

AUGMENTAÇÃO ESTOCÁSTICA DE CONTROLADOR PID PARA O CONTROLE DA MALHA DE ALTITUDE DO QUADRIMOTOR AR.DRONE 2.0

ANDERSON DE F. SILVA¹, ANTONIO DA S. SILVEIRA²

¹*Grupo de Ciências Exatas e Engenharia Aplicada, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará*
Rodovia PA 275, s/n - União 68515-000, Parauapebas, Pará, Brasil

²*Laboratório de Controle e Sistemas, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará*
Rua Augusto Corrêa, 1 - Guamá 66075-110, Belém, Pará, Brasil
E-mails: anderson.silva@ifpa.edu.br, asilveira@ufpa.br

Abstract— In this paper, a proposed methodology for the set of stochastic characteristics of deterministic controllers is presented, with the objective of better controlling the altitude loop of the unmanned aerial vehicle AR.Drone 2.0. The method is called Stochastic Augmentation. The Stochastic Augmentation proposed in this article consists of providing a digital PID controller, in its ideal form, the ability to adequately treat noise of a stochastic nature. The methodology is based on stochastic control theory, from where the Generalized Minimum Variance Controller is used. The parameters of the designed PID controller are obtained by the pole placement method. With the parameters found, it is given to the Diophantine equation of the Generalized Minimum Variance Controller the desired closed-loop response shape, by means of Stochastic Augmentation. Simulation and practical tests were performed to analyze the performance of the conventional PID in comparison with the GMVC obtained by means of Stochastic Augmentation. The GMVC achieve better performance in the sense of minimum variance and energy consumption.

Keywords— Stochastic Augmentation, GMVC, PID, VANT, ARDrone 2.0.

Resumo— Neste artigo é proposta uma metodologia de projeto para acrescentar características estocásticas à controladores determinísticos, com o objetivo de melhor controlar a malha de altitude do veículo aéreo não tripulado AR.Drone 2.0. O método é denominado Augmentação Estocástica. A Augmentação Estocástica proposta neste artigo consiste em fornecer a um controlador PID digital, na sua forma ideal, a capacidade de tratar adequadamente os ruídos de natureza estocástica. A metodologia baseia-se na teoria de controle estocástico, de onde se utiliza o Controlador de Mínima Variância Generalizado. Os parâmetros do controlador PID projetado são obtidos pelo método de cancelamento dinâmico. Com os parâmetros encontrados, é fornecida à equação de Diophantine do Controlador de Mínima Variância Generalizado a *shape* de resposta desejada em malha fechada, por meio da Augmentação Estocástica. Foram realizados testes de simulação e práticos, para analisar o desempenho do controlador PID convencional e compará-lo com o GMV obtido por meio da Augmentação Estocástica. O GMV obteve melhor desempenho no senso de mínima variância e consumo de energia.

Palavras-chave— Augmentação Estocástica, GMVC, PID, VANT, ARDrone 2.0.

1 Introdução

Dentre as diversas técnicas produzidas na Teoria de Controle Preditivo, uma das pioneiras é o controlador de mínima variância generalizado (GMVC, do inglês *Generalized Minimum Variance Controller*)(Silveira e Coelho, 2011). Este controlador é fruto da Teoria de Controle Estocástico, descrita em Åström (1970). A lei de controle generalizada de mínima variância (GMV, do inglês *Generalized Minimum Variance*) é obtida através da solução de um problema de otimização no qual é garantida a minimização da saída generalizada de um sistema, definida por Clarke e Gawthrop (1975). A característica mais importante do GMVC é a capacidade de realizar, na sua lei de controle, um tratamento para a parcela estocástica do sistema, algo não muito comum nos projetos de controladores em geral (Silveira *et al*, 2016). Outra de suas principais características é fornecer na sua lei de controle a capacidade de prever o comportamento futuro do sistema. Sendo assim, a lei de controle GMV possui caráter preditivo e estocástico.

Neste artigo, é apresentada uma metodologia de projeto de controladores que explora as capacidades estocásticas do GMVC. O método consiste em realizar a Augmentação Estocástica (AE) de controladores determinísticos, tal método foi proposto inicialmente por Trentini *et al* (2016) e Pinheiro *et al* (2016), onde é feito o projeto do controlador GMV a partir do *shape* de um controlador determinístico. A técnica de AE vem sendo utilizada por pesquisadores para incorporar características estocásticas a controladores determinísticos. A AE tem sido voltada para controladores com estrutura *Reference Signal Tracking* (RST) (Astrom, 2011), obtidos como solução de uma equação de Diophantine. As aplicações desta técnica têm se estendido aos sistemas elétricos de potência, no contexto da geração de energia elétrica (Trentini *et al*, 2016; Silva, 2017).

A proposta deste artigo é direcionada, em alguns aspectos, para um sentido diferente do qual vem sendo apresentada na literatura, contudo, mantém a ideia principal da AE, que é acrescentar propriedades estocásticas a controladores determinísticos. A diferença de proposta reside no controlador a ser augmentado e na aplicação a ser explorada.

O campo de aplicação explorado neste artigo é o da robótica aérea. Nos últimos anos, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) vêm recebendo grandes esforços de pesquisa no mundo todo, em especial, os veículos com quatro ou mais rotores (Valavanis e Vachtsevanos, 2015). Dentre os VANTs, destacam-se os quadrimotores, por suas diversas aplicações, como por exemplo: inspeção de oleodutos, inspeção de construções civis, entretenimento e monitoramento no ramo da agricultura. A popularidade deste tipo de VANT se dá devido sua capacidade de realizar manobras de maneira mais simplificada em relação aos aviões de asa fixa bem como fazer decolagem e pouso de maneira vertical (Santos *et al.*, 2014).

No contexto dos sistemas de controle empregados nos quadrimotores, os controladores da família PID representam uma das técnicas clássicas utilizadas neste setor. A forma de aplicar o controlador PID é através de uma arquitetura de controle com o fechamento de sucessivas malhas. Sendo o controlador PID largamente aplicado ao controle de VANTs e por este ser o controlador determinístico mais utilizado na indústria (Åström e Hägglund, 2006), surgiu a motivação de acrescentar propriedades estocásticas a este controlador através da *Augmentação Estocástica*.

Portanto, o objetivo que se buscou alcançar no desenvolvimento deste trabalho, é unicamente apresentar uma metodologia de projeto que pudesse fornecer à técnica de controle PID, a capacidade de realizar um tratamento adequado das perturbações de natureza estocástica presente no sistema. Com tal metodologia é possível projetar um controlador com menor sensibilidade ao ruído, melhor desempenho (no senso de mínima variância) e menor consumo de energia.

Para comprovar os benefícios de se realizar a *Augmentação Estocástica*, foram realizados experimentos de simulação e testes práticos, com os controladores PID e GMV aplicados à malha de controle de altitude do veículo aéreo não tripulado, AR.Drone 2.0 (ver Figura 1), da Parrot®.



Figura 1. AR Drone 2.0 Power Edition.

2 Arquitetura de Controle e Identificação da Malha de Altitude do ARDrone 2.0

Nesta seção, é descrita a arquitetura de controle e identificação da malha de altitude do AR Drone 2.0.

2.1 Arquitetura de Controle

Visando a implementação prática da técnica proposta neste artigo, foi estabelecida uma arquitetura de controle para realização dos testes práticos. Esta arquitetura segue a estrutura clássica dos sistemas de controle presentes nas aeronaves convencionais, conhecidos como SAS (do inglês *Stability Augmentation System*), CAS (do inglês *Control Augmentation System*) e Piloto Automático (Stevens *et al.*, 2016). Na Figura 2, é ilustrada a hierarquia destes sistemas, onde a camada na qual se busca melhoria é a do Piloto Automático, assumindo a regulação da altitude (em destaque) do quadrimotor.

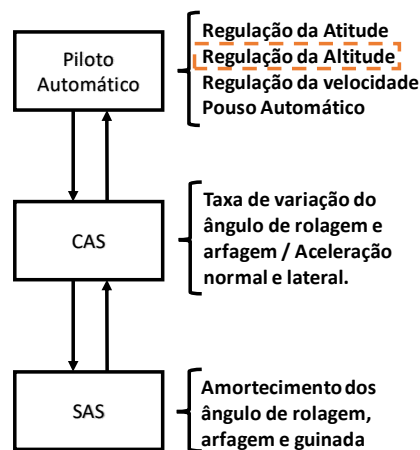


Figura 2. Sistemas de controle de aeronaves e suas funções.

O quadrimotor sobre o qual são realizados os testes é o AR.Drone 2.0, da Parrot®, ilustrado na Figura 1. O AR.Drone 2.0 possui, basicamente, quatro motores equipados com hélices, placas eletrônicas nas quais estão localizados um processador ARM Cortex A8 32 bit de 1GHz e os sensores de navegação inercial. Destre estes, destaca-se o ultrassom, utilizado para medições de altitude próximas ao solo.

Para implementação da arquitetura de controle, ilustrada na Figura 2, é utilizado o ARDrone *Simulink Development Kit* (SDK), desenvolvido por Sannabria e Mosterman (2013). O AR.Drone SDK é projetado para realizar simulações e tarefas práticas de guiamento, controle e navegação no AR Drone 2.0, dentro do ambiente Simulink® do *software* Matlab®. Com esta ferramenta é possível estabelecer comunicação entre computador e AR.Drone 2.0 via Wi-Fi. A comunicação se dá através de um *streaming* de dados entre um computador (onde está instalado o Matlab® com o Simulink®) e o AR.Drone 2.0 por meio de portas UDP (do inglês *User Datagram Protocol*).

Na Figura 3 é ilustrado o diagrama de blocos no Simulink®, projetado para implementação do SDK.

Destacam-se os blocos: **ARDrone Wi-Fi**, responsável por realizar o envio de comandos vindos do computador e recebimento das medições vindas dos sensores de navegação embarcados no quadrimotor; **Controlador**, onde é feito o controle de altitude, velocidade lateral/longitudinal e ângulo de guinada; **Estimador**, onde é realizada uma estimação não pre-

cisa das posições inerciais do drone (Sanabria e Mosterman, 2013).

Com o SDK, é possível ter acesso aos sistemas de controle CAS e Piloto Automático. Ficando a camada de SAS embarcada no AR.Drone 2.0, esta já vem com uma configuração de fábrica. O controle de altitude é realizado com o Piloto Automático sendo inserido no bloco Controlador, ilustrado na Figura 3.

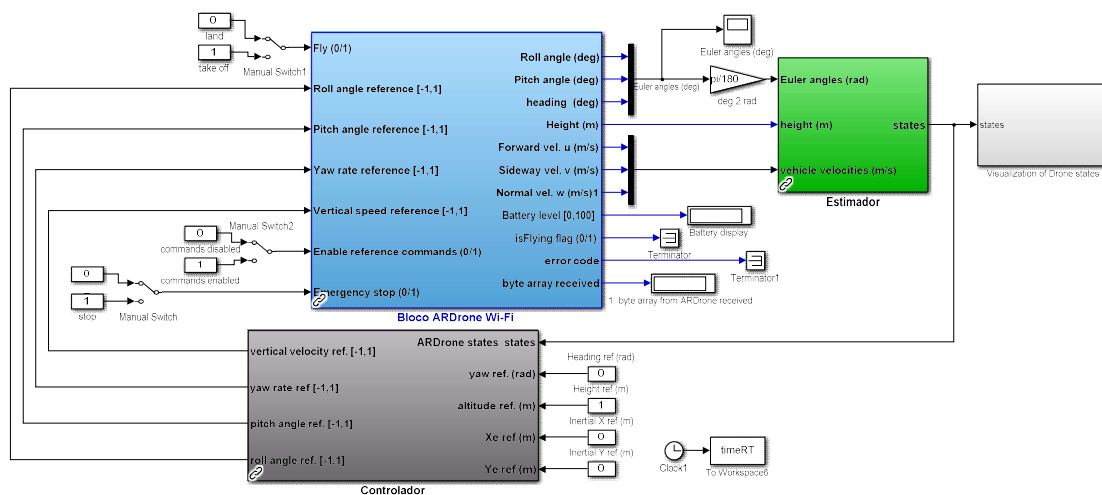


Figura 3. Diagrama de Controle Wi-Fi do ARDrone 2.0. Fonte: adaptado de Sanabria e Mosterman (2013).

2.2 Identificação da malha de altitude do ARDrone 2.0

A identificação da malha de altitude se fez necessária para que se obtivesse um modelo adequado para projeto dos controladores PID e GMV. O modelo precisa conter informações que expliquem as relações de causa e efeito tanto da parcela determinística quanto da parcela estocástica. Segundo Coelho e Coelho (2015), a estrutura do tipo ARMAX (do inglês, AutoRegressive-Moving-Average with eXogenous inputs) contem esta descrição, conforme

$$y(k) = \underbrace{\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} z^{-d} u(k)}_{\text{Determinística}} + \underbrace{\frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} \xi(k)}_{\text{Estocástica}}, \quad (1)$$

onde $y(k)$, $u(k)$, $\xi(k)$ e d representam, respectivamente, a saída do processo, o sinal de controle, o ruído do tipo gaussiano e o atraso de transporte.

A identificação do modelo é realizada de maneira *offline*, com dados de entradas e saída obtidos a partir da operação do sistema em malha fechada, com uma sequência de degraus sendo aplicada no sinal de referência da malha de altitude e um controlador PI (projetado via cancelamento dinâmico) realizando o controle da planta. Nas malhas de atitude do Ar.Drone 2.0, são inseridos controladores do tipo proporcional. Com a utilização do algoritmo dos Mínimos Quadrados Estendido foi levantando o modelo ARMAX de segunda ordem descrito por

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 - 1,6224z^{-1} + 0,6224z^{-2}, \\ B(z^{-1}) &= -0,0317z^{-1} + 0,0488z^{-2}, \\ C(z^{-1}) &= 1 - 0,5097z^{-1} + 0,0506z^{-2}. \end{aligned} \quad (2)$$

3 Controladores GMV/PID e Augmentação Estocástica

Com o intuito de fornecer ao leitor a compreensão de como é realizada a AE, são descritos, nesta seção, os conceitos básicos relacionados ao GMVC, a AE do controlador PID e por fim, a maneira de se projetar o GMVC baseado no desempenho do controlador PID.

3.1 Controlador GMV

O GMVC é um controlador que foi desenvolvido por Clarke e Gawthrop (1975). Suas origens estão na metodologia de projeto chamada controle de variância mínima. Além de lidar com os limites de energia de um processo físico real, o GMVC pode assumir uma topologia de controle linear generalizada, tal como a seguinte lei de controle generalizada,

$$Q(z^{-1})u(k) = T(z^{-1})y_r(k+d) - P(z^{-1})y(k+d), \quad (3)$$

onde os polinômios $P(z^{-1})$, $T(z^{-1})$ e $Q(z^{-1})$, da Equação (3), filtram a saída $y(k+d)$, a sequência de referência $y_r(k+d)$ e o sinal de controle $u(k)$, respectivamente.

Conforme Clarke e Gawthrop (1975), o problema de controle GMV consiste em estabelecer que uma saída generalizada a d passos à frente

$$\begin{aligned} \phi(k+d) &= P(z^{-1})y(k+d) \\ &\quad -T(z^{-1})y_r(k+d) + Q(z^{-1})u(k), \end{aligned} \quad (4)$$

tende a um valor mínimo de acordo com a minimização do seguinte índice de desempenho,

$$J = \mathbf{E} [\phi^2(k+d)], \quad (5)$$

dado em função do sinal de controle $u(k)$. Na Equação (5), o operador $\mathbf{E}[\cdot]$ representa a esperança matemática.

Quando o processo controlado é estocástico, como em (1), o GMVC otimiza o desempenho da malha de controle (governada por P, T e Q) por meio da minimização de σ_ϕ^2 , a qual é equivalente à minimização da função custo da Equação (5).

Sendo o modelo do processo, representado na Equação (2), do tipo-0, torna-se necessário considerar o GMVC em seu formato incremental (para que o sistema tenha erro de regime nulo), o qual é obtido do modelo aumentado (pela adição de um integrador) ARIMAX (do inglês *Auto-Regressive Integrated-Moving-Average with exogenous inputs*)

$$\Delta A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})z^{-d}\Delta u(k) + C(z^{-1})\xi(k), \quad (6)$$

onde, $\Delta = 1 - z^{-1}$, é a forma digital do integrador. Substituindo a Equação (4) em (5) e aplicando a derivada em relação ao sinal de controle, a Equação (5) torna-se igual a

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta u(k)} = 0. \quad (7)$$

Para minimizar a Equação (5), é necessário prever $y(k+d)$. Considerando o modelo em (6) sendo deslocado d -passos a frente, isto é,

$$\Delta A(z^{-1})y(k+d) = B(z^{-1})z^{-d}\Delta u(k) + C(z^{-1})\xi(k+d). \quad (8)$$

O problema do preditor do GMV é então formulado, conforme (Silveira e Coelho, 2011) com o intuito de reduzir os erros causados pelos efeitos do ruído no futuro. O preditor de mínima variância usado como solução, é dado por

$$\hat{y}(k+d|k) = \frac{B(z^{-1})E(z^{-1})u(k) + F(z^{-1})y(k)}{A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-d}F(z^{-1})}. \quad (9)$$

Os polinômios $E(z^{-1})$ e $F(z^{-1})$, cuja forma canônica é definida em Silveira (2012), são obtidos através da solução da equação de Diophantine a seguir (Pinheiro *et al.*, 2016),

$$P(z^{-1})C(z^{-1}) = \Delta A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-d}F(z^{-1}). \quad (10)$$

Tendo esta solução e substituindo a Equação (9) em (7) chega-se à lei de controle incremental,

$$\Delta u(k) = \frac{C(z^{-1})T(z^{-1})y_r(k+d) - F(z^{-1})y(k)}{B(z^{-1})E(z^{-1}) + Q(z^{-1})C(z^{-1})}. \quad (11)$$

A lei de controle incremental pode ser aplicada à entrada de sistemas tipo-0 através de sua decomposição, dada da seguinte forma

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k). \quad (12)$$

3.2 Aumento estocástico do controlador PID digital

Considere o controlador PID contínuo no tempo, em sua forma ideal, dada por,

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right) [Y_r(s) - Y(s)], \quad (13)$$

sendo K_p , T_I , T_D o ganho proporcional, os períodos integral e derivativo, respectivamente.

Aplicando a aproximação *backward*,

$$s := (1 - z^{-1})/T_s, \quad (14)$$

em (13), o controlador PID digital aproximado é obtido na seguinte forma,

$$(1/K_p)\Delta u(k) = (p_0 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2})[y_r(k) - y(k)], \quad (15)$$

onde $Q(z^{-1}) = (1/K_p)$, $P(z^{-1}) = T(z^{-1})$ e

$$p_0 = 1 + T_s/T_I + T_D/T_s, \quad (16)$$

$$p_1 = -1 - 2T_D/T_s, \quad (17)$$

$$p_2 = T_D/T_s. \quad (18)$$

Observe que a Equação (15) pode ser reescrita na forma generalizada dada pela Equação (3),

$$Q(z^{-1})\Delta u(k) = T(z^{-1})y_r(k+d) - P(z^{-1})y(k+d),$$

mas sendo baseada no incremento do sinal de controle, $\Delta u(k)$, para melhorar se assemelhar ao GMVC incremental.

Para realizar a augmentação estocástica do controlador PID digital, os polinômios da Equação (15) precisam ser embutidos dentro da saída generalizada do GMVC, tal que

$$\begin{aligned} \hat{\phi}(k+d|k) &= (p_0 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2})[\hat{y}(k+d|k) - y_r(k+d)] \\ &\quad + (1/K_p)\Delta u(k) \end{aligned} \quad (19)$$

levará à implementação do PID preditivo e estocástico, baseado na lei de controle GMVC em (11), isto é,

$$\Delta u(k) = \frac{C(z^{-1})T(z^{-1})y_r(k+d) - F(z^{-1})y(k)}{B(z^{-1})E(z^{-1}) + (1/K_p)C(z^{-1})}. \quad (20)$$

3.3 GMVC baseado no desempenho do controlador PID

O projeto do controlador PID é realizado por meio da alocação polinomial de polos com garantia de erro nulo em regime permanente e convergência monotônica à resposta ao degrau. A dinâmica de malha fechada desejada é especificada a partir da seguinte transformação ZOH de um sistema de primeira ordem,

$$G_{mf}(z^{-1}) = \frac{1}{\tau s + 1} \xrightarrow{\text{ZOH}} \frac{(1 - e^{-T_s/\tau})z^{-1}}{1 - e^{-T_s/\tau}z^{-1}} = \frac{(1 - z_d)z^{-1}}{1 - z_d z^{-1}}. \quad (21)$$

Em (21), o polo de malha fechada desejado, $z_d = e^{-T_s/\tau}$, que é definido em função do período de amostragem, T_s , e da constante de tempo, τ , a qual define o comportamento monotônico do sistema.

A alocação de polos se dá pelo seguinte cancelamento dinâmico,

$$G_{mf}(z^{-1}) = \frac{\frac{p_0}{\Delta} \left(1 + \frac{p_1}{p_0} z^{-1} + \frac{p_2}{p_0} z^{-2} \right) \frac{B(1)z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}}{1 + \frac{p_0}{\Delta} \left(1 + \frac{p_1}{p_0} z^{-1} + \frac{p_2}{p_0} z^{-2} \right) \frac{B(1)z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}} \quad (22)$$

$$= \frac{p_0 B(1)z^{-1}}{\Delta + p_0 B(1)z^{-1}} = \frac{(1 - z_d)z^{-1}}{1 - z_d z^{-1}},$$

o qual é determinado pela função de transferência em malha fechada, $G_{mf}(z^{-1})$. A solução da Equação (22) fornece, p_0 , tal que,

$$p_0 = \frac{(1 - z_d)}{B(1)} = \frac{(1 - z_d)}{(b_0 + b_1)}. \quad (23)$$

Partindo-se dos polinômios $P(z^{-1}) = T(z^{-1})$ com sua configuração em (15) e observando a analogia em (22), são encontrados os parâmetros do PID digital, conforme,

$$P(z^{-1}) = \left(1 + \frac{p_1}{p_0} z^{-1} + \frac{p_2}{p_0} z^{-2} \right), \quad (24)$$

$$p_1 = a_1 p_0, \quad (25)$$

$$p_2 = a_2 p_0, \quad (26)$$

Os parâmetros p_1 e p_2 são dados em função de p_0 , que é computado através de (23).

De posse do polinômio $P(z^{-1})$ (o qual contém os parâmetros do PID), é fornecido o *shape* de desempenho do controlador PID ao GMVC por meio da Augmentação Estocástica, obtida com a solução da equação de Diophantine em (10), tal que os parâmetros dos polinômios $E(z^{-1})$ e $F(z^{-1})$, do GMVC, são dados (considerando o atraso $d = 1$) por,

$$e_0 = p_0, \quad (27)$$

$$f_0 = p_0 c_1 + p_1 - e_0 a_1, \quad (28)$$

$$f_1 = p_0 c_2 + p_1 c_1 + p_2 - e_0 a_2, \quad (29)$$

$$f_2 = p_1 c_2 + p_2 c_1 - e_0 a_3, \quad (30)$$

$$f_3 = p_2 c_2. \quad (31)$$

Ressalta-se que o polinômio $Q(z^{-1}) = (1/K_p)$ irá representar para o GMVC um fator de ponderação do sinal de controle.

A estrutura generalizada dos controladores PID e GMVC aplicados à malha de altitude do AR.Drone 2.0, é ilustrada na Figura 4, a seguir.

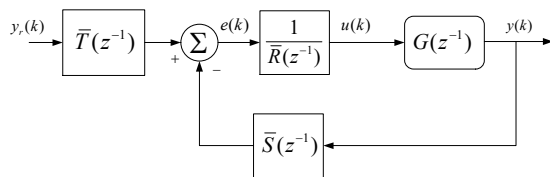


Figura 4 . Estrutura de controle aplicada.

Sendo $G(z^{-1})$, o processo descrito na Equação (2) e os polinômios $\bar{R}(z^{-1})$, $\bar{S}(z^{-1})$ e $\bar{T}(z^{-1})$ que filtram, respectivamente, o sinal de controle, o sinal de

saída e a referência, dados pela Equação (15), no caso do PID, e pela Equação (20), no caso do GMVC.

4 Resultados

Seguindo o procedimento de projeto descrito na subseção 3.3 e tendo como especificação de desempenho uma constante de tempo em malha fechada, $\tau = 2s$, que fornece o polo de malha fechada desejado $z_d = 0,968$. Os parâmetros do PID digital são apresentados na Tabela 1.

Os parâmetros do GMVC são obtidos como solução da Equação (10), a partir do polinômio $P(z^{-1})$ e dos parâmetros do sistema, como é descrito em (27)-(31). Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros do GMVC.

Tabela 1. Parâmetros do Controlador PID.

Parâmetro	Valor
p_0	1,8785
p_1	-3,0477
p_2	1,1692

Tabela 2. Parâmetros do Controlador GMV.

Parâmetro	Valor
e_0	1,8785
f_0	0,9210
f_1	-1,3993
f_2	0,4192
f_3	0,0591
K_p	1

Para verificar o desempenho dos controladores projetados, foram realizadas simulações e testes práticos bem como o cálculo dos seguintes índices de desempenho: variância da saída generalizada, σ_ϕ^2 , variância do sinal de controle, σ_u^2 , e a integral do sinal de controle quadrático, ISU , definido conforme (Silveira, 2017) na Equação (32).

$$ISU = (\mathbf{u}^T \mathbf{u}) T_s. \quad (32)$$

Onde \mathbf{u} é o sinal de controle aplicado ao sistema. O índice ISU é utilizado para dimensionar a quantidade de energia contida no sinal de controle.

Nas subseções a seguir são apresentados os resultados dos testes e suas devidas análises.

4.1 Rastreamento de referência: teste de simulação.

Levando em consideração que o piloto automático do AR.Drone 2.0 irá atuar na malha de controle de

altura para fazer com que o quadrimotor siga as referências de altura desejadas para as devidas manobras, foram realizados testes de rastreamento de referência com os controladores PID e GMV sendo aplicados ao modelo linear descrito na Equação (2).

Nas Figuras 5 e 6 estão ilustrados os resultados do teste de simulação com os sinais de altura e de controle, respectivamente. No instante de tempo, $t = 1s$, é aplicado um degrau de amplitude unitária na referência de altura. Nesta simulação foi considerado um ruído com variância, $\sigma_{\epsilon}^2 = 5,82309688 \times 10^{-5}$.

Verifica-se que o rastreamento é realizado de maneira satisfatória tanto pelo controlador PID quanto pelo GMVC. Como era esperado, os controladores apresentam desempenhos similares. É válido lembrar que o controlador GMV é obtido em função do desempenho especificado para o controlador PID.

Destacam-se os valores dos índices de desempenho apresentados na Tabela 3. O controlador GMV atinge os menores índices de variância da saída generalizada, variância do sinal de controle e ISU . Este resultado demonstra que o controlador GMV realiza a mesma tarefa do PID com um menor gasto de energia e menor variação nos sinais de saída e de controle.

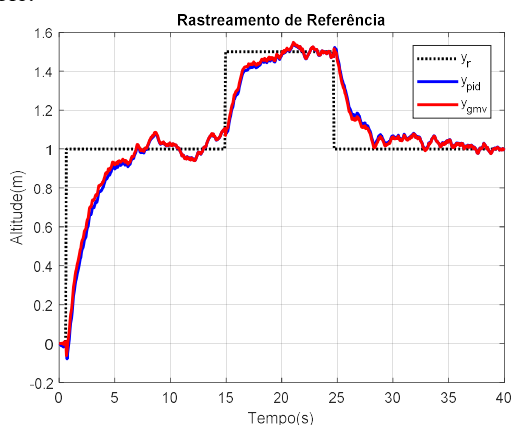


Figura 5. Teste de simulação – Rastreamento de referência. Sinal de Altura.

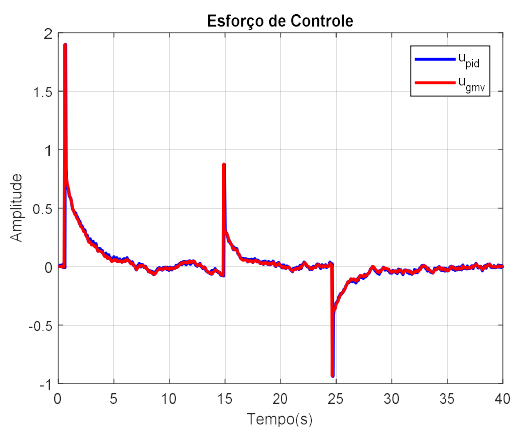


Figura 6. Teste de simulação – Rastreamento de referência. Sinal de Controle.

Tabela 3. Índices de desempenho dos controladores PID e GMV. Simulação.

Controlador	σ_{ϕ}^2	σ_u^2	ISU
PID	0,11262	0,028161	1,1669
GMV	0,10464	0,028006	1,1575

4.2 Rastreamento de referência: testes práticos.

Para realização do teste prático, foi utilizado o ARDrone SDK operando em seu modo *hover* (ficando apenas suspenso no ar). Estando nessa condição, o piloto automático foi acionado para realizar uma mudança de altura e retornar para seu estado inicial. Cada um dos controladores, isto é, PID e GMV, foram testados nessas condições de voo atuando sobre o modelo não linear da malha de altura.

As Figuras 7 e 8 ilustram, respectivamente, os sinais de altura e de controle, resultado do teste prático realizado. Do instante de tempo, $t = 0s$, ao instante, $t = 6s$, o quadrimotor é mantido no solo. A partir do instante, $t = 6s$, é enviado o comando de partida do drone no modo *hover*. Inicialmente, o piloto automático é desligado, sendo o rastreamento realizado pelo controlador interno do ARDrone, levando sua altura para 0,8 metros. A partir do instante de tempo, $t = 20s$, o piloto automático é acionado, fazendo com o que o drone vá para uma altura igual a 1 metro. No instante, $t = 60s$, o piloto automático envia um comando de mudança na referência de altura para o valor de 1,5 metro. A partir do instante, $t = 80s$, a referência retoma para o valor de 1 metro permanecendo até o fim do teste.

Percebe-se, analisando a resposta da altura do quadrimotor em função das mudanças no sinal de referência, que ambos, PID e GMV, realizam o rastreamento de maneira satisfatória, com desempenhos também similares, no teste prático. Destacam-se, mais uma vez, os índices de desempenho, calculados no caso do teste prático e descritos na Tabela 4. O controlador GMV apresenta os menores índices. Indicando assim, que, não só na simulação, mas também na prática, o GMVC realiza o mesmo trabalho que um PID faria, gastando menos energia.

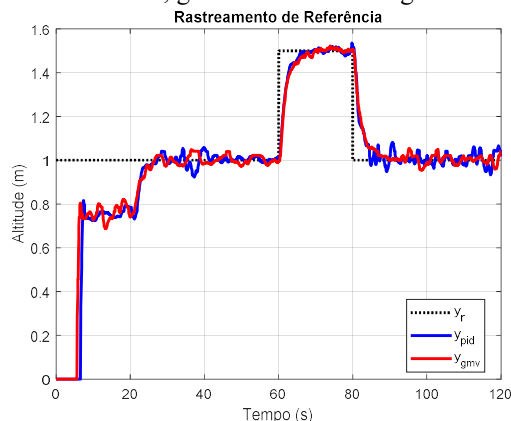


Figura 7. Teste prático – Rastreamento de referência. Sinal de Altura.

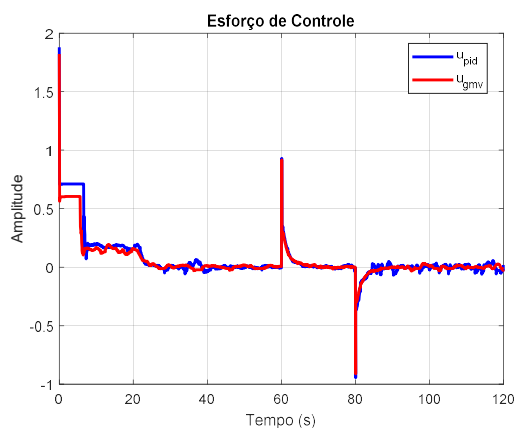


Figura 8. Teste prático – Rastreamento de referência. Sinal de Controle.

Tabela 4. Índices de desempenho dos controladores PID e GMV. Teste prático.

Controlador	σ_{ϕ}^2	σ_u^2	ISU
PID	0,0039277	0,047532	7,4749
GMV	0,0009443	0,03098	5,1277

5 Conclusão

De maneira geral, pode-se concluir que o controlador PID determinístico passa pela AE, tornando-se um controlador GMV com características preditivas e estocásticas. Com a técnica proposta neste artigo, é possível melhorar índices de desempenho importantes para um sistema de controle. A seguir, são destacadas as principais conclusões desta pesquisa e uma proposta de trabalho futuro:

- Apesar da similaridade apresentada nas respostas dos controladores PID e GMV, foi possível eleger um destes como o que alcançou o melhor desempenho. Para isto, levou-se em consideração os índices de desempenho calculados. Considerou-se que o controlador GMV, obtido através da AE, alcançou o melhor desempenho no senso de mínima variância e economia de energia.
- Percebe-se que a principal diferença entre os projetos se dá a partir do modelo no qual o controlador irá se basear. O controlador PID projetado, tem o cálculo de seus parâmetros em função dos polinômios $A(z^{-1})$ e $B(z^{-1})$, de natureza puramente determinística. Já o controlador GMV, obtido pela AE, além de se basear nos polinômios $A(z^{-1})$ e $B(z^{-1})$, também inclui no seu projeto a parcela estocástica do processo, representada pelo polinômio $C(z^{-1})$.
- Conclui-se então que, um controlador que inclua ambas, parcela determinística e estocástica, pode se valer de melhor informação

a respeito do sistema. Com isto, é possível atingir um melhor desempenho, como demonstrado nos resultados apresentados.

- Com a técnica de Augmentação Estocástica é possível fornecer ao controlador PID a capacidade de se realizar um tratamento adequado das perturbações de natureza estocásticas, presentes na malha de altitude do AR.Drone 2.0.
- Destaca-se que, até onde foi possível investigar o estado da arte, esta é a primeira vez que uma técnica de variância mínima é aplicada ao VANT AR.Drone 2.0.
- Propõem-se como trabalho futuro, realizar o tratamento dos atrasos de transporte do sistema, oriundos da comunicação Wi-Fi entre o AR.Drone e o computador onde está instalado o Simulink.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro dado pelo CNPq (408559/2016-0) e CAPES. Agradecem também os recursos humanos e materiais fornecidos pela Universidade Federal do Pará e pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará.

Referências Bibliográficas

- Åström, K. J., 1970. Introduction to Stochastic Control Theory. 1ª ed. s.l.:Academic Press.
- Åström, K. J. & Hägglund, T., 2016. Advanced PID Control. 1ª ed. USA: ISA.
- Åström, K. J. & Wittenmark, B., 1996. Computer-Controlled Systems Theory and Design. 3ª ed. s.l.:Prentice Hall.
- Clarke, D. W. & Gawthrop, P. J., 1975. Self-tuning controller. Institution of Electrical Engineers, 9(122), p. 929–934.
- Sanabria, D. E. & Mosterman, P. J., 2013. ARDrone Simulink Development Kit, Minnesota: File Exchange, Matlab.
- Santos, M. C. P., Santana, L. V., Brandão, A. S. & Sarcinelli-Filho, M., 2014. Controle e Estimação de Posições 3D de um VANT com um Sistema de Captura Usando uma Câmera de Profundidade. s.l., INDUSCON.
- Silva, A. de F.. Controlador GMV aplicado à regulação do ângulo de passo em um sistema de conversão de energia eólica: uma abordagem linear, preditiva e estocástica. Dissertação de Mestrado. UFPA. 2017.
- Silveira, A. S., 2012. Contribuições ao Controle de Variância Mínima Generalizado: Abordagem de Projeto no Espaço de Estados. Florianópolis: Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Silveira, A. S. & Coelho, A. A. R., 2011. Generalised minimum variance control state space design.

- IET Control Theory and Applications, 5(15), p. 1709–1715.
- Silveira, A. et al., 2016. Generalized minimum variance control under long-range prediction horizon setups. ISA Transactions, Volume 62, p. 325–332.
- Stevens, B. L., Lewis, F. L. & Johnson, E. N., 2016. Aircraft Control and Simulation. 3^a ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc..
- Trentini, R. et al, 2016. On the design of stochastic RST controllers based on the generalized minimum variance. In: Control (CONTROL), 2016 UKACC 11th International Conference on. IEEE, p. 1-6.
- Valavanis, K. P. & Vachtsevanos, G. J., 2015. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. 1^a ed. Dordrecht: Springer.