartphone é justificado pela controladora de voo adotada não disponibilizar acesso aos dados dos sensores inerciais. O smartphone utilizado é o modelo ZC554KL. A aquisição dos dados é feita através do software Phyphox instalado no smartphone, que possibilita a conexão diretamente com o computador. Para realizar a identificação dos dados de séries temporais, é necessário observar o intervalo de aquisição. Neste estudo, são realizadas amostragens a cada 0,0051 segundos, possibilitando caracterizar a resposta do sistema quadricóptero ao comando de manobra impulsiva.

B. Modelagem Matemática do Quadricóptero (Caixa Branca)

Para analisar um sistema de controle é desejável ter disponível o modelo matemático do sistema. Na modelagem caixa branca do quadricóptero, opera-se diretamente as grandezas do sistema. Quanto mais grandezas forem conhecidas e suas relações envolvidas, mais o modelo é representativo.

Para a modelagem caixa branca do quadricóptero, são considerados os movimentos que podem ser realizados pela aeronave. É utilizada a dinâmica translacional do veículo, guiada pela Segunda Lei de Newton, considerando os 3 eixos referencias da aeronave, complementando-se com a equação de movimento de Euler [11]. Com estas definições, é estruturada a modelagem dinâmica do quadricóptero, como em (1). As variáveis representam: T =empuxo; d =raio do rotor; ω =velocidade angular; C_T =coeficiente de empuxo; C_Q =coeficiente de reação.

$$\begin{bmatrix} \Sigma T \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_T & c_T & c_T & c_T \\ 0 & -dc_T & 0 & dc_T \\ dc_T & 0 & -dc_T & 0 \\ c_Q & -c_Q & c_Q & -c_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Através de (1), é possível representar as forças e torques atuantes no quadricóptero, subsidiando a realização de simulações computacionais da dinâmica do drone.

C. Modelagem de Dados com Identificação (Caixa Preta)

O processo de identificação dos dados é realizado pela concepção de modelagem matemática caixa preta, utilizando-se dos dados de voo do protótipo. Na modelagem caixa preta, é trabalhada a representação da resposta do sistema e não suas grandezas físicas (diferentemente da modelagem caixa branca). A informação contida nos dados coletados do protótipo, caracteriza o sistema como um conjunto completo, com as grandezas físicas conhecidas e desconhecidas, além de suas

relações (qualificando a modelagem caixa preta em relação à modelagem caixa branca).

Com os dados de resposta coletados do protótipo, realiza-se a importação para o software Matlab (através da toolbox de identificação de sistemas) para a identificação através da estimação de sua resposta no domínio do tempo, com estratégias de auto estimação. Realizado o processo de identificação, tem-se subsídios para simular a planta identificada em condições de teste e situações de controle.

D. O Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Os sistemas de PID são expressivamente aplicados em sistemas práticos, justificados pelo desempenho em condições de funcionamento adversas, além de sua simplicidade funcional de aplicação e operação [20]. São largamente utilizados em processos cotidianos, industriais e equipamentos eletrônicos.

Controladores PID podem ser construídos através de três elementos, com ganho proporcional (K_p), ganho integral (K_i) e ganho derivativo (K_d). A determinação dos ganhos, definida como sintonia, é fundamental para o sistema de controle.

A variável do processo de um sistema de controle é a grandeza que se deseja controlar, onde no caso do quadricóptero, controla-se a velocidade dos propulsores para obter as capacidades de manobras e voo. A variável do processo é medida por sensores, fornecendo a realimentação de malha fechada para esse sistema. A referência do sistema de controle, representa o valor que se deseja seguir. A diferença entre a variável de processo e a referência de *set point*, é utilizada pelo controlador para compensar o sistema. Este sistema típico, é denominado como sistema de controle em malha fechada [20].

Mesmo o controlador PID sendo de prático entendimento, alcançar uma resposta adequada representa desafios relacionados à sintonia de ganhos. Alterações físicas ou de carga alteram as características da planta, necessitando nova adequação no controlador para manter o desempenho, como no uso da pulverização para o combate ao COVID-19.

E. Sintonia de Controladores PID através de Ziegler-Nichols

A teoria de Ziegler-Nichols (ZN) é um método fundamentado na análise de estabilidade do sistema [19], com aplicação em projetos de sistemas de controle PID. Proposta por [21], a teoria de ZN é amplamente utilizada em sistemas eletrônicos e industriais, com eficiente reposta de controle.

A determinação dos parâmetros de controladores PID pela teoria de ZN, é empregada através de experimentos práticos, que quando aplicada ao estudo de aeronaves, envolve riscos. Neste trabalho, realiza-se a sintonia do controlador PID através de modelos matemáticos, identificados dos dados coletados de um protótipo, de maneira controlada e segura.

Com os dados coletados do protótipo e realizada a identificação do sistema, aplica-se a teoria de ZN para determinar o ganho crítico final do sistema (K_c) e o período de oscilação de K_c (P_c), que são determinantes para a sintonia dos ganhos do controlador PID.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresenta-se o protótipo quadricóptero e as simulações computacionais da caixa branca, além do desempenho dos controladores projetados da caixa preta. São apresentados os resultados da identificação dos dados coletados, que subsidiam

a implementação de ZN para a sintonia de ganhos de controladores PID. Apresenta-se ainda, as contribuições sintonizadas ZNAQ, ZNAQC e ZNAQCV, com suas respectivas validações.

A. Protótipo Quadricóptero

O protótipo foi construído com uma estrutura S500, com quatro braços em configuração em X, sendo esta a configuração dominante em protótipos cargueiros. Os braços são unidos através de um conjunto central, que também suporta os demais componentes do quadricóptero, como a controladora de voo, a bateria e o rádio receptor, podendo também suportar a instalação de outros acessórios, como pulverizadores de saneantes. O protótipo construído é apresentado na Fig. 1



Fig. 1. Protótipo quadricóptero construído.

Os propulsores são compostos individualmente por um motor brushless MT2216-810 KV e uma hélice 10x4,5", com força de empuxo equivalente a 0,95 kg. O controlador eletrônico de velocidade dos motores é o Rsky 40A opto acoplado. A controladora de voo é a NM Lite. A bateria é de 4 células Lipo, com 5000 mA e 14,8 V. A comunicação é composta por um rádio transmissor modelo FS-i6S operando 10 Giga Hertz com o rádio receptor FS-iA10B.

O protótipo quadricóptero foi validado através de voo experimental, alcançando efetiva capacidade de voo e realização de manobras, com resultados satisfatórios. Verificou-se que o quadricóptero apresenta condições de voo com manobrabilidade, operando com carga útil de até 1 kg. Um drone com capacidade de carga de 1 kg tem dimensões estruturais que possibilitam o voo em ambiente interno, assim como também é representativo para uso externo, sendo flexível para a aplicação em ambas as situações.

Considerando o uso típico de soluções de alta concentração, com pulverização de baixa vazão, com 1 kg de solução saneante é possível cobrir áreas expressivas para a aplicação proposta. Em condições de voo planas, com a carga completa da bateria pode ser realizado um voo de até 15 minutos. Com uma velocidade de voo de 1 m/s, com uma largura de pulverização de 1 m, consegue-se estimar um alcance de 900 m² por voo, em condição ideal sem obstáculos. A vazão de pulverização e velocidade de voo podem ser ajustadas, conforme a situação, podendo nestes casos ser necessário o reabastecimento de saneante e também a substituição de bateria.

O protótipo quadricóptero teve um custo aproximado de

materiais de R\$ 3 mil, que deve ser acrescido pelos custos do sistema de aspersão (pouco expressivo em relação ao protótipo). A pilotagem do protótipo é realizada de maneira simples e, segundo a proposta de aplicação do mesmo, normalmente será operado de maneira isolada de pessoas, proporcionando voos com segurança.

B. Simulação do Quadrrrotor em Caixa Branca

Para a simulação do quadrrrotor, utiliza-se da prática computacional de [22], que implementa a modelagem matemática do quadrrrotor de [11] em caixa branca. Verificou-se a funcionalidade da implementação do modelo caixa branca do quadrrrotor, com alguns resultados apresentados na Fig. 2.

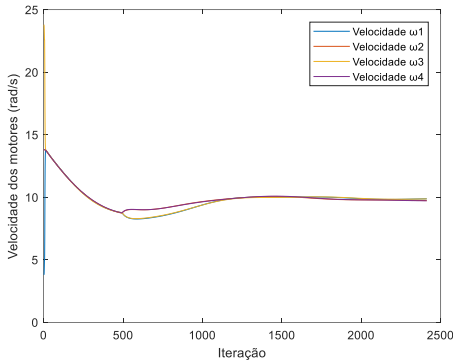


Fig. 2. Simulação do quadrrrotor representando a velocidade dos motores.

Dos resultados verifica-se o comportamento do quadrrrotor em função de uma entrada pré-definida, demonstrando que o modelo tem estabilidade e representa a dinâmica do sistema.

C. Dados Identificados do Quadrrrotor

Com os dados disponíveis, realiza-se o processo de estimação dos modelos com a ferramenta de identificação de sistemas, no ambiente do aplicativo PID Tuner do Matlab. Os dados obtidos dos voos foram estimados através da toolbox de identificação de sistemas, observando o ajuste de dados e os erros de predição. Nas Fig. 3-7, visualiza-se os dados coletados do protótipo (verde) e estimados (azul) em função da carga útil.

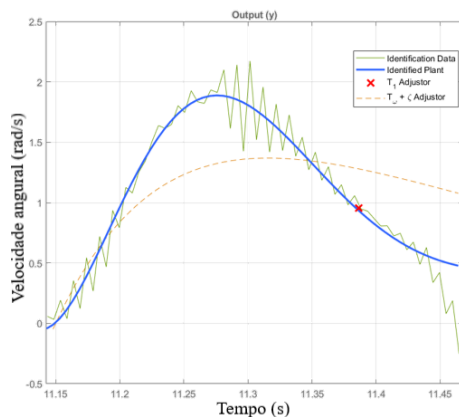


Fig. 3. Resposta do drone à rolagem vazio.

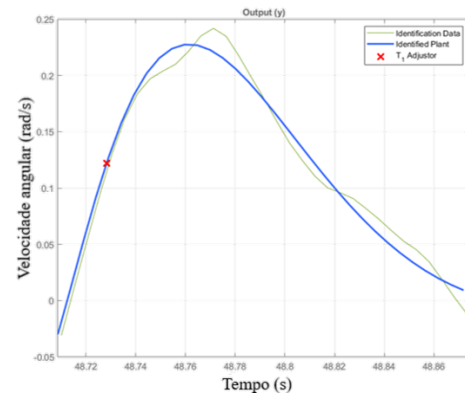


Fig. 4. Resposta do drone à rolagem com 0,25 kg.

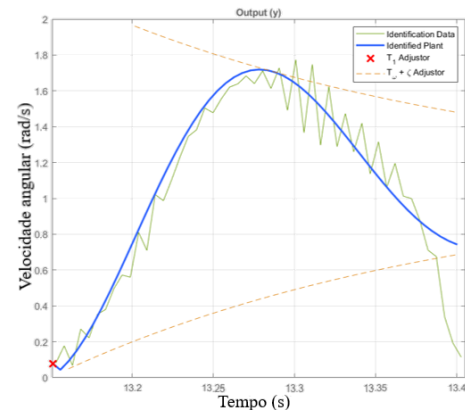


Fig. 5. Resposta do drone à rolagem com 0,50 kg.

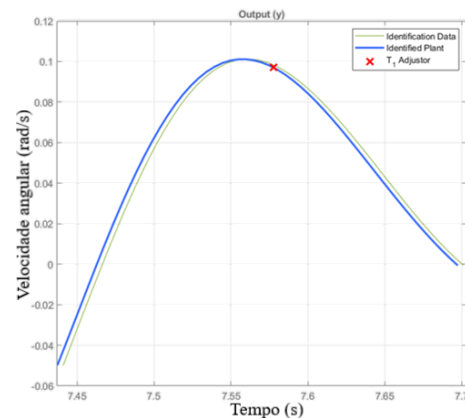


Fig. 6. Resposta do drone à rolagem com 0,75 kg.

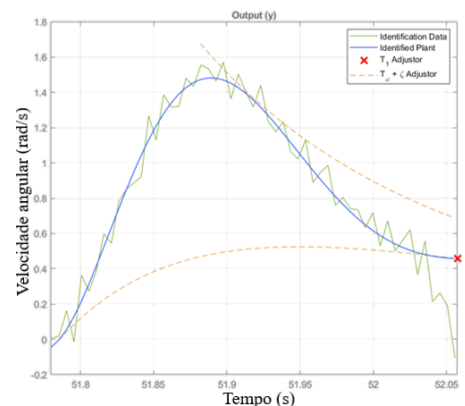


Fig. 7. Resposta do drone à rolagem com 1 kg.

Na tabela I, são apresentados os modelos identificados.

TABELA I
EQUAÇÕES QUE REPRESENTAM OS DADOS DO DRONE EM FUNÇÃO DA CARGA

Carga do protótipo	Modelo matemático de representação dos dados
Vazio	$G(s) = \frac{1106}{s^3 + 21,1s^2 + 490,9s + 1729}$
0.25 kg	$G(s) = \frac{40,26}{s^3 + 91,15s^2 + 2863s + 4,137e04}$
0.50 kg	$G(s) = \frac{8019}{s^3 + 2724s^2 + 2,225e10^4s + 1,452e10^6}$
0.75 kg	$G(s) = \frac{0,5775}{s^3 + 16,97s^2 + 344,2s + 1954}$
1.00 kg	$G(s) = \frac{7,49}{s^3 + 22,77s^2 + 731,5s + 2388}$

As equações representam as características do sistema, subsidiando implementar a teoria de ZN e particularizações.

D. Ziegler-Nichols Aplicada ao Quadrirrotor a Vazio (ZNAQ) e com Carga (ZNAQC)

Aplicando a teoria de ZN, determina-se os parâmetros de ganhos para controladores PID, com o originalmente proposto por ZN [21], sendo apresentado na Fig. 8 as respostas.

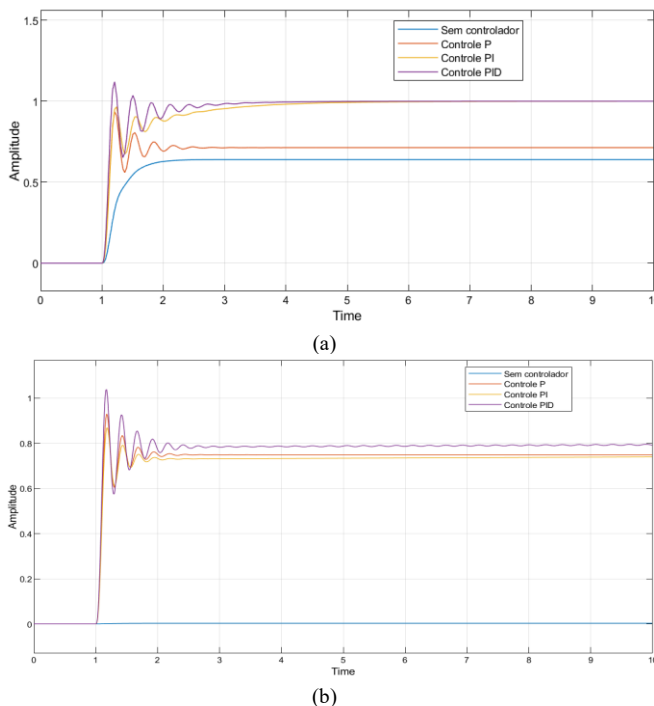


Fig. 8. Resposta ao degrau do quadirrotor, com parâmetros dos controladores determinados por ZN, para as condições: (a) Vazio; (b) 1 kg.

Analisando a Fig. 8, verifica-se a estabilidade de ambos os sistemas. Na Fig. 8(a), nas situações sem controlador e com controlador proporcional, não é alcançado o rastreamento da referência unitária, sendo situações de maior representatividade o controlador proporcional integral (PI) e PID. Na Fig. 8(b), verifica-se que em nenhuma das situações foi alcançado o rastreamento da referência unitária, sendo que se alcançou melhores resultados com o controlador PI e o controlador PID.

A partir destes resultados para a planta sem carga, realizou-se um refinamento no desempenho do controlador, para obter

balanceamento entre rastreamento de referência e rejeição a distúrbios, através da ferramenta PID Tuner do Matlab, alcançando-se a resposta apresentada na Fig. 9.

Considerando os parâmetros refinados, verifica-se que os controladores PID com parâmetros obtidos através das propostas de ZNAQ e ZNAQC, tem desempenho superior aos controladores obtidos através de ZN, demonstrando que as propostas de ZNAQ e ZNAQC são válidas e eficientes, representando particularizações específicas da teoria de ZN aplicadas a quadricópteros, as quais são apresentadas na Tabela II.

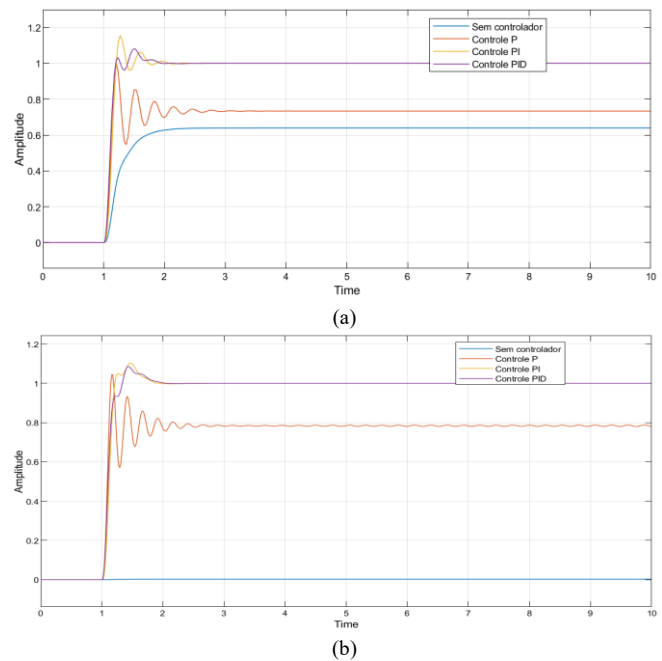


Fig. 9. Resposta ao degrau do drone, com parâmetros do controlador refinados para balanceamento entre rastreamento de referência e rejeição a distúrbios. (a) Vazio; (b) 1 kg.

TABELA II
PROPOSTA DE ZIEGLER NICHOLS APLICADA AO QUADRIRROTOR A VAZIO (ZNAQ) E COM CARGA (ZNAQC) PARA A SINTONIA DE GANHOS PID

Cont.	ZNAQ			ZNAQC		
	K_p	K_i	K_d	K_p	K_i	K_d
P	0,55Kc	Zero	Zero	0,61xKc	Zero	Zero
PI	0,34Kc	4,28/Pc	Zero	0,27xKc	816,36/Pc	Zero
PID	0,37Kc	4,96/Pc	Pc/3,18	0,31xKc	810,18/Pc	Pc/0,02

E. Validação da Proposta de ZNAQ e ZNAQC

Mesmo com os resultados positivos, obtidos nas simulações de controladores pelas propostas de ZNAQ e ZNAQC, busca-se validar estas propostas através do cruzamento das mesmas com o modelo matemático de [22]. Implementou-se os sistemas de controle com os ganhos dos controladores sintonizados através de ZNAQ e ZNAQC e utiliza-se como planta de simulação, o modelo matemático do quadricóptero implementado por [22], apresentando os resultados na Fig. 10.

Observa-se das simulações dos controladores sintonizados através de ZNAQ e ZNAQC a capacidade do controlador manter a estabilidade do sistema, seguindo o rastreamento da entrada de referência. Verifica-se, nas simulações realizadas através do modelo matemático do quadricóptero, que a

implementação do controlador PID com ganhos obtidos através das propostas de ZNAQ e ZNAQC, foi alcançado com sucesso, sendo possível controlar o voo da aeronave e realizar o rastreamento do sinal de referência de entrada.

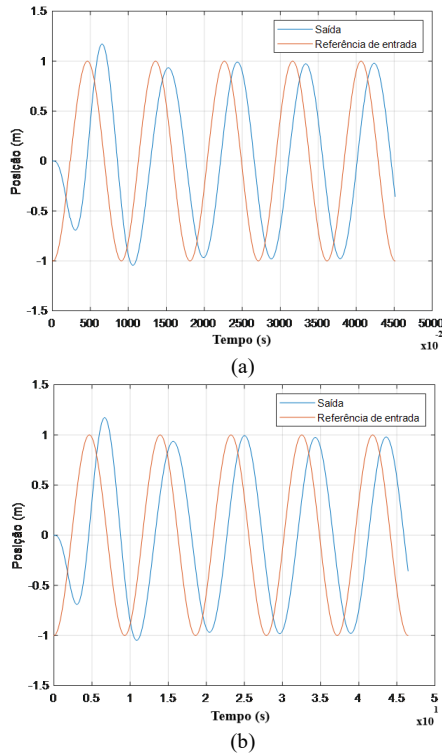


Fig. 10. Validação de ZNAQ (a) e ZNAQC (b), analisando a posição em X.

F. Ziegler-Nichols Aplicada ao Quadricóptero com Carga Variável (ZNAQCV)

Nesta etapa, propõe-se a sintonia do controlador PID em função da carga útil em uma relação linear. Assim, apresenta-se a sintonia de controladores PID de Ziegler-Nichols aplicada ao quadricóptero com carga variável (ZNAQCV), demonstrada na Tabela III, onde a massa “m” é expressa em gramas.

TABELA III
ZIEGLER-NICHOLS APLICADA AO QUADRICÓPTERO COM CARGA VARIÁVEL (ZNAQCV)

Controlador	K_p	K_i	K_d
P	$4,31+(1,15*m)$	Zero	Zero
PI	$2,64+(0,52*m)$	$14,97+(3,53*m)$	Zero
PID	$2,90+(0,59*m)$	$17,36+(3,51*m)$	$0,09+(0,01*m)$

A metodologia de sintonia de ganhos de ZNAQCV representa uma particularização específica da teoria de ZN aplicadas a quadricópteros em função da carga, sendo obtida de dados identificados de sistemas quadricópteros reais.

G. Validação da Proposta de ZNAQCV

Para a validação da proposta de ZNAQCV, serão analisados três pontos de operação, intermediários a faixa total de carga útil do protótipo quadricóptero. Serão consideradas assim as situações com as cargas úteis de 0,25 kg, 0,50 kg e 0,75 kg. Em cada situação, adotou-se a metodologia: obter a sintonia de um controlador PID para o quadricóptero, através de ZNAQCV (Tabela III); utilizar o modelo matemático caixa preta, representado pela função de transferência do sistema, com a

respectiva carga útil; implementar no Matlab/Simulink o sistema de controle com os ganhos do controlador obtidos através de ZNAQCV e aplicá-lo no controle do respectivo modelo matemático anteriormente identificado. A Fig. 11 apresenta os resultados de ZNAQCV.

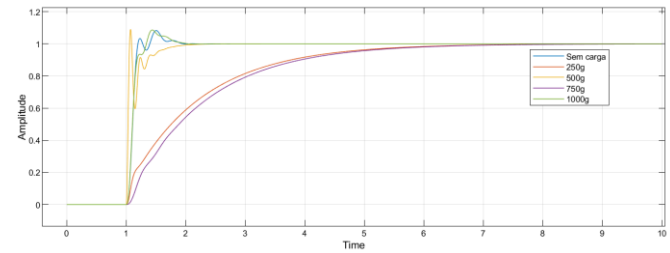


Fig. 11. Resultados do controle PID sintonizado através de ZNAQCV.

Conforme a Fig. 11, todos os sistemas de controle verificados através de ZNAQCV têm estabilidade, com melhores desempenhos nas situações sem carga, carga 0,50 kg e carga 1 kg. Para os casos de carga 0,25 kg e 0,75 kg os resultados são semelhantes, com relativo atraso na resposta, mas não significativos, pois o objetivo foi um quadricóptero capaz de voar com cargas, não sendo alvo o alto desempenho. Da estabilidade dos sistemas de controle, valida-se a proposta de ZNAQCV para a aplicação em quadricópteros com variação da carga.

IV. CONCLUSÕES

Os drones podem ser úteis em diversas situações entre elas a higienização de locais com alto índice de contágio de diversas doenças como a COVID-19. A variação de carga nesses casos representa o maior desafio do sistema de controle e pode aumentar significativamente o custo do projeto. Isso demonstra a importância de estudos com soluções de controle de baixa complexidade, com rapidez de implementação e baixo custo. As propostas apresentadas para a sintonia de controladores PID, neste trabalho particularizadas para os drones quadricópteros e relacionadas a carga de agentes saneantes, mostraram-se eficientes pelos seus resultados, sendo embasadas na sua modelagem matemática e validadas com os dados práticos.

As sintonias de ZNAQ e ZNAQC foram validadas com resultados satisfatórios, com melhoria no desempenho de 30% e 75%, respectivamente. A proposta de ZNAQCV resulta em um sistema de controle adaptativo com bom desempenho, favorecendo o desenvolvimento e aplicação de drones com carga variável. As propostas apresentadas são novas contribuições para o controle de drones na função de pulverizadores. Permitem a rápida expansão do desenvolvimento e aplicação de drones na área sanitária, por facilidade de implementação e desempenho.

Para além do exposto a metodologia de sintonia de controladores pode contribuir em outras atividades que, em função da crise sanitária mundial, deverão ter grande expansão, tais como as tele entregas. Isto porque a metodologia permite fácil adaptação dos parâmetros em função da carga. Assim, os drones podem proteger a comunidade em geral substituindo os entregadores e aumentando o grau de isolamento social.

AGRADECIMENTOS

Ao IFFAR, através do PIIQP. A Unijuí, pelo suporte e apoio.

REFERÊNCIAS

- [1] Anvisa, “Nota Técnica no 26/2020/Sei/Cosan/Ghcos/Dire3/Anvisa.” 2020.
- [2] Anvisa, “Nota Técnica no 34/2020/Sei/Cosan/Ghcos/Dire3/Anvisa.” 2020.
- [3] L. Li, L. Sun, and J. Jin, “Survey of advances in control algorithms of quadrotor unmanned aerial vehicle,” in *International Conference on Communication Technology Proceedings, ICCT*, 2016, vol. 2016-Febru, pp. 107–111.
- [4] Agência Nacional de Aviação, “RPAS: Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas,” 2017. [Online]. Available: <http://www2.anac.gov.br/rpas/>. [Accessed: 08-Apr-2019].
- [5] WHO, “Getting your workplace ready for COVID-19,” 2020. .
- [6] EPA, “List N: Disinfectants for Use Against SARS-CoV-2,” 2020. .
- [7] ANVISA, “NOTA TÉCNICA Nº 04/2020.” 2020.
- [8] WHO, “Water, sanitation, hygiene and waste management for the COVID-19 virus,” 2020. .
- [9] CDC, “Infection Control Guidance for Healthcare Professionals about Coronavirus (COVID-19),” 2020.
- [10] J. Fowler, “Drone pulverizador: tudo sobre os drones para pulverização,” *Tecnologia no Campo*, 2019. [Online]. Available: <https://tecnologianocampo.com.br/drone-pulverizador>. [Accessed: 25-Jul-2020].
- [11] R. Mahony, V. Kumar, and P. Corke, “Multirotor Aerial Vehicles: Modeling, estimation, and control of quadrotor,” *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 19, no. August, pp. 20–32, 2012.
- [12] X. Chen and L. Wang, “Quadrotor cascade PID controller automatic tuning,” in *Australian Control Conference (AUCC)*, 2016, pp. 311–316.
- [13] C. N. R. Katigbak *et al.*, “Autonomous trajectory tracking of a quadrotor UAV using PID controller,” in *8th International Conference HNICEM 2015*, 2016, no. December, pp. 1–5.
- [14] M. Nguyen Duc, T. N. Trong, and Y. S. Xuan, “The quadrotor MAV system using PID control,” in *2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2015*, 2015, pp. 506–510.
- [15] Shuai An, Suozhong Yuan, and Huadong Li, “Self-tuning of PID controllers design by adaptive interaction for quadrotor UAV,” in *2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC)*, 2016, pp. 1547–1552.
- [16] M. Ireland, A. Vargas, and D. Anderson, “A comparison of closed-loop performance of multirotor configurations using non-linear dynamic inversion control,” *Aerospace*, vol. 2, no. 2, pp. 325–352, 2015.
- [17] Z. He and L. Zhao, “Quadrotor trajectory tracking based on internal model control/ZN-PD control,” in *IEEE Chinese Control Conference, CCC*, 2016, vol. 2016-Augus, no. 1, pp. 945–950.
- [18] Z. He and L. Zhao, “A simple attitude control of quadrotor helicopter based on Ziegler-Nichols rules for tuning pd parameters,” *Sci. World J. Hindawi Publ.*, vol. 2014, 2014.
- [19] M. A. Khodja, M. Tadjine, M. S. Boucherit, and M. Benzaoui, “Experimental dynamics identification and control of a quadcopter,” in *IEEE International Conference on Systems and Control, ICSC 2017*, 2017, pp. 498–502.
- [20] National Instruments, “Explicando a Teoria PID,” *National Instruments*, 2019. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/3782/pt/>. [Accessed: 06-Jan-2019].
- [21] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, “Optimum settings for automatic controllers,” in *TRANSACTIONS OF THE A.S.M.E.*, 1942, vol. 64, pp. 759–768.
- [22] P. Corke, “Robotics Toolbox,” 2018. [Online]. Available: <http://petercorke.com/wordpress/toolboxes/robotics-toolbox>. [Accessed: 22-Apr-2018].



Ivan Paulo Canal possui graduação em Engenharia Elétrica pela UNIJUI (2005), mestrado em Engenharia Elétrica pela UFSC (2008) e doutorado em Modelagem Matemática pela UNIJUI (2020). Atua como professor no Instituto Federal Farroupilha, com experiência nas áreas de circuitos elétricos, eletricidade, automação, eletrônica e robótica aplicada.



Manuel Martín Pérez Reibold é formado em Engenharia Elétrica (1984) pela UNIFEI. É mestre em Engenharia Elétrica-Eletrônica (1994) pela UNIFEI. Possui doutorado em Microeletrônica (2008) pela UFRGS. É Professor Efetivo Adjunto Nível 2 na UNIJUI. Atua nesta como professor no Curso de Engenharia Elétrica e no Curso de Doutorado e Mestrado em Modelagem Matemática. Tem experiência com Instrumentação Eletroeletrônica.



Maurício de Campos possui graduação em Engenharia Elétrica (1997) pela UNIJUI, mestrado em Engenharia Elétrica pela UFSM (2000) e é doutor em Engenharia Elétrica pela UFCG (2017). Atualmente é professor adjunto da UNIJUI. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Automação Eletrônica de Processos Elétricos e Industriais, atuando principalmente nos seguintes temas: qualidade de energia, instrumentação, sistemas supervisórios, smart grids e educação em engenharia.