

EQUAÇÕES EMPÍRICAS PARA O PROJETO CONCEITUAL DE VANTS DE MÉDIA ALTITUDE E LONGA AUTONOMIA

Eduardo Pedro Krupa, eduardokrupa@gmail.com

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, R. Dr. Pereira Cabral, 1303, Pinheirinho, Itajubá - MG, 37500-903.

RESUMO: Dada a importância atual dos veículos aéreos não-tripulados (VANTS) de média altitude e longas autonomias (MALA), o presente trabalho busca analisar estatisticamente, por meio de técnicas de regressão linear, as relações entre os diversos parâmetros de projeto conceitual e preliminar dessas aeronaves, a fim de desenvolver um conjunto de equações empíricas para auxiliar o projeto de uma nova aeronave. Essas equações devem fornecer ao projetista um ponto de partida confiável, além de reduzir o tempo no ciclo de desenvolvimento de uma nova aeronave. As equações encontradas providenciam resultados condizentes com as características típicas de VANTS MALA.

PALAVRAS-CHAVE: VANTS, Projeto Conceitual, Equações Empíricas

ABSTRACT: *Given the current importance of unmanned aerial vehicles (UAVs) of medium altitude and long endurance (MALE), this paper seeks to analyze statistically, using linear regression statistics, the relationship between the different conceptual and preliminary design parameters, in order to develop a set of empirical equations to assist the design of a new aircraft. These equations should provide the designer with a reliable starting point, and reduce time in the development cycle of a new aircraft. The equations found provide results consistent with the typical characteristics of MALE UAVs.*

KEYWORDS: UAVs, Conceptual Design, Empirical Equations

INTRODUÇÃO

Ao longo da última década, a atenção dada aos Veículos Aéreos Não-Tripulados, os chamados VANTS, tem aumentado significativamente. De acordo com Department of Defense (2005), é esperado para os próximos anos um crescimento no uso desses dispositivos. Recentemente, esforços têm sido feitos a fim de estimar a relação custo – eficácia de VANTS (Valerdi and Merrill, 2005) e o desenvolvimento de novas técnicas de projeto (Gonzalez, 2005; Nguyen and Lee, 2014).

O uso e desenvolvimento de VANTS para diversas aplicações civis e militares é atualmente o segmento da indústria aeroespacial de crescimento mais rápido (Zaloga, 2008) e tornou-se uma prioridade para as forças armadas de nações como os EUA (National Research Council, 2000). Os VANTS desempenharão um papel fundamental tanto na aviação civil quanto militar devido ao seu potencial para executar diferentes aplicações de forma autônoma (total ou parcial), não expondo a vida humana em situações perigosas. Além disso, a ausência de um operador humano permite reduções expressivas de peso e custos (National Research Council, 2000).

Segundo Austin, (2010), os VANTS podem ser usados para aplicações militares que envolvam missões de inteligência, vigilância, reconhecimento e combate; e para aplicações civis que envolvem fotografia aérea, detecção de incêndios, pulverização de culturas agrícolas, mapeamento de solos, monitoramento de desastres naturais, busca e salvamento, entre outras. Frequentemente, o desenvolvimento de uma nova aeronave é dispendioso e demora muito tempo para ser concluído, o que leva a várias iterações e ciclos de

desenvolvimento. Algumas das informações básicas que são decididas durante a fase de projeto conceitual, dependem de conhecimento prévio, o que torna a experiência do engenheiro um fator importante no projeto de uma aeronave.

Conforme National Research Council, (2000), o projeto de VANTS ótimos é um problema de engenharia complexo que envolve *trade-offs* entre diversas áreas, tais como desempenho, estabilidade e controle, aerodinâmica, capacidade de voo autônomo, alcance, autonomia e custos. Tendo isto em vista, o objetivo principal deste trabalho é o de mostrar uma abordagem que oferece uma maior liberdade na fase de projeto, visando a economia de custos e a redução no tempo do ciclo de desenvolvimento de uma nova aeronave. O método sugerido é baseado em dados estatísticos de projetos bem sucedidos já em operação, e deve fornecer ao projetista um ponto de partida confiável, com informações preliminares no projeto conceitual de VANTS.

Objeto de estudo

Existem muitas formas diferentes de caracterizar um VANT, entretanto, a forma mais genérica e a mais utilizada é sugerida por Department of Defense (2005) como sendo: “Um veículo aéreo motorizado que não carrega um operador humano, usa forças aerodinâmicas para fornecer sustentação, que pode voar autonomamente ou ser pilotado remotamente, pode ser descartável ou recuperável, e pode transportar uma carga letal ou não letal. Veículos balísticos ou semi balísticos, mísseis de cruzeiro e projéteis de artilharia não são considerados veículos aéreos não tripulados.” Os VANTS são geralmente categorizados com base no seu desempenho, que geralmente está associado com o seu tamanho e tipo de missão a qual foi projetado.

Blyenburgh (1999) propôs uma classificação de VANTs, que é aceita e está em uso atualmente, na qual se baseia em valores típicos de peso máximo de decolagem, autonomia, altitude e alcance. Nesse trabalho, será abordado apenas os VANTs do tipo MALA (Média Altitude, Longa Autonomia). Segundo essa classificação, os VANTs MALA, são aeronaves não tripuladas que operam em altitudes entre 5.000 (m) e 9.000 (m), por longas durações, que podem variar de 20 (h) a até 48 (h). As demais características de um VANT MALA são mostradas na Tab. (1).

Conforme UAV Roundup (2013) o interesse das nações latino-americanas em VANTs se concentra principalmente na segurança e patrulhamento das fronteiras, operações contra o crime organizado e cartéis de drogas, e alguns grupos rebeldes remanescentes. De forma similar, os EUA, países europeus e alguns dos países do oriente médio tem dado atenção especial ao desenvolvimento de aeronaves MALA.

Tabela 1. Características típicas de um VANT MALA

Altitude máxima de voo (m)	5.000 – 9.000
Peso máximo de decolagem (kg)	850 – 1.500
Autonomia (h)	20 – 48
Alcance (km)	> 500
Alongamento da asa (-)	12 – 25
Carga alar (kg/m ²)	45 – 110
Carga carregada (kg)	150 – 350
Comprimento máximo (m)	6 – 12
Envergadura (m)	11 – 20
Potência do motor (kW)	60 – 170
Velocidade máxima (m/s)	60 - 90

Objetivos da pesquisa

O estudo realizado tem como objetivos principais: Propor uma abordagem para o projeto conceitual de VANTs do tipo MALA baseada em dados reais de aeronaves semelhantes já desenvolvidas; Estudar a relação funcional entre diversos parâmetros de desempenho e aerodinâmica de VANTs do tipo MALA e Desenvolver um conjunto de equações empíricas que relacionam entre si as variáveis do projeto conceitual e preliminar.

METODOLOGIA

A metodologia empregada consistiu em primeiramente analisar a literatura existente visando conhecer o “estado da arte” e os fundamentos acerca dos VANTs e do projeto conceitual de aeronaves. Para tal, utilizou-se, sobretudo, as referências Austin (2010) e Raymer (1992). Com base nisso, identificou-se quais as variáveis de projeto seriam de maior utilidade para o projeto conceitual e preliminar dos dispositivos VANTs. Os parâmetros estudados foram: Alcance (R), Alongamento da asa (AR), Altitude máxima de voo (A), Autonomia (En), Carga Alar (W_l), Carga carregada (P_l), Comprimento máximo (l), Envergadura da asa (b), Peso

máximo de decolagem ($MTOW$), Potência do grupo moto-propulsor (P_0) e Velocidade máxima de voo (V). Numa segunda etapa, buscou-se coletar os dados dos parâmetros citados anteriormente para diversas aeronaves existentes do tipo MALA. Assim, utilizou-se principalmente os dados fornecidos por Kemp (2008).

Com os dados das variáveis de projeto conceitual, fez-se uma regressão linear múltipla (Freund et al, 2006), cuja meta era a de prever o resultado de uma variável dependente com base em diversas variáveis independentes. Nas equações de regressão obtidas com mais de uma variável independente, convencionou-se adotar o parâmetro $MTOW$ como sendo a variável dependente. Entretanto por se tratar somente de equações lineares, pode-se rearranjar as relações obtidas a fim de se obter outras variáveis dependentes.

Com auxílio do *software R* (R – Project, 2014) de análise estatística, estimou-se os seguintes coeficientes: Coeficiente de correlação linear de Pearson (ρ), Coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{(adj)}$) e o Valor – p (P). A análise desses coeficientes foi feita com base em Cameron et al (1997) e Freund et al (2006). A seleção dos modelos estatísticos e das curvas de ajuste mais representativas se deu por meio das relações apresentadas nas Tabs.2, 3 e 4.

Tabela 2. Análise do coeficiente de correlação linear de Pearson

ρ : mede o grau de correlação linear entre as variáveis.	
0,00 – 0,20	Correlação muito baixa
0,20 – 0,40	Correlação baixa
0,40 – 0,70	Correlação moderada
0,70 – 0,90	Correlação alta
0,90 – 1,00	Correlação muito alta

Tabela 3. Análise do Valor – p

P : menor nível de significância com que não se rejeitaria a hipótese nula (hipótese contrária à do modelo adotado).	
> 0,10	Hipótese nula verdadeira, o modelo deve ser rejeitado.
0,05 – 0,10	Fraca evidência contra a hipótese nula.
0,01 – 0,05	Evidência moderada contra a hipótese nula.
0,001 – 0,01	Forte evidência contra a hipótese nula.
< 0,001	Evidencia muito forte contra a hipótese nula.

Tabela 4. Análise do coeficiente de determinação

$R^2_{(adj)}$: medida de quanto o modelo ou ajuste consegue explicar os valores observados (dados coletados).	
0 – 20 %	Ajuste muito fraco
20 – 40 %	Ajuste fraco
40 – 70 %	Ajuste moderado
70 – 90 %	Ajuste forte
90 – 100 %	Ajuste muito forte

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um total de 20 aeronaves MALA foram estudadas. Vale ressaltar que todas aeronaves estão atualmente em operação. Com auxílio do *Software R* analisou-se os coeficientes ρ e P para todas as combinações lineares possíveis com uma única variável independente. Os resultados podem ser vistos nas Tabs. 5, 6 e 7. Observa-se que alguns parâmetros, tais como R , AR , En , W_l , l e b não demonstraram ter nenhum tipo de correlação com as demais variáveis.

Tabela 5. Análise de Correlação

	P_0	l	b	AR	$MTOW$
l	0,485 0,035	-	-	-	-
b	0,520 0,023	0,795 0,000	-	-	-
AR	0,043 0,870	0,292 0,256	0,408 0,104	-	-
$MTOW$	0,953 0,000	0,651 0,002	0,716 0,000	0,210 0,418	-
P_l	0,980 0,000	0,461 0,047	0,502 0,028	0,132 0,613	0,947 0,000

Tabela 6. Análise de Correlação

	P_0	l	b	AR	$MTOW$
V	0,850 0,000	0,415 0,069	0,440 0,052	-0,204 0,433	0,763 0,000
En	0,001 0,997	-0,023 0,922	0,209 0,376	0,242 0,350	0,041 0,864
A	0,817 0,000	0,633 0,003	0,759 0,000	0,277 0,282	0,875 0,000
R	0,048 0,845	-0,032 0,893	0,030 0,900	0,190 0,465	0,094 0,694
W_l	0,038 0,885	0,337 0,186	0,266 0,302	0,809 0,000	0,198 0,445

Tabela 7. Análise de Correlação

	P_l	V	En	A	R
V	0,827 0,000	-	-	-	-
En	0,068 0,783	0,213 0,368	-	-	-
A	0,813 0,000	0,687 0,001	0,340 0,143	-	-
R	0,028 0,910	0,056 0,815	0,018 0,939	0,063 0,792	-
W_l	0,099 0,705	-0,234 0,366	0,138 0,597	0,295 0,250	0,286 0,266

Com base nisso, fez-se então a regressão linear ajustando-se linhas de tendência para as correlações que tivessem coeficientes ρ superiores a 0,70 e P inferiores a 0,001.

Selecionou-se então apenas as equações de regressão linear com coeficientes de determinação que fossem superiores a 70%. As relações lineares obtidas são representadas pelas Eqs. (1), (2), (3), (4), (5) e (6). Vale

ressaltar que as variáveis presentes nessas equações utilizam as mesmas unidades dos parâmetros da Tab.(1).

$$P_l = 12,8 + 2,448 P_0 \quad (1)$$

$$R^2_{(adj)} = 95,95\%$$

$$MTOW = 369,8 + 6,648 P_0 \quad (2)$$

$$R^2_{(adj)} = 90,30\%$$

$$P_l = -89,9 + 0,3391 MTOW \quad (3)$$

$$R^2_{(adj)} = 89,28\%$$

$$P_l = -868 + 9,25 V \quad (4)$$

$$R^2_{(adj)} = 78,30\%$$

$$A = 5.505 + 2,250 MTOW \quad (5)$$

$$R^2_{(adj)} = 76,48\%$$

$$V = 56,42 + 0,1184 P_0 \quad (6)$$

$$R^2_{(adj)} = 70,53\%$$

Novamente, utilizando o *software R*, encontrou-se as equações lineares com mais de uma variável independente que possuíam valores de $R^2_{(adj)}$ maiores que 70%. Essas relações são mostradas nas Eq. (7), (8), (9), (10), (11) e (12).

$$MTOW = 315 + 2,664 P_l - 3,65 En + 0,0767 R \quad (7)$$

$$R^2_{(adj)} = 89,60\%$$

$$MTOW = -419 + 2,314 P_l + 111,2 l \quad (8)$$

$$R^2_{(adj)} = 93,74\%$$

$$MTOW = -374 + 1,761 P_l - 13,82 En + 0,1581 A \quad (9)$$

$$R^2_{(adj)} = 94,26\%$$

$$MTOW = -505 + 78b - 8,44 En + 0,0689 R + 2,212 P_l \quad (10)$$

$$R^2_{(adj)} = 97,62\%$$

$$MTOW = -314 - 4,39 V + 74,2 b + 2,413 P_l \quad (11)$$

$$R^2_{(adj)} = 95,91\%$$

$$MTOW = 81 + 1,741 P_l + 2,41 P_0 - 28,4 AR + 79,0b - 10,10 V + 0,0647 R + 2,83 W_l \quad (12)$$

$$R^2_{(adj)} = 98,86\%$$

Exemplo de aplicação das equações

Suponha o caso em que deseja-se projetar um VANT para operar em médias altitudes e longas autonomias conforme as características da Tab.(1). Considerando que a carga a ser carregada seja de 250 (kg), estimar os valores dos demais parâmetros de projeto conceitual.

Sendo $P_l = 250$ (kg), inicialmente deve-se estimar a potência do motor requerida pela Eq.(1). Portanto, $P_0 = 96,9$ (kW). Com o valor da potência, pode-se calcular o peso máximo de decolagem ($MTOW$) por meio da

Eq.(2). Assim, tem-se que $MTOW = 1014,0$ (kg). De forma similar, utilizando o valor da potência, calcula-se, por meio da Eq. (6), a velocidade máxima de voo. A velocidade estimada é de 67,9 (m/s).

Usando o valor de $MTOW$ na Eq. (5), estima-se que a altitude máxima de voo seja $A = 7789$ (m). Sabendo os valores de $MTOW$, A e P_l , utiliza-se então a Eq. (9) para calcular a autonomia da aeronave que será de 20,5 (h). Conhecendo-se então En , $MTOW$ e P_l , estima-se o alcance do VANT pela Eq. (7), que será de 1405 (km). O comprimento da aeronave é calculado usando a Eq. (8), assim $l = 7,7$ (m). Para estimar o alongamento da asa (AR) e a carga alar (W_l) deve-se substituir a Eq.(13), relação sugerida por Raymer (1992), na Eq. (12).

$$AR = (b^2/MTOW). W_l \quad (13)$$

Com isso, a carga alar será de 101 (kg/m²) e o alongamento da asa terá o valor de 18.9 (-). Observa-se que todos os valores calculados são compatíveis com as características típicas de um VANT do tipo MALA, como pode ser verificado na Tab. (1).

Observa-se que as equações apresentadas podem ser manipuladas de acordo com os dados disponíveis e com as variáveis a serem estimadas, não seguindo, necessariamente, o procedimento que fora exemplificado.

CONCLUSÃO

Considerando a grande atenção dada atualmente ao desenvolvimento de VANTs de média altitude e longa autonomia (MALA), este trabalho torna-se útil no fornecimento de equações empíricas a serem utilizadas no projeto conceitual e preliminar dessas aeronaves, permitindo uma liberdade maior na fase de projeto e reduzindo o tempo de desenvolvimento de novas aeronaves. As equações desenvolvidas, pelo fato de serem lineares, são de fácil utilização, além disso, são confiáveis, uma vez que possuem alto grau de correlação linear.

Com base no exemplo estudado, verificou-se que as equações empíricas sugeridas de projeto conceitual são válidas, uma vez que os resultados obtidos são condizentes com as características típicas de um VANT MALA. Sugere-se num futuro trabalho que seja feita uma extensão dos dados estudados, incluindo um número maior de aeronaves a fim de aumentar a confiabilidade e precisão das equações empíricas obtidas. Sugere-se também que a análise seja estendida para VANTs de outras categorias.

REFERÊNCIAS

- Austin, R., 2010 “Unmanned Aircraft Systems – UAVS Design, Development and Deployment”, Ed. Wiley, United Kingdom.
- Blyenburgh, V.P., 1999, “UAVs – Current Situation and Considerations for the Way Forward”, RTO AVT Course, Rhode-Saint-Genève, Belgium.

- Cameron, A. C., Wind Meijer, F. A.G., Gramajo, H., Cane, D. E., Khosla, C., 1997, “An R-squared measure of goodness of fit for some common nonlinear regression models”, *Journal of Econometrics* 77 (2): 1790–2.
- Department of Defense – DOD, 2005, “Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005-2030”, Office of the Secretary of Defense, United States.
- Freund, R.J., Wilson, W.J., Sa, P., 2006, “Regression Analysis – Statistical Modeling of a Response”, Elsevier.
- Gonzalez, L.F., 2005, “Multidisciplinary Optimisation of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Using Multi-Criteria Evolutionary Algorithms”, sixth World Congress of Structural and Multi-criteria Evolutionary Algorithms.
- Kemp, I., 2008, “Unmanned Vehicles Handbook 2008”, Shephard Press, United Kingdom.
- National Research Council, 2000, “Uninhabited Air Vehicles”, National Academies Press, Publication NMAB-495.
- Nguyen, N.V, J.W. Lee and Y.D. Lee, 2014, “A Multidisciplinary Robust Optimisation Framework for UAV Conceptual Design”, *The Aeronautical Journal*, Vol.118, No. 1200.
- Raymer, D. P., “Aircraft Design: a conceptual approach”, Ed. AIAA Education Series, 1992.
- R – Project, 2014. “The R Project for Statistical Computing”. 7 Jul. 2014, < <http://www.r-project.org>>
- UAV Roundup 2013, July – August 2013, Aerospace America, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Valerdi, R., Merrill, J., Maloney, P., 2005, “Cost Metrics for Unmanned Aerial Vehicles”, AIAA 16th Lighter-Than-Air Systems Technology Conference and Balloon Systems Conference, Arlington, VA.
- Zaloga, S.J., 2008, “Unmanned Aerial Vehicles”, *Robotic Air Warfare 1917 – 2007*, Osprey Publishing, Great Britain.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

O autor é o único responsável pelo trabalho apresentado.