

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ENGENHARIA AERONÁUTICA

GABRIEL ARAÚJO HERNÁNDEZ

**ANÁLISE DO CONJUNTO MOTOPROPULSOR ELÉTRICO E SUA
INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO DE VANT'S**

Uberlândia – Minas Gerais

2018

GABRIEL ARAÚJO HERNÁNDEZ

**ANÁLISE DO CONJUNTO MOTOPROPULSOR ELÉTRICO E SUA
INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO DE VANT'S**

Projeto de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito à obtenção do título de obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Aeronáutica.

Orientador: Leonardo Sanches.

UBERLÂNDIA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

GABRIEL ARAÚJO HERNÁNDEZ

ANÁLISE DO CONJUNTO MOTOPROPULSOR ELÉTRICO E SUA INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO DE VANT'S

Projeto de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Aeronáutica, pela seguinte banca examinadora:

Aprovado em: ____ de _____ de _____.

Leonardo Sanches

Orientador

Universidade Federal de Uberlândia, UFU.

Felipe Machini Malachias Marques

Universidade Federal de Uberlândia, UFU.

Tobias Souza Moraes

Universidade Federal de Uberlândia, UFU.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, meu guia, socorro presente na hora de angústia, ao meu pai Manuel Gonzalo Hernández Terrones “In Memorian”, minha mãe Geraldina Eliza Araújo Hernández, minha irmã Lorena e minha namorada e amigos que não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Faculdade de Engenharia Mecânica – UFU, pelo ambiente criativo e amigável que proporciona, ao seu corpo docente, em especial ao Prof. Dr. Leonardo Sanches que, além de orientador, me acompanhou durante toda a graduação e foi um grande conselheiro. Agradeço a todos amigos, em especial aos da Tucano Aerodesign, companheiros de trabalhos e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar características de consumo e desempenho do conjunto motopropulsor elétrico de um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulável), além disso propor um método para calcular a autonomia e o alcance deste VANT. Por exemplo, para a missão bem-sucedida de um VANT de reconhecimento aéreo é altamente desejável prever e conhecer as condições de desempenho de voo. Para isso, foram realizadas medições em uma bancada de testes considerando diferentes níveis de tensão de alimentação e diferentes níveis de *throttle* do conjunto motopropulsor, simulando o ciclo de descarga da bateria e a condição operacional do voo. Posteriormente, estes dados foram cruzados com uma curva teórica de descarga da bateria LiPo, que representa a vida útil da mesma, para uma determinada corrente de descarga. Os resultados mostram a autonomia prevista e o alcance do VANT para uma certa velocidade de cruzeiro. Sendo que, condições operacionais ótimas são verificadas em função do rendimento do conjunto motopropulsor em diferentes condições de voo.

Palavras-Chave: características de desempenho, ciclo de descarga da bateria, VANT, otimização de condições operacionais;

ABSTRACT

This paper aims to evaluate the consumption and performance characteristics of the electric powertrain of a UAV (Unmanned Aerial Vehicles), in addition to proposing a method to calculate the autonomy and the range of this UAV. For example, for the successful mission of an aerial reconnaissance UAV, it is highly desirable to predict and know the flight performance conditions. For this, measurements were made on a test bench considering different levels of supply voltage and different Throttle levels of the powertrain, simulating the battery discharge cycle and the operational condition of the flight. Later, these data were crossed with a theoretical discharge curve of the LiPo battery, which represents the useful its life, for a given discharge current. The results show the expected range and the range of the UAV for a certain cruising speed. Since, optimum operating conditions are verified as a function of the performance of the powertrain under different flight conditions.

Keyword: performance characteristics, battery discharge cycle, propeller-driven UAV, optimal operational conditions

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Hexacóptero DJI F550.	2
Figura 2- Esquema elétrico Bateria-ESC-Motor do modelo de hexacóptero F550.	4
Figura 3- Esquema de encaixe Motor-Hélice no hexacóptero modelo F550.	4
Figura 4- Esquema de uma célula eletroquímica básica.	5
Figura 5- Curva de descarga teórica para bateria Li-Po.	7
Figura 6- Esquema de um ESC genérico, onde a saída é conectada às três fases do motor.	8
Figura 7- Diagrama de blocos simplificados de um ESC.	9
Figura 8- Forma de onda de corrente gerada para cada fase.	9
Figura 9- Máquina síncrona convencional - (a) rotor polos lisos - (b) rotor polos salientes.	10
Figura 10- Máquina de indução - (a) rotor tipo gaiola - (b) rotor tipo bobinado.	10
Figura 11- Esquema do motor considerado no trabalho.	11
Figura 12- Força Resultante no Aerofólio da Pá de uma Hélice.	12
Figura 13- Componentes de Velocidade e Ângulos do Escoamento na Pá.	13
Figura 14- Desenho da bancada de testes.	15
Figura 15- Interface da bancada no computador desenvolvida pelo laboratório SiAPrEl-UFU.	16
Figura 16- Fotos da bancada de testes.	16
Figura 17- Esquema de montagem da bancada.	16
Figura 18- Interface para inserir dados dos ensaios.	17
Figura 19- Interface para demonstração de resultados.	18
Figura 20- Exemplo de refinamento de matriz.	19
Figura 21- Exemplo da matriz que armazena os dados coletados, onde cada tensão [V] está armazenada nas linhas (i) e cada nível de throttle nas colunas (j).	19
Figura 22- Curvas de descarga de uma bateria LiPo.	20
Figura 23- Linha de tendência da Potência considerada para uma tração fixa.	21
Figura 24- Linha de tendência da corrente considerada para uma tração fixa.	21
Figura 25- Etapas para encontrar a autonomia.	22
Figura 26- Velocidade x Tração do Hexacóptero F550.	23
Figura 27- Throttle x Tensão x Corrente	24
Figura 28- Throttle x Tensão x Potência Elétrica.	25

Figura 29- Throttle x Tensão x Corrente no Vazio.....	26
Figura 30- Throttle x Tensão x Empuxo.....	26
Figura 31- Throttle x Tensão x Torque.....	27
Figura 32 - Throttle x Tensão x Potência do Eixo.....	28
Figura 33- Throttle x Tensão x Rendimento do Motor.....	28
Figura 34- Throttle x Tensão x Rendimento da Hélice.	29
Figura 35 -Throttle x Tensão x Rendimento da Hélice Plausível.....	29
Figura 36- Empuxo x Potência.	32
Figura 37- Empuxo x Autonomia Total.....	32
Figura 38- Autonomia instantânea no decorrer do tempo de voo, para cada empuxo.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dados extraídos da bancada.	17
Tabela 2- Autonomias para diferentes valores de Tração.....	30

LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{hélice}$	– Área da Hélice [m^2]
i	– Corrente [A]
i_0	– Corrente no Vazio [A]
K_v	– Constante de Velocidade do Motor
P_{eixo}	– Potência do Eixo [W]
$P_{elétrica}$	– Potência Elétrica [W]
P_{thrust}	– Potência de Tração [W]
Q_m	– Torque do Motor [$N.m$]
R	– Resistência do Motor [ohm]
T	– Tração/Empuxo [N]
v	– Tensão [V]
V_h	– Velocidade do Ar ao Pairar [m/s]
V_{∞}	– Velocidade Ambiente [m/s]
η_{ESC}	– Rendimento do ESC [%]
$\eta_{hélice}$	– Rendimento da Hélice [%]
η_{motor}	– Rendimento do Motor [%]
ρ	– Densidade do Ar [Kg/m^3]
Ω	– Velocidade Angular [rad/s]

SUMÁRIO

1.	Introdução.....	1
2.	Objetivos.....	2
3.	Revisão Bibliográfica	3
3.1.	Introdução	3
3.2.	Desenvolvimento tecnológico de VANT's na Agricultura de Precisão	3
3.3.	Conjunto Motopropulsor elétrico.....	4
3.3.1	Bateria.....	5
3.3.2	ESC	7
3.3.3	Motor Brushless.....	9
3.3.4	Hélice.....	12
4.	Metodologia.....	15
5.	Análise de Resultados.....	24
5.1.	Consumo Elétrico	24
5.2.	Desempenho.....	26
5.3.	Autonomia e alcance.....	30
6.	Considerações Finais	34
7.	Referências	35
8.	Anexos.....	37
8.1.	ANEXO 1 – CÓDIGO MATLAB	37
8.2.	ANEXO 2 – FUNÇÃO REFINAMENTO DE MATRIZ.....	43

1. Introdução

Atualmente o uso de aeronaves não tripuladas, popularmente conhecidas como Drones, está se intensificando. Aeronaves estas que são utilizadas de diversas formas, tais como: hobby, filmagem de eventos, segurança e agricultura de precisão. Em especial, a utilização dos Drones para agricultura de precisão vem se mostrando de extrema importância em um país onde a economia gira em torno do agronegócio. Ademais, a agricultura de precisão é uma técnica agrícola preditiva, que detecta e realiza o controle de pragas antes de grandes prejuízos nas lavouras (Bernardi et al, 2014). Tendo em vista que as imagens aéreas da lavoura são os principais objetos de análise da agricultura de precisão, a utilização de VANT's é a principal solução para a obtenção dessas imagens (D'OLEIRE-OLTMANN et al., 2012).

Outrossim, um dos principais componentes dos Drones é o seu conjunto de motores elétricos que são fornecidos no mercado por diversos fabricantes e apresentam informações como: rotação máxima por volt (K_v dada em rpm/V), peso, potência (máxima e contínua) e força de propulsão (usando configurações de bateria e hélices pré-definidas) (DEMOLINARI, 2016), porém informações como, autonomia, alcance e rendimento do motor não são apresentadas na sua ficha técnica, pois essas características dependem de como estes motores são implementados (bateria utilizada, número de motores e trimagem da aeronave). Com isso, criar uma ferramenta que realize a análise de desempenho destes motores mostrou-se importante; haja vista que, através de resultados experimentais obtidos de um teste de bancada com o conjunto motopropulsor, obtém-se a autonomia, o alcance e o seu consumo elétrico, fazendo com que, para cada condição de trimagem, exista uma configuração mais eficiente de voo.

Em particular, este trabalho, estuda a influência da descarga da bateria no desempenho do motor elétrico da aeronave e propõe um método que integra o modelo numérico das baterias de lítio com o modelo experimental do motor. Pesquisas já trabalham com modelagem numérica da descarga de baterias de lítio íon, que são mais utilizadas no mercado (WOTTRICH, 2017) porém, faltava implementar o resultado destas pesquisas em modelos experimentais aplicados à Drones.

2. Objetivos

A partir de testes experimentais e análises realizadas com os conhecimentos obtidos durante a graduação, este trabalho tem como objetivo caracterizar o conjunto motopropulsor elétrico de um VANT e propor um método para obtenção dos resultados. Em específico será analisado o conjunto motopropulsor do hexacóptero DJI F550 (Figura 1), composto por, um ESC 15A, um motor Brushless E-300 e hélice Silvernut (9450) que serão detalhados no trabalho. E como resultado das análises serão obtidos características de consumo elétrico e desempenho em voo da aeronave.



Figura 1- Hexacóptero DJI F550.

Disponível em: <https://trackimo.com/dji-f550-hexacopter/>. Acesso em: 19/06/2017.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Introdução

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre a importância do desenvolvimento tecnológico de VANT's para a Agricultura de Precisão no Brasil, em especial para missões de fotometria, onde é necessária uma análise mais aprofundada nas características de desempenho da aeronave de autonomia e alcance. Em seguida, será feita uma revisão teórica necessária para melhor entendimento da metodologia apresentada neste trabalho.

3.2. Desenvolvimento tecnológico de VANT's na Agricultura de Precisão

O conceito de Agricultura de Precisão está normalmente associado à utilização de equipamento de alta tecnologia (seja hardware ou software) para avaliar, ou monitorar, as condições numa determinada parcela de terreno, aplicando depois nos diversos fatores da produção (sementes, fertilizantes, fitofármacos, reguladores de crescimento, água, etc.).

No monitoramento de áreas agrícolas (fotometria), se faz necessário a utilização de tecnologias recentes, como, os sistemas de posicionamento a partir de satélites (GPS - Global Positioning System), os sistemas de informação geográfica (SIG) ou os sensores eletrônicos, associados para realizar a fotogrametria de grandes áreas (COELHO; SILVA, 2013).

Com isso Przybilla e Wester-Ebbinghaus em 1979 fizeram os primeiros experimentos com VANTs em fotogrametria. Voaram na escala de 1:1000, com velocidade de obturador da câmera da ordem de 1/1000 s, com velocidade da aeronave suficiente para se obter imagens aceitáveis mesmo em movimento.

As tecnologias que estão sendo empregadas em VANT's hoje estão evoluindo rapidamente e se apresentam com grande promessa. Os sistemas autônomos estão se tornando mais sofisticados e confiáveis. Os VANT's, em virtude da sua capacidade para assumir as missões de alto risco e seu potencial para operações de baixo custo em relação à aeronave tripulada, tem se tornado uma proposta ideal para o desenvolvimento de novas tecnologias. Pesquisas em áreas tais como novos materiais, células de combustível, software adaptativo; memórias; comunicações e laser, com o objetivo de melhorar o desempenho do VANT, poderão remodelar o mercado de novas aplicações (INAMASU; BERNARDI, 2014).

3.3. Conjunto Motopropulsor elétrico

O conjunto Motopropulsor é responsável por fornecer tração para que a aeronave saia do repouso, decole e realize a sua missão, em um VANT elétrico este conjunto é composto por bateria, ESC, motor e hélice, como mostrado na Figura 2 e na Figura 3. Seu estudo é de extrema importância para a melhoria no desempenho de VANT's, pois este conjunto é o principal responsável pela autonomia e pelo alcance da aeronave.

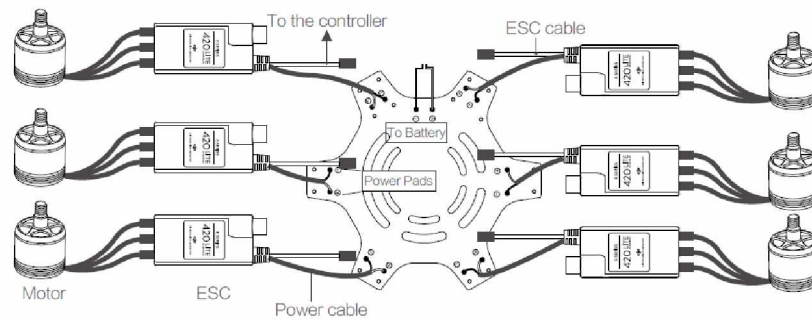


Figura 2- Esquema elétrico Bateria-ESC-Motor do modelo de hexacóptero F550.

Disponível em: (DJI, 2015).

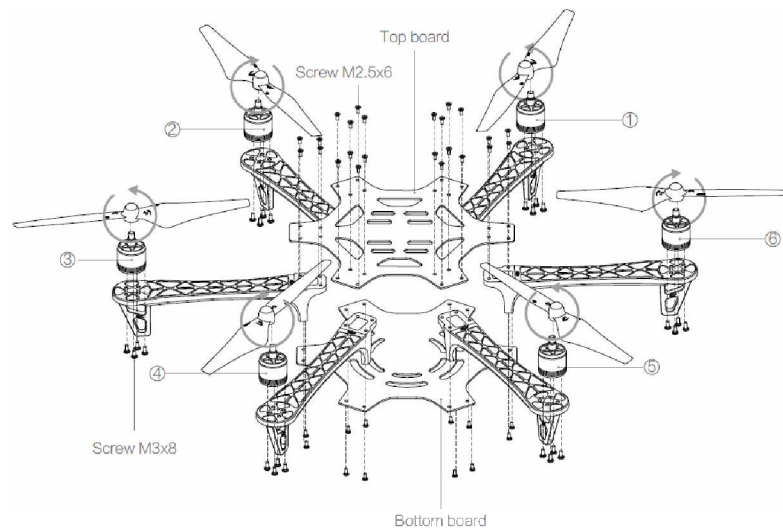


Figura 3- Esquema de encaixe Motor-Hélice no hexacóptero modelo F550.

Disponível em: (DJI, 2015).

3.3.1 Bateria

Por definição, as baterias são dispositivos que convertem a energia química, armazenada em seus materiais constituintes, em energia elétrica por meio de uma reação de oxirredução eletroquímica (FREITAS, 2015). Dentre as tecnologias desenvolvidas para VANT's, a bateria vem sendo arduamente estudada. Desde a década de 70 se fala sobre as 'baterias plásticas', que seriam revolucionárias por utilizarem plásticos secos como eletrólito. Apesar desse interesse datar de tantos anos, as baterias tomaram um rumo mais um prático, desviado do intuito inicial. No fim dos anos 90, com o crescimento das baterias de íons de lítio (Li-íon), foi possível criar um tipo de bateria que usa os mesmos íons de lítio, porém separados por uma camada de polímero com poros micrométricos, embebida em um solvente orgânico que servia de eletrólito (VINCENT; SCROSATI, 1997).

Em geral, uma bateria é composta por uma ou mais células eletroquímicas (Figura 4), ligadas em série ou em paralelo, ou ainda uma combinação de ambos, variando de acordo com a capacidade e a tensão elétrica de saída desejadas (FREITAS, 2015).

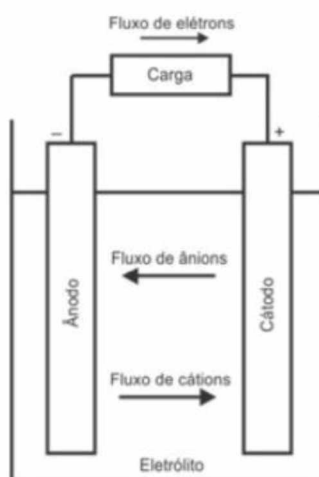


Figura 4- Esquema de uma célula eletroquímica básica.

Disponível em: (FREITAS, 2015).

As baterias se diferem, principalmente, pelo material que elas compõem e pela sua utilização. Elas possuem determinadas características que influenciam, em maior ou menor

grau, no comportamento durante o processo de descarga (FREITAS, 2015) que serão explicadas a seguir.

A primeira característica é o nível de *cutoff* que é definido pelo limite mínimo de tensão elétrica que a bateria consegue disponibilizar para que o sistema continue em operação. Por isso o tempo de vida da bateria está diretamente associado ao nível de *cutoff*, pois é o indicador que expressa o intervalo de tempo decorrido em uma operação de descarga para que a bateria atinja o nível mínimo de energia (FREITAS, 2015).

Outra característica a ser mencionada é a capacidade de uma bateria, ela é a quantidade de carga elétrica armazenada, e pode ser especificada de três formas distintas (FREITAS, 2015):

- Capacidade teórica: representa a capacidade total de energia que pode ser extraída da bateria, na prática;
- Capacidade padrão: representa a quantidade de energia que pode ser extraída sob condições especificadas pelo fabricante;
- Capacidade atual: que representa a quantidade de energia extraída quando uma determinada corrente é utilizada para descarregá-la e pode exceder a capacidade padrão, mas jamais a capacidade teórica.

Enquanto a terceira característica que influencia o comportamento no processo de descarga é o tipo de bateria analisada; estas que podem ser, de Níquel-Cádmio (Ni-Cd) - que são fabricadas desde 1950 e são projetadas para suportar correntes de carga moderada -, de Chumbo-Ácido - fabricadas desde a década de 70 e são compostas, em geral, por eletrodos de chumbo e dióxido de chumbo imersos em um eletrólito líquido com uma concentração de ácido sulfúrico -, de Níquel Metl-Hidreto (Ni-MH) - inicialmente desenvolvidas nos anos 90 para exploração espacial e aplicação em satélites -, de Lítio-Íon (Li-Ion) - que são mais leve de todos os metais, possuindo também o maior potencial eletroquímico - e, por fim, as baterias de Lítio-Íon Polímero (Li-Po), que serão abordadas neste trabalho. As baterias Li-Po são as mais utilizadas em VANT's, pois, dentre as suas principais vantagens, é possível listar a sua espessura ultrafina, a possibilidade de diferentes tamanhos e formas, o peso reduzido quando comparadas com outras tecnologias de baterias e, a resistência a sobrecarga (FREITAS, 2015).

O processo de descarga de uma bateria é o parâmetro que afeta diretamente o seu tempo de vida, que, por definição, é o tempo que a mesma demora para atingir um determinado nível de carga (BRONDANI; SAUSEN; SAUSEN, 2014). A Figura 5 mostra a curva de descarga

nominal de uma célula de bateria LiPo com tensão nominal de 1,3V, a queda de tensão depende da corrente que a bateria está fornecendo, já o tempo de vida da bateria é encontrado no momento em que a tensão chega ao nível e *cutoff*.

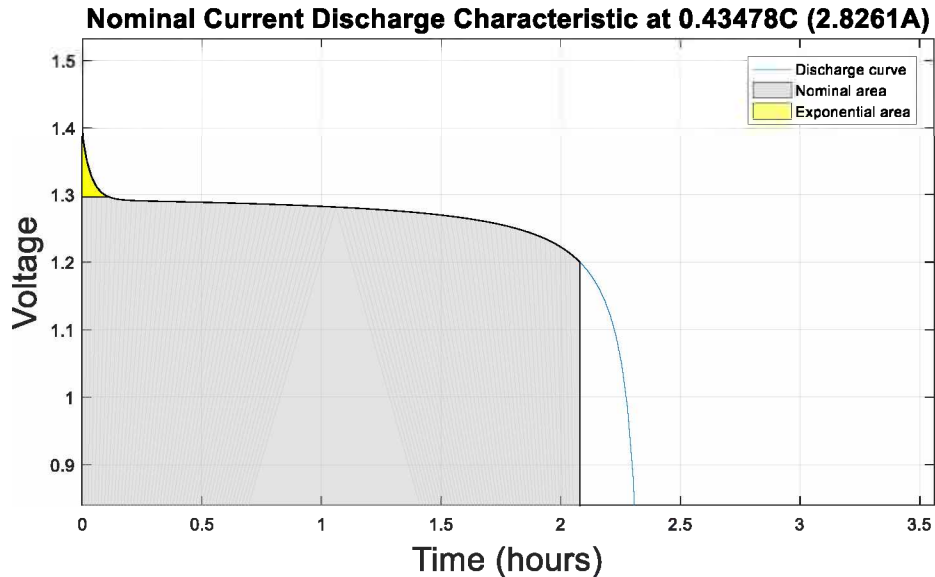


Figura 5- Curva de descarga teórica para bateria Li-Po.

Disponível em: (MATHWORKS, 2016)

Uma das maneiras citadas na literatura para prever o tempo de vida de baterias é através da utilização de modelos matemáticos que simulam a descarga de energia destes sistemas (BRONDANI; SAUSEN; SAUSEN, 2014). No presente trabalho será utilizado o modelo elétrico *Battery*, presente no *Matlab/Simulink*, modelo cujo foi validado pelo trabalho (BRONDANI; SAUSEN; SAUSEN, 2014). O estudo destas baterias se faz necessário, pois motores elétricos possuem desempenho diretamente relacionado à sua fonte de alimentação.

3.3.2 ESC

Ao contrário dos motores de corrente contínua (DC), os motores do tipo *brushless* não são alimentados através de escovas, mas sim por um circuito eletrônico. Este circuito realiza o controle de velocidade em malha fechada, além de prover energia ao motor a partir de uma

fonte DC (MELO, 2010). Este dispositivo se chama ESC (*Electronic Speed Control*) e se encontra na Figura 6.

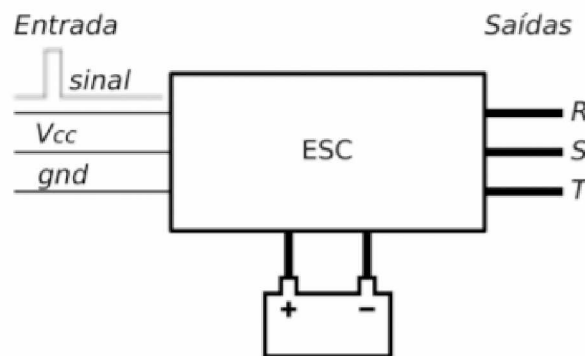


Figura 6- Esquema de um ESC genérico, onde a saída é conectada às três fases do motor.

Disponível em: (MELO, 2010)

O fato do ESC consumir a maior parte da potência entregue pela bateria para alimentar os motores, faz com que, ao serem construídos, tenham que possuir uma boa eficiência energética, minimizando a perda de energia da bateria (OST, 2015).

Como mostrado na Figura 7, o ESC é dividido, basicamente, em duas partes: uma de controle e uma de potência. A parte de controle, normalmente é um microcontrolador, que a partir de um sinal PWM (*Pulse Without Modulation*) geram três outros, normalmente trapezoidais e defasados entre si em 120° como mostrado na Figura 8. Já a segunda parte do ESC, tem como entrada sinais gerados pela primeira etapa onde amplifica-se a corrente das três fases através de transistores do tipo MOSFET (MELO, 2010).

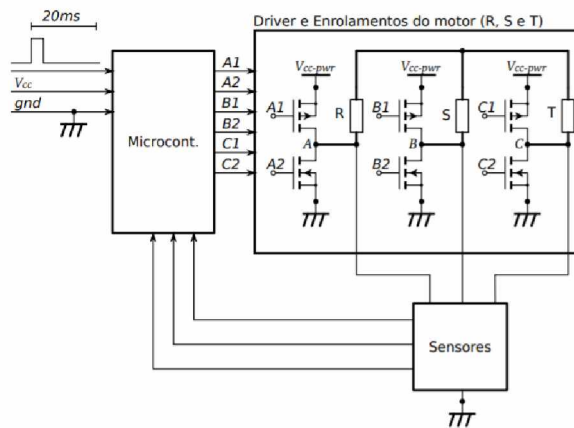


Figura 7- Diagrama de blocos simplificados de um ESC.

Disponível em: (MELO, 2010)

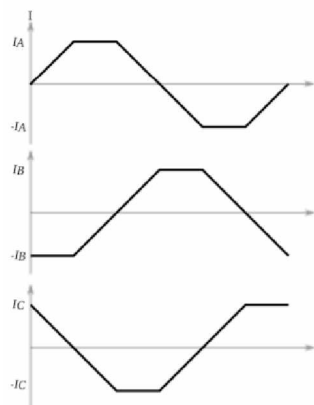


Figura 8- Forma de onda de corrente gerada para cada fase.

Disponível em: (MELO, 2010)

3.3.3 Motor Brushless

Os motores elétricos têm como função converter energia elétrica em energia mecânica, seu uso se difundiu em diversas áreas. Com o objetivo de atender a demanda de cada área, os motores foram desenvolvidos com as tecnologias disponíveis na época. Entre os diversos tipos de motores, se encontra o motor síncrono (XIA, 2012). Neste tipo de motor o campo magnético do rotor (Figura 9) é independente do campo magnético do estator (Figura 10), ou seja, o campo magnético do rotor busca o alinhamento com o campo magnético girante do estator, isso faz com que a velocidade de rotação seja proporcional à frequência de alimentação do estator (OST, 2015).

Os motores síncronos caracterizam-se por sua elevada capacidade de torque, resistência mecânica, precisão e eficiência. O motor brushless ou BLDC (*Brushless Direct Current Motor with Permanent Magnet*) foi desenvolvido tendo como base o motor *brushes*, o mesmo que é um motor de corrente contínua de ímãs permanentes e sem escovas e, devido ao fato de ser eficiente, silencioso e confiável, é o mais utilizado ao se tratar de motores de baixa potência. Em motores BLDC o comutador mecânico é substituído por um circuito elétrico, além disso, ao contrário de motores tradicionais, foi colocado um ímã permanente nas laterais do estator e do rotor. Motor este que geralmente usa três fases durante seu funcionamento, onde por meio de sensores de efeito Hall integrados no estator, detectam qual o polo magnético está mais próximo. Já que ao combinar os sinais dos sensores é possível obter a posição atual do rotor, e assim fornecer a sequência certa de acionamento (OST, 2015). Os motores utilizados neste trabalho não possuem o sensor de efeito Hall, pois o controle é realizado por um dispositivo externo ESC.

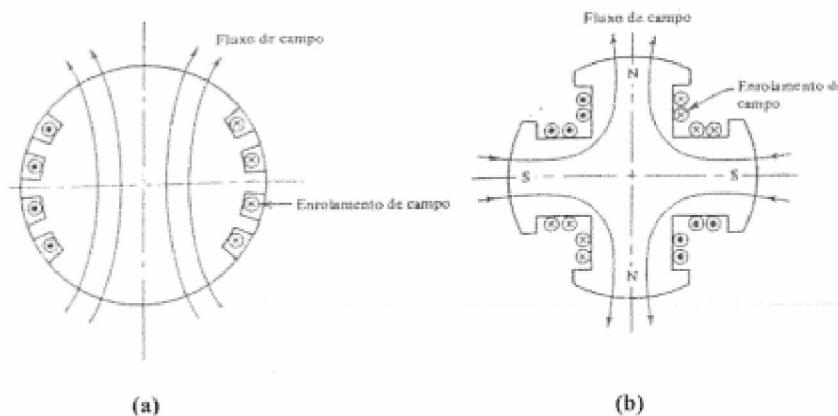


Figura 9- Máquina síncrona convencional - (a) rotor polos lisos - (b) rotor polos salientes.

Disponível em: (DIAS et al., 2005).

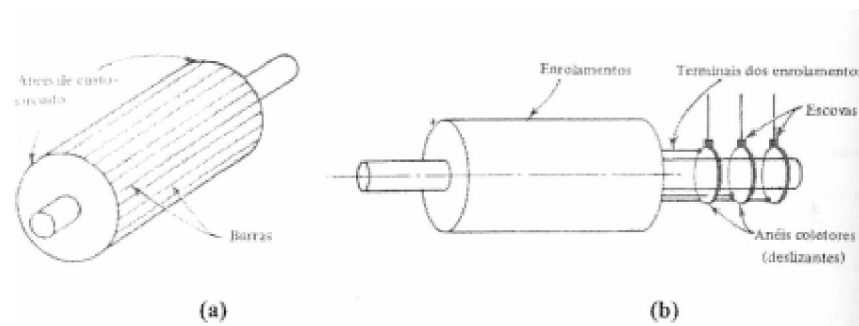


Figura 10- Máquina de indução - (a) rotor tipo gaiola - (b) rotor tipo bobinado.

Disponível em: (DIAS et al., 2005).

Para determinar as características de desempenho do motor neste trabalho, faz-se necessária uma revisão de conceitos de elétrica e algumas considerações. O fato do voltímetro e do amperímetro da bancada estarem localizados entre a bateria e o ESC (como detalhado na seção de metodologia), permite caracterizar o motor elétrico conforme mostrado na Figura 11. O que, segundo (DRELA, 2005), leva as equações que serão utilizadas, juntamente com os dados coletados, para encontrar as características de desempenho do conjunto motopropulsor elétrico.

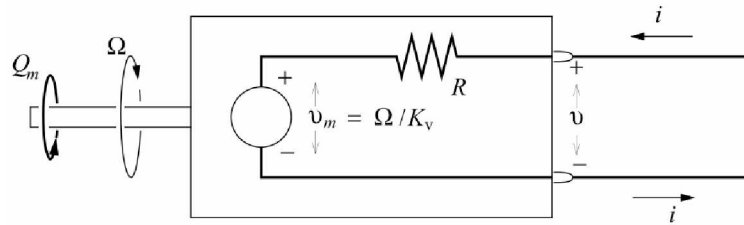


Figura 11- Esquema do motor considerado no trabalho.

Disponível em: (DRELA, 2005)

A equação (1) demonstra o torque do motor Q_m em função da corrente e da constante de velocidade K_v ; já a equação (2) demonstra o velocidade de rotação Ω em função da corrente i e tensão v que alimenta o motor (DRELA, 2005).

$$Q_m(i) = \frac{i - i_0}{K_v} \quad (1)$$

$$\Omega(i, v) = (v - iR)K_v \quad (2)$$

A potência do eixo é encontrada a partir de (3), que, a partir de (1) e (2), é definida. Vale ressaltar que, como critério de correção do trabalho, o rendimento do ESC foi considerado 80%, essa consideração tem como objetivo, em (4), corrigir a potência elétrica para a potência que alimenta o motor, fazendo com que, em (5) o rendimento encontrado seja do motor *brushless* utilizado (DRELA, 2005).

$$P_{eixo}(i, v) = Q_m \Omega \quad (3)$$

$$P_{elétrica}(i, v) = v i \eta_{ESC} \quad (4)$$

$$\eta_{motor}(i, v) = \frac{P_{eixo}}{P_{elétrica}} \quad (5)$$

3.3.4 Hélice

A hélice, juntamente com o motor, é responsável pela propulsão da aeronave. Ela pode ser descrita como um aerofólio rotativo que, durante sua rotação e reagindo aerodinamicamente como um aerofólio convencional, gera uma força aerodinâmica resultante de sustentação (C. NELSON, 1944). As hélices são compostas por pás (pelo menos duas) que são interconectadas em uma estrutura central denominada cubo da hélice, a parcela da resultante aerodinâmica decomposta na direção de voo é a denominada tração ou empuxo (do inglês, *thrust*) e a força resultante descomposta no plano de rotação da hélice é a força resistiva, como mostrado na Figura 12 (PINTO; MARTINS; VENSON, 2012).

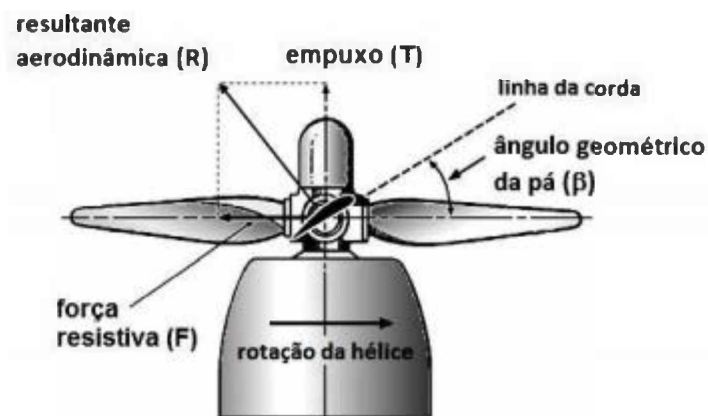


Figura 12- Força Resultante no Aerofólio da Pá de uma Hélice.

Disponível em: (PINTO; MARTINS; VENSON, 2012)

O aerofólio realiza, de maneira combinada, movimento de rotação e de translação. O primeiro em torno do seu eixo e o segundo no sentido do deslocamento da aeronave. Como

mostrado na Figura 13, a resultante dos dois movimentos é a velocidade resultante (V_R) do vento relativo sobre o aerofólio, que depende da velocidade tangencial da pá (V_t) e da velocidade de voo da aeronave (V_o). A velocidade resultante altera o ângulo de ataque do aerofólio (α) em relação ao ângulo β que é o ângulo geométrico da pá. Além disso, existe o ângulo de deslizamento da pá (ϕ) que é ângulo formado entre a velocidade resultante e o plano de rotação da hélice (OST, 2015).

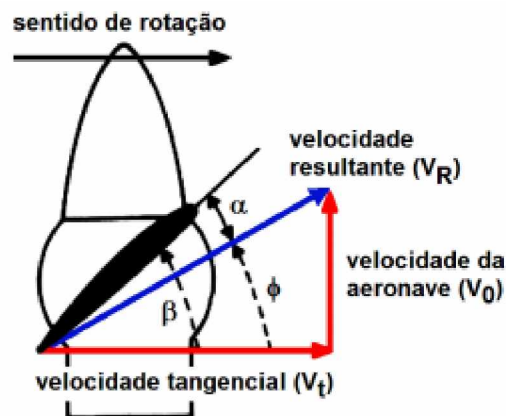


Figura 13- Componentes de Velocidade e Ângulos do Escoamento na Pá.

Disponível em: (PINTO; MARTINS; VENSON, 2012)

O desempenho da hélice e seu rendimento afeta diretamente em todo o desempenho da aeronave, isso porque ela que transforma a potência do eixo em potência de tração. Segundo (GIBIANSKY, 2012), a potência de tração do conjunto moto propulsor pode ser definido como:

$$P_{thrust} = V_h T \quad (6)$$

Onde, assume-se que a velocidade do VANT é baixa, portanto V_h é a velocidade do ar ao pairar, assume-se também que $V_\infty = 0$ (o ar ambiente é considerado em regime estacionário).

$$V_h = \sqrt{\frac{T}{2\rho A_{hélice}}} \quad (7)$$

$$A_{hélice} = \pi R_{hélice}^2 \quad (8)$$

Por fim, por (DRELA, 2006), o rendimento da hélice é dado por:

$$\eta_{hélice} = \frac{P_{thrust}}{P_{eixo}} \quad (9)$$

4. Metodologia

O método proposto por este trabalho pode ser utilizado para a caracterização de qualquer conjunto motopropulsor elétrico presente em um VANT e, além disso, o método consegue integrar os dados experimentais do motor com os dados do modelo numérico de uma bateria LiPo fornecidos pelo (MATHWORKS, 2016) e anteriormente validados por (BRONDANI; SAUSEN; SAUSEN, 2014).

Para a caracterização experimental dos motores elétricos, foi desenvolvida uma bancada de testes que tem seu projeto representado na Figura 14. A bancada é composta por, uma fonte de alimentação elétrica DC, um suporte para o conjunto motopropulsor elétrico, uma célula de carga para medir o empuxo do motor, um tacômetro para medir RPM do motor e todos estes sensores integrados por um circuito que estabelece comunicação com o computador através de uma interface (Figura 15) (SILVA; NETO, 2016). A Figura 16 mostra a bancada montada durante a execução do teste, conforme observado o teste foi realizado em ambiente fechado sem grandes interferências externas, fazendo valer a consideração do regime estacionário para V_{∞} , além disso, para caracterizar a bancada, o trabalho (SILVA; NETO, 2016) realiza uma análise estrutural dos modos de vibrar desta bancada.

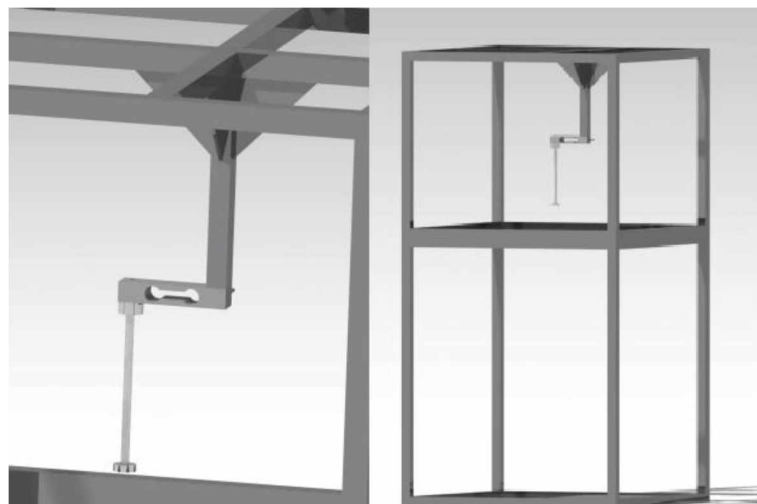


Figura 14- Desenho da bancada de testes.

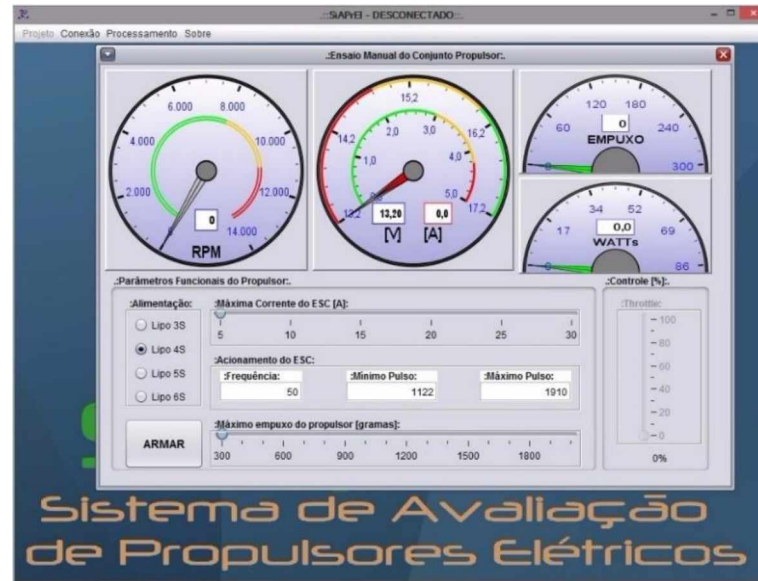


Figura 15- Interface da bancada no computador desenvolvida pelo laboratório SiAPrEI-UFU.



Figura 16- Fotos da bancada de testes.

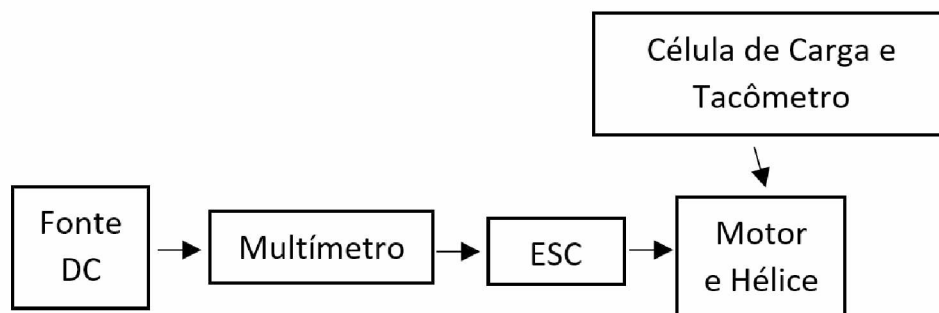


Figura 17- Esquema de montagem da bancada.

Para a coleta dos dados, o usuário define na fonte DC o valor de tensão desejado e, na interface (Figura 15), o usuário define o nível de *throttle*. Como saída a bancada fornece os dados apresentados na Tabela 1 que sumariza os dados coletados ao longo de um ensaio que é realizado para uma tensão fixa.

Tabela 1- Dados extraídos da bancada.

Tensão Fixa						
Throttle [%]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [W]	RPM	Empuxo [g]	Io [A]
(De 0 até 100%)	(Fixa)					Corrente de Carga

Neste sentido, para simular diversas condições da bateria durante o voo, vários ensaios foram realizados variando a tensão de 15 a 17V com um incremento de 0,2V entre cada ensaio. Além disso, em cada bateria de ensaio, o *throttle* variou de 0 a 100% com incrementos de 5%. Os dados obtidos ao longo de cada ensaio (ver Tabela 1) eram coletados e, com o auxílio do programa desenvolvido neste projeto em MATLAB® (Figura 18), estes eram armazenados em planilha Excel® seguindo uma sequência lógica para que os mesmos fossem lidos pelo mesmo programa para visualização dos gráficos como mostrado na Figura 19.

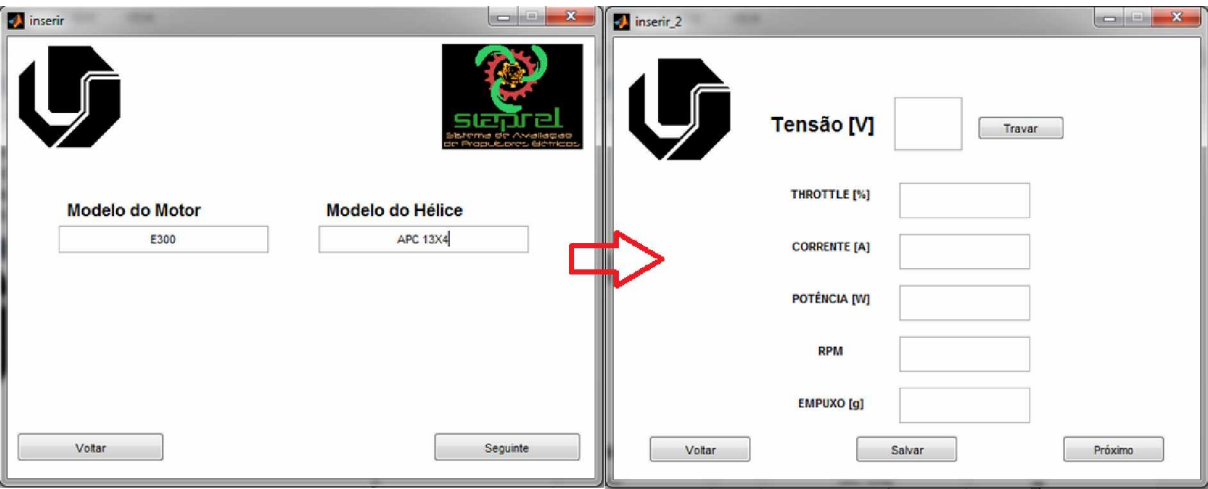


Figura 18- Interface para inserir dados dos ensaios.

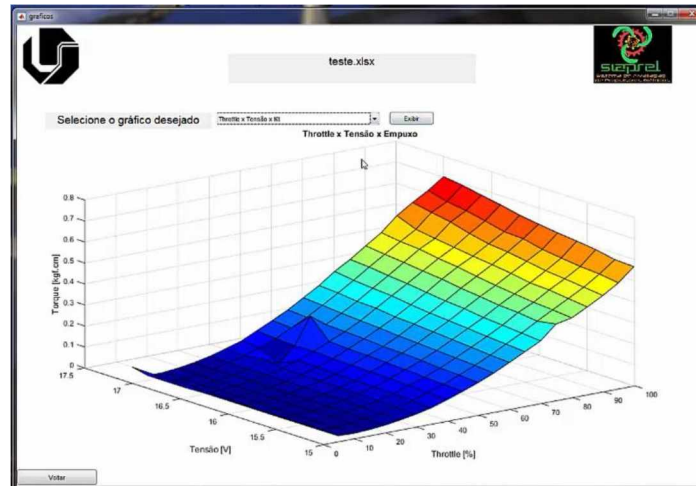


Figura 19- Interface para demonstração de resultados.

Terminada a etapa de coleta de dados, estes serão tratados e analisados a fim de identificar as características de desempenho do conjunto motopropulsor. A partir de (1) encontra-se o torque do motor (Q_m), vale ressaltar que nesta etapa a constante de velocidade do motor (K_v) é definida pelo fabricante. Como foi coletado a velocidade de rotação da hélice Ω , parte-se para (3) definindo a potência mecânica do eixo do motor.

Com isso, tendo os valores de Potência Elétrica (corrigido com o rendimento do ESC) e de potência do eixo, obtêm-se, a partir de (5) o rendimento do motor (η_{motor}). Como visto na Tabela 1, foram coletados os dados de tração/empuxo do conjunto, aplicando estes dados em (6) e (7) consegue-se caracterizar a potência de tração (P_{thrust}) afim de encontrar o rendimento da hélice ($\eta_{hélice}$) em (9).

Para uma melhor identificação dos parâmetros do conjunto motopropulsor, os dados experimentais foram interpolados e novos pontos de medições foram criados. Para visualizar a interpolação realizada, a Figura 20 ilustra uma superfície de resposta com uma malha. Os nós desta malha com os pontos pretos indicam os resultados experimentais, enquanto que os outros nós correspondem aos dados interpolados por média aritmética (ANEXO 2). Esta interpolação foi realizada com todos os dados coletados experimentalmente (ver Tabela 1).

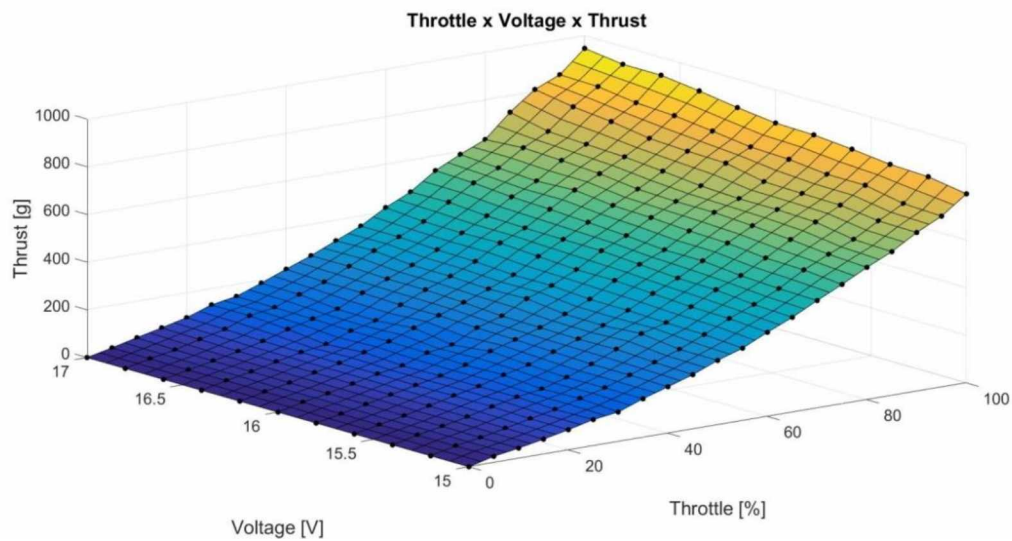


Figura 20- Exemplo de refinamento de matriz.

Para relacionar os dados experimentais do motor com dados teóricos do modelo da bateria é necessário que ambos os dados estejam em matrizes organizadas com a mesma sequência lógica. Com isso, a seguinte etapa é basicamente uma busca de coordenadas nas matrizes refinadas. As matrizes com os dados coletados são organizadas com cada tensão alocada em uma linha e cada nível de *throttle* organizado pelas colunas, como demonstrado no código exibido no ANEXO 1 e ilustrado na Figura 21, já os dados da bateria, após a simulação (Figura 22), foram armazenados no arquivo “bateria.mat” em 3 matrizes, a primeira com os dados de quais correntes foram simuladas na extensão Battery do SIMULINK, outra representando a queda de tensão para cada corrente considerada e, por fim, outra com o tempo em que a bateria simulada esteve em funcionamento, como mostrado na Figura 22.

		Throttle																				
Tensão	Tração	0	26	43	63	85	110	124	162	195	228	270	304	353	398	451	501	555	603	666	717	793
	0	24	41	63	85	107	135	162	198	234	271	315	365	408	455	516	564	609	669	724	819	
	0	24	43	65	90	113	129	160	198	243	291	319	368	422	464	520	580	636	689	755	825	
	0	21	41	65	90	112	142	167	204	240	279	325	378	425	480	537	592	642	692	755	843	
	0	21	43	66	88	110	138	178	209	242	281	326	387	437	480	542	602	642	696	772	837	
	0	24	43	66	90	107	143	159	213	245	300	337	387	448	494	552	602	650	728	778	861	
	0	22	42	67	89	117	145	184	219	256	295	336	396	450	504	557	608	666	732	799	880	
	0	23	43	67	89	105	144	169	217	263	302	347	407	452	513	576	627	680	740	818	904	
	0	22	42	65	90	122	148	172	222	263	303	350	403	457	519	568	637	687	765	826	924	
	0	23	43	69	94	133	150	187	222	270	318	358	405	469	532	577	644	695	781	848	924	
	0	23	48	72	97	133	151	189	230	269	314	358	418	466	538	588	633	730	808	852	945	

Figura 21- Exemplo da matriz que armazena os dados coletados, onde cada tensão [V] está armazenada nas linhas (i) e cada nível de throttle nas colunas (j).

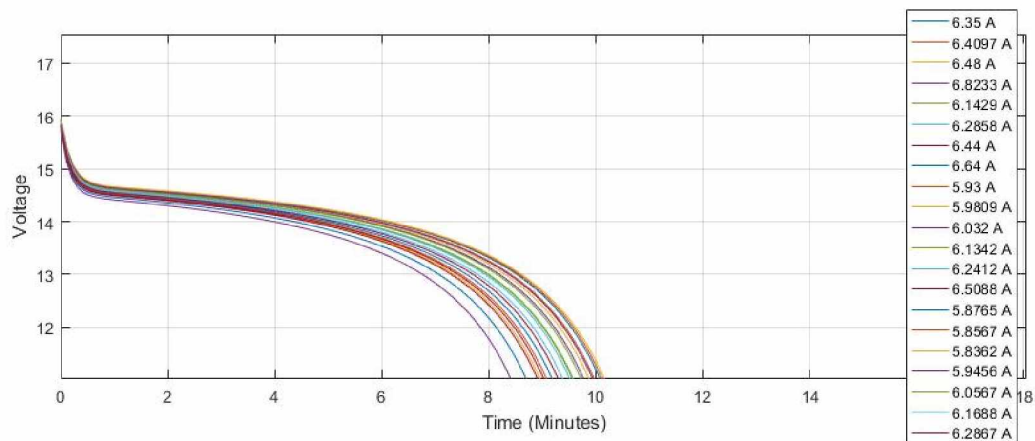


Figura 22- Curvas de descarga de uma bateria LiPo.

Disponível em: (MATHWORKS, 2016)

O método demonstrado neste trabalho consegue encontrar, além dos dados de consumo da bateria, a autonomia e o alcance do VANT para uma dada tração dos motores. Para isso foram feitas as seguintes considerações:

- Para cada empuxo existe uma potência elétrica constante;
- Por se tratar de dados experimentais, não é possível encontrar valores iguais aos desejados nas buscas dentro da matriz e sim aproximações estatísticas deles.

A aproximação estatística em questão foi uma regressão linear entre os dois pontos mais próximos aos desejados. A partir do momento em que os dados foram organizados em matrizes lógicas ($A_{(i,j)}$), para encontrar valores de, por exemplo, correntes consumidas com o empuxo gerado por elas, bastou encontrar a coordenada (i,j) do empuxo em questão na matriz empuxo ($E_{(i,j)}$) e, em seguida, o valor de corrente posicionado nesta coordenada na matriz corrente ($C_{(i,j)}$).

Como dito na primeira consideração, para cada tração existe uma potência elétrica constante que é consumida pelo motor. Como anteriormente explicado, o experimento consistiu em uma série de testes que variou a voltagem da fonte de energia de 0,5 em 0,5 V, então, para cada teste, existe um valor de corrente consumida que gera um dado empuxo. Sabendo que para gerar um empuxo constante, as variáveis tensão e corrente são inversamente proporcionais podemos considerar a sua potência elétrica constante, a Figura 23 mostra graficamente esta consideração e encontra o valor de potência, vale ressaltar que a consideração de potência do

exemplo não é 100% fiel, pois como observado a potência tende a aumentar com o aumento da tensão, isso acontece porque o rendimento do ESC tende a diminuir com o aumento de tensão.

Tendency line of Voltage x Power for a fixed Thrust

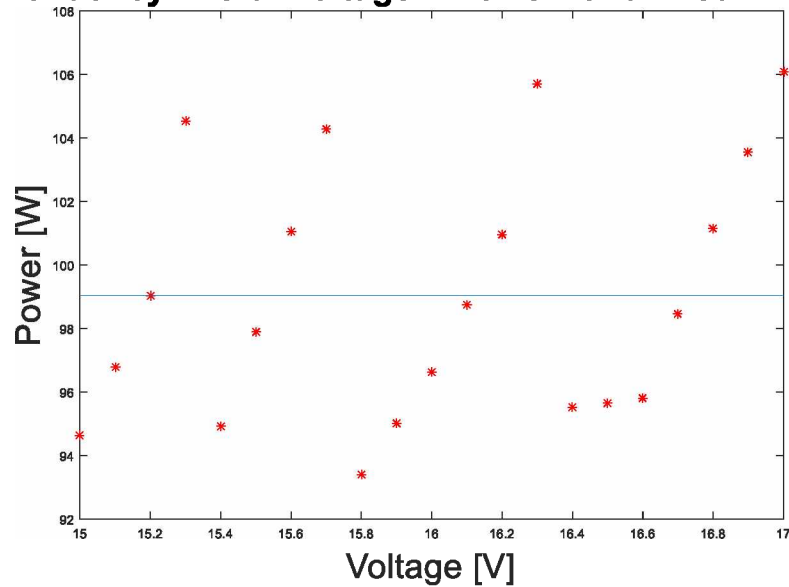


Figura 23- Linha de tendência da Potência considerada para uma tração fixa.

Para encontrar a corrente consumida pelo motor ao gerar um dado empuxo, a tendência considerada para a variação de corrente é uma reta decrescente (pela fórmula $P = IU$), como mostrado na Figura 24.

Tendency line of Voltage x Current for a fixed Thrust

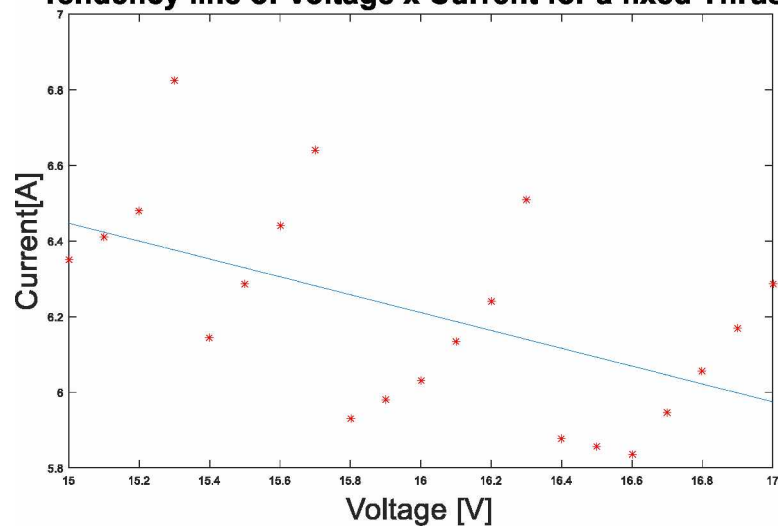


Figura 24- Linha de tendência da corrente considerada para uma tração fixa.

Por fim, a última etapa para encontrar a Autonomia da aeronave para um Empuxo constante é uma varredura entre 4 matrizes (empuxo, tensão, corrente, tempo) ao mesmo tempo. O critério para iniciar a simulação é considerar a corrente inicial como $I = \frac{\text{Tensão Nominal da Bateria}}{\text{Potência Constante}}$ no caso do empuxo de 600g, teríamos $I = 16,8V / 83,98W = 4,99A$ e o critério para finalizar a simulação é encontrar uma tensão menor ou igual a tensão de *Cutoff* da bateria.

O processo de varredura é cíclico, conforme as seguintes etapas:

1. O processo se inicia buscando, na matriz corrente, a coordenada da corrente inicial anteriormente estabelecida (4,99A);
2. Em seguida encontra-se o valor de tensão correspondente;
3. Do valor de tensão encontra-se, na matriz tempo, o tempo correspondente;
4. Com isso se avança uma coluna na matriz tempo e, na matriz tensão, com a última coordenada encontrada na matriz tempo, se estabelece a nova tensão.
5. Encontra-se uma nova corrente a ser analisada pela equação $I=P/U$, com essa nova corrente todo o processo se repete até o critério de parada, encontrando assim a autonomia total da aeronave.

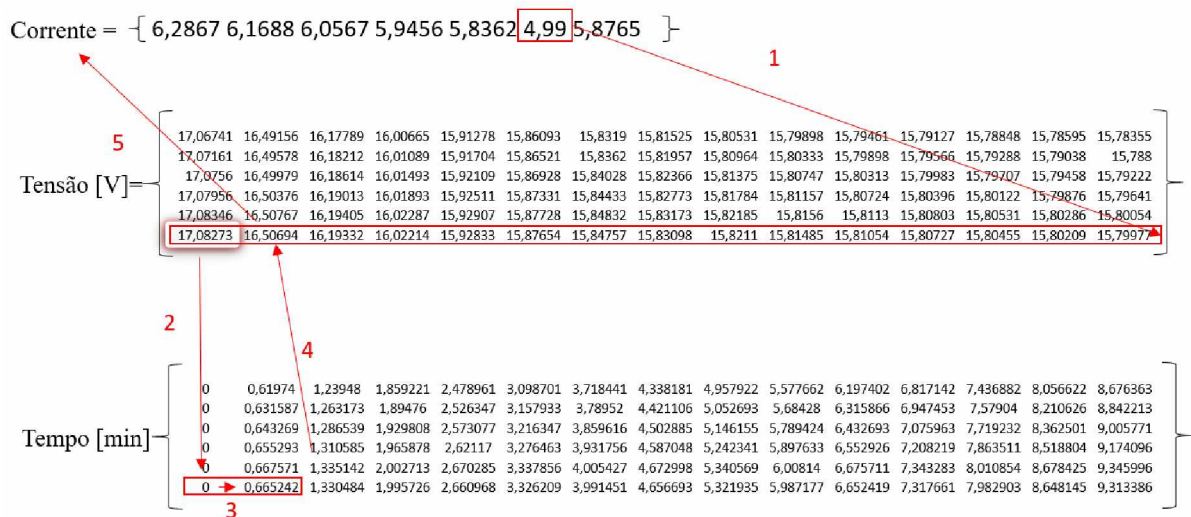


Figura 25- Etapas para encontrar a autonomia.

Então, para encontrar o alcance do VANT, é necessário ter, a partir do método apresentado, a autonomia e, a partir da Figura 26, a velocidade de cruzeiro para um valor estipulado de tração.

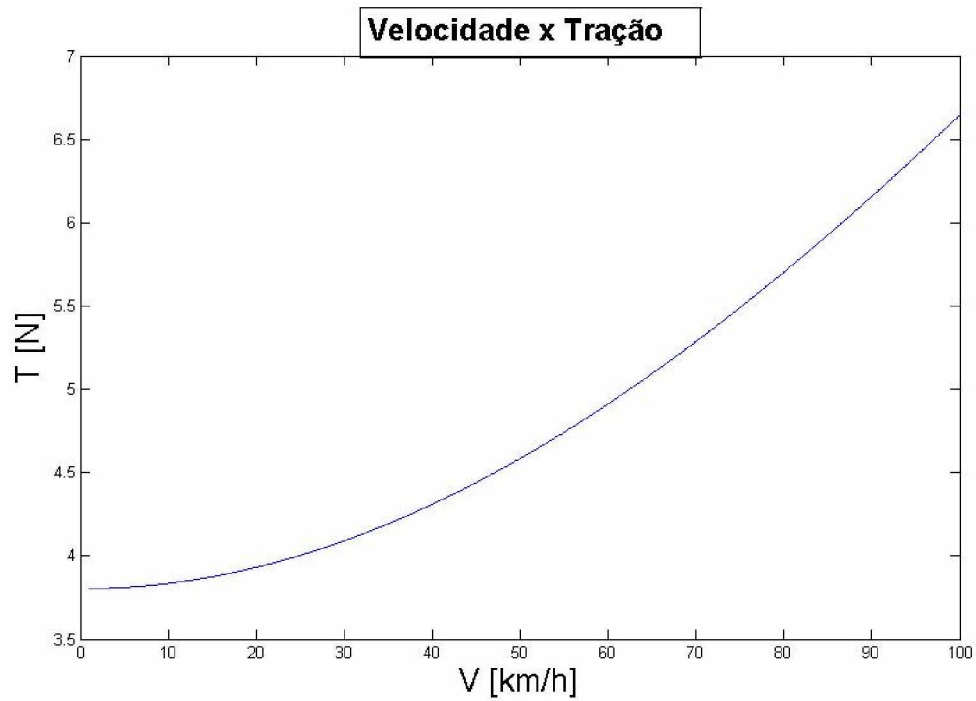


Figura 26- Velocidade x Tração do Hexacóptero F550.

5. Análise de Resultados

O método desenvolvido nas pesquisas foi aplicado ao ensaio de bancada do motor DJI E300 2212 920 K_v com hélices de fábrica e os resultados encontrados serão apresentados a seguir.

5.1. Consumo Elétrico

As primeiras análises foram com relação ao consumo elétrico do conjunto motopropulsor, elas serão feitas a partir de superfícies (x, y, z) onde os valores (x, y) serão nível de *throttle* [%] e de tensão [V] respectivamente. A Figura 27 mostra o consumo de corrente a partir da tensão e do *throttle*, onde, assim como esperado, é diretamente proporcional ao crescimento do *throttle* e ao crescimento da tensão.

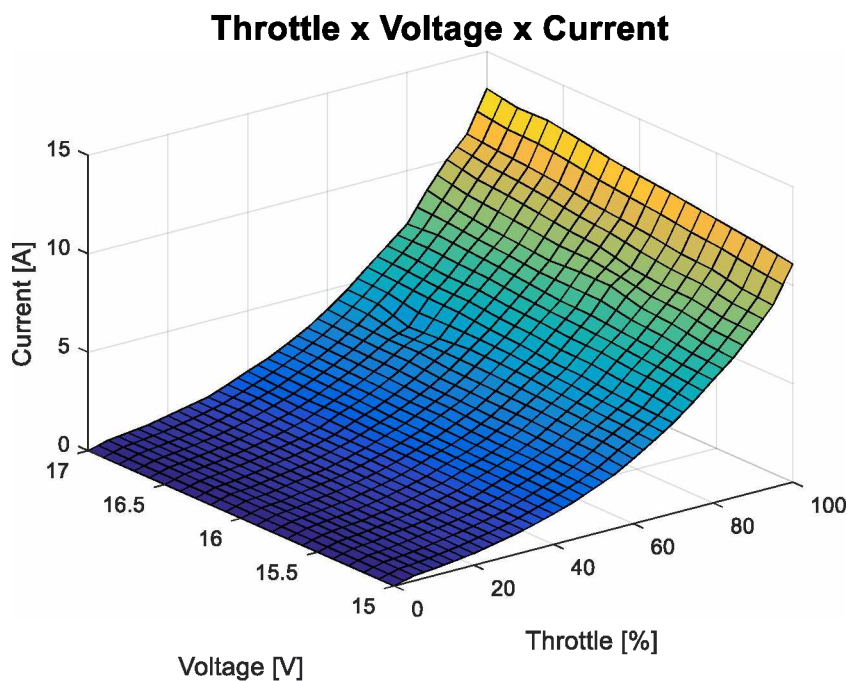


Figura 27- Throttle x Tensão x Corrente

A próxima análise realizada está apresentada na Figura 28, ela mostra a potência elétrica sem considerar o rendimento do ESC, ou seja, a potência elétrica fornecida imediatamente antes

do ESC calculado pela equação $P = i v$. Seu comportamento, assim como esperado é diretamente proporcional à tensão e ao *throttle*.

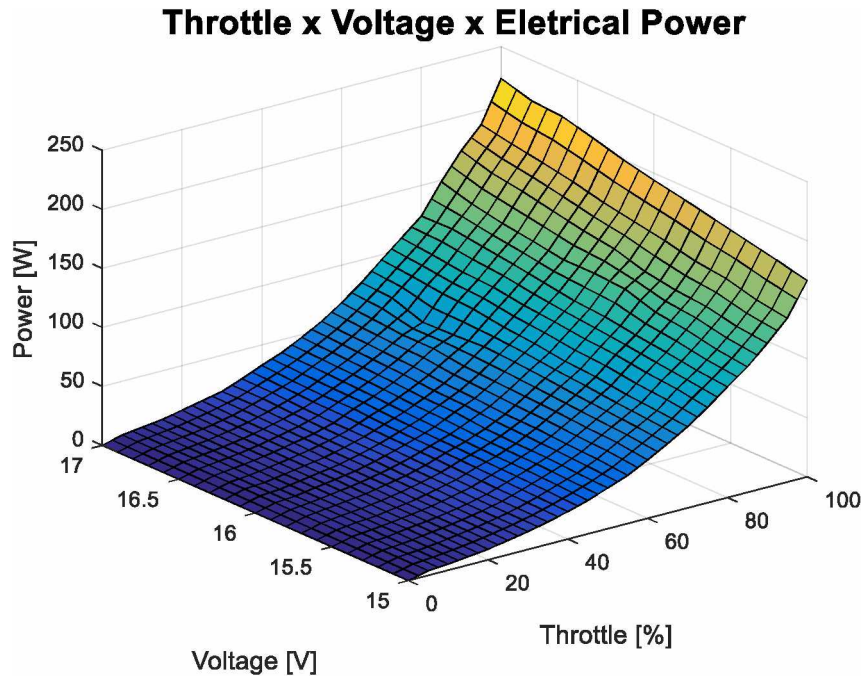


Figura 28- Throttle x Tensão x Potência Elétrica.

Por fim, a última análise de consumo elétrico realizada foi feita com relação ao i_0 (Figura 29). Esse parâmetro é extremamente importante ao se obter o torque por (1). Note que seu valor tem maior influência em valores de *throttle* baixos onde a corrente (i) também é baixa, então, pela resolução do instrumento de medição de i_0 , as análises de P_{elxo} e de $\eta_{hélice}$ são mais fidedignas para valores de *throttle* maiores que 60%. Isso porque, por (3) e (9), estes valores dependem do torque que depende diretamente de i_0 .

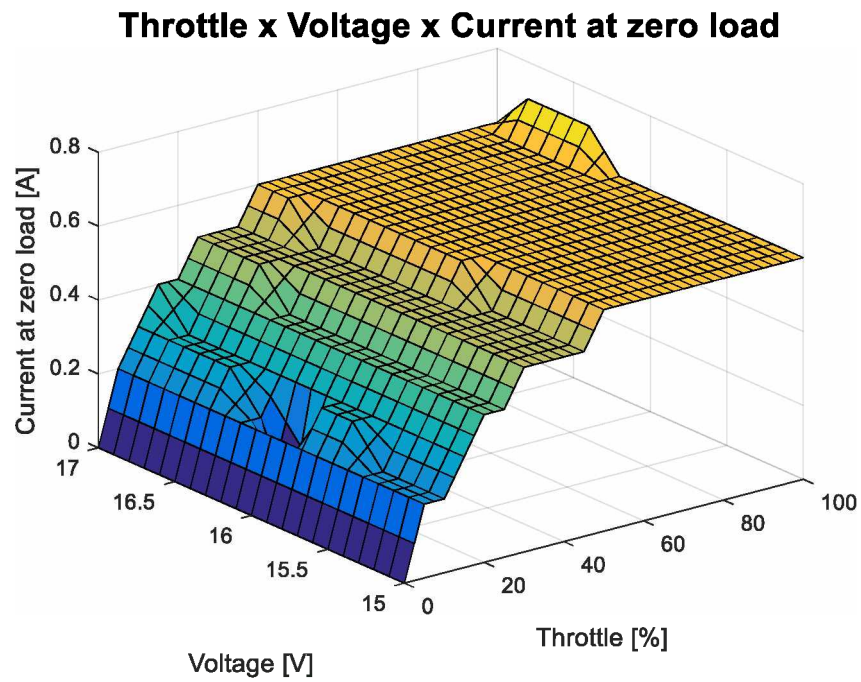


Figura 29- Throttle x Tensão x Corrente no Vazio.

5.2. Desempenho

A Figura 30 mostra a primeira análise de desempenho realizada, como esperado ela mostra a tração do conjunto motopropulsor diretamente proporcional à tensão e ao *throttle*.

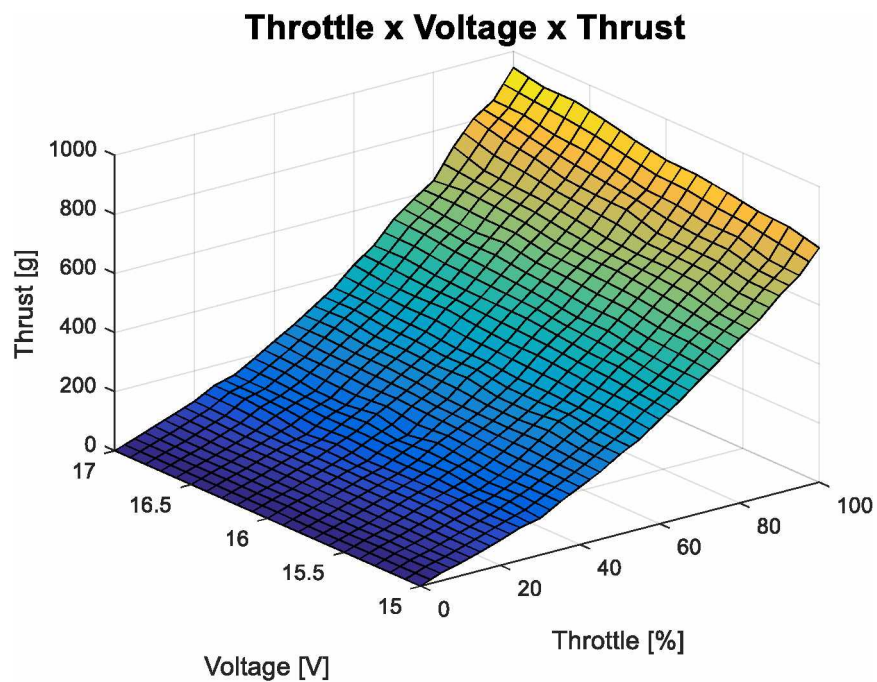


Figura 30- Throttle x Tensão x Empuxo.

Já a Figura 31 mostra a análise realizada com relação ao torque requerido do motor, vale ressaltar que pela consideração realizada ao encontrar a i_0 os valores menos suscetíveis à erros são os valores de torque para níveis de *Throttle* maiores que 60%.

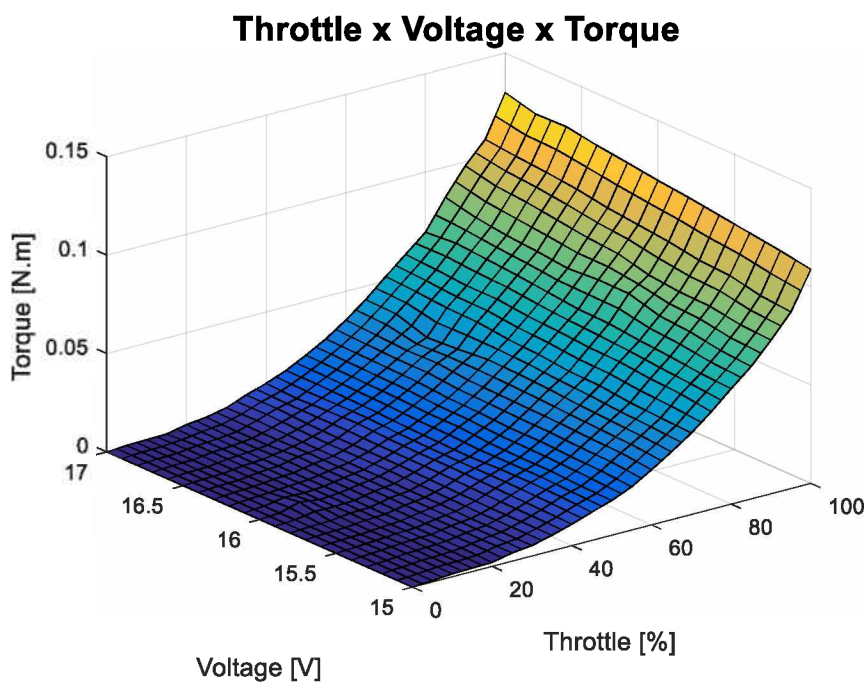


Figura 31- Throttle x Tensão x Torque.

Mais uma vez a alta influência dos valores de i_0 para baixos níveis de *Throttle* (<60%) é percebido, desta vez pode-se perceber, na Figura 32, que a P_{etxo} para só pode ser considerada para níveis de altos níveis de *throttle* isso pela alta inflexão da superfície com relação à estes níveis. Consequentemente os valores de rendimento do motor apresentados na Figura 33 não são fidedignos nessa região.

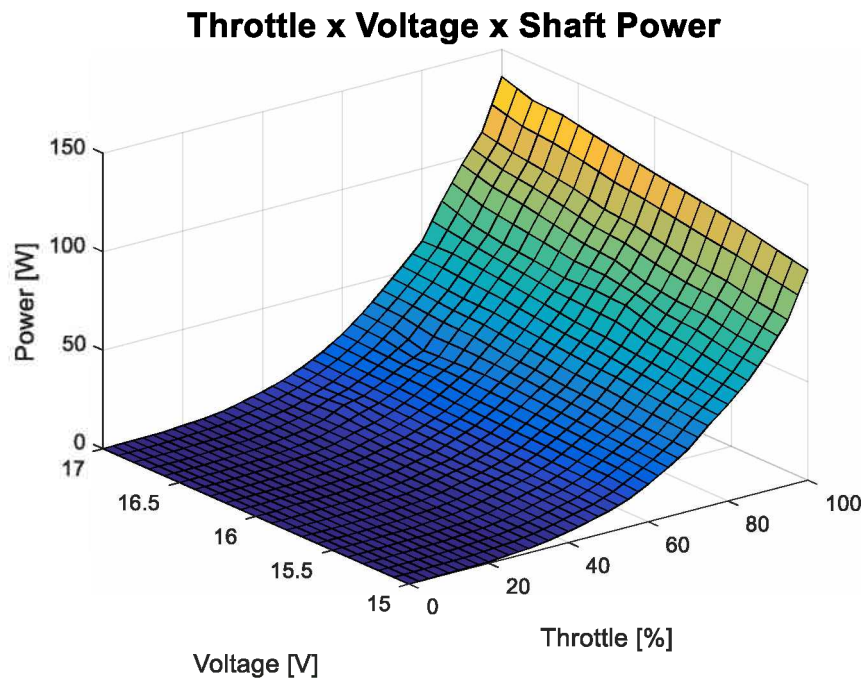


Figura 32 - Throttle x Tensão x Potência do Eixo.

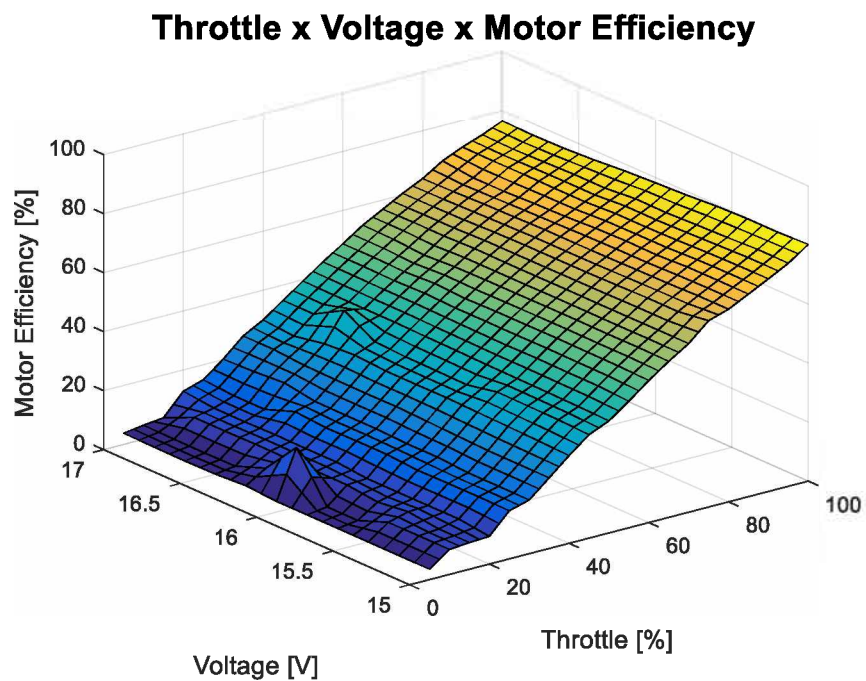


Figura 33- Throttle x Tensão x Rendimento do Motor.

A Figura 34 nos mostra a influência mais instável desse efeito, como visto, para baixos níveis de *throttle* os valores de rendimento da hélice são inconclusivos, por isso a Figura 35

mostra a região onde o rendimento de hélice é plausível e, como esperado, o seu rendimento tende a cair em altas velocidades, devido ao fato de não se tratar de uma hélice de passo variável.

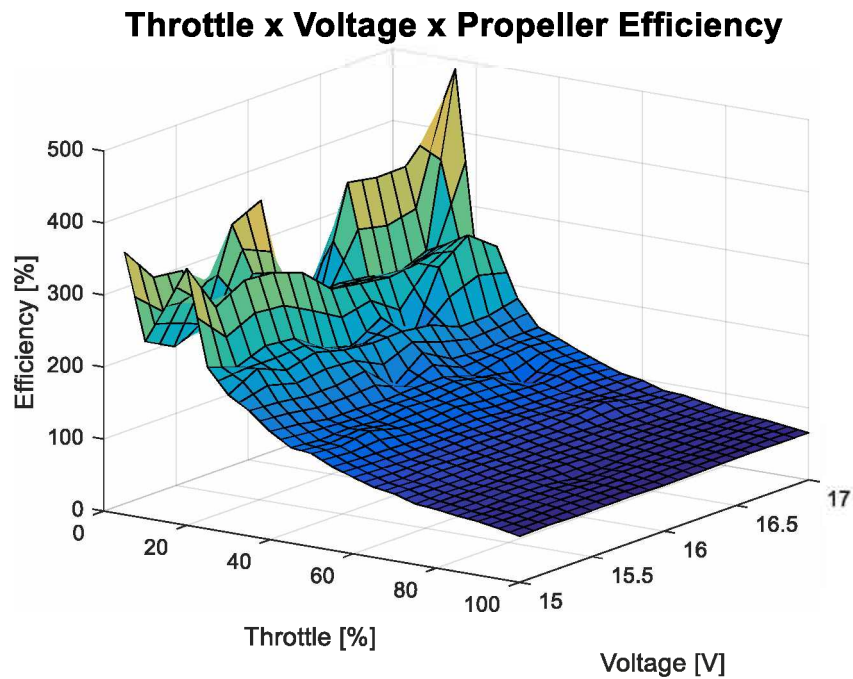


Figura 34- Throttle x Tensão x Rendimento da Hélice.

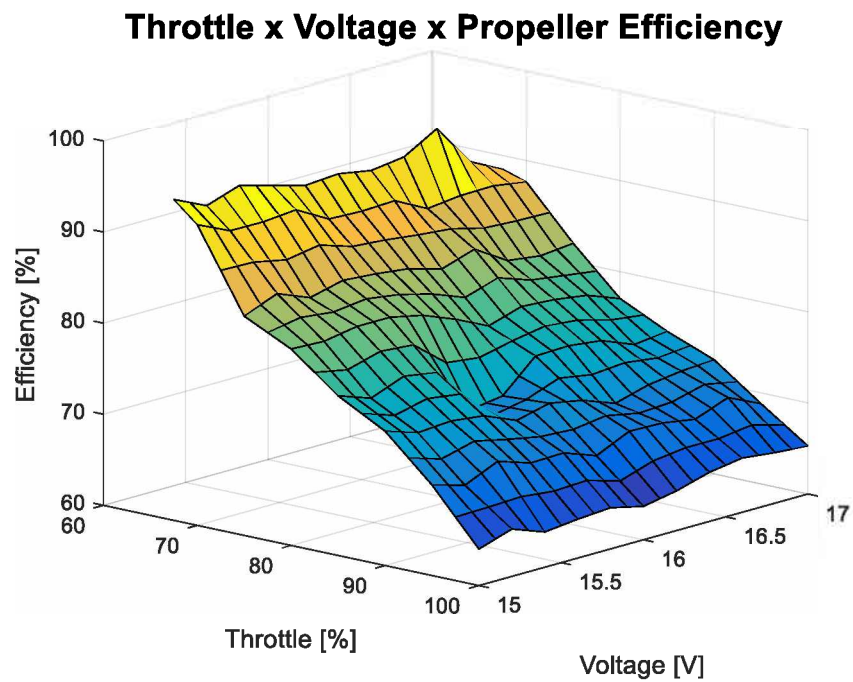


Figura 35 -Throttle x Tensão x Rendimento da Hélice Plausível.

Com a apresentação destes resultados pode-se chegar à conclusão que este método, para a análise de desempenho não é tão eficiente para baixos níveis de *throttle*.

5.3. Autonomia e alcance

Com o método descrito nesse trabalho, obteve-se a Tabela 2 com as autonomias para cada empuxo constante fornecidas pelo teste de bancada com o mesmo motor.

Tabela 2- Autonomias para diferentes valores de Tração.

Tração [g]	Potência [W]	Autonomia [min]	Tração [g]	Potência [W]	Autonomia [min]
520	88,47	9,34	556	97,31	8,67
521	88,72	9,34	557	97,56	8,64
522	88,98	9,34	558	97,82	8,62
523	89,22	9,34	559	98,07	8,59
524	89,47	9,34	560	98,32	8,57
525	89,72	9,33	561	98,58	8,55
526	89,97	9,33	562	98,83	8,53
527	90,22	9,33	563	99,08	8,51
528	90,47	9,32	564	99,33	8,49
529	90,68	9,31	565	99,60	8,46
530	90,89	9,31	566	99,85	8,44
531	91,14	9,30	567	100,11	8,42
532	91,35	9,29	568	100,38	8,40
533	91,59	9,29	569	100,64	8,37

Tração [g]	Potência [W]	Autonomia [min]	Tração [g]	Potência [W]	Autonomia [min]
534	91,83	9,27	570	100,91	8,35
535	92,05	9,26	571	101,16	8,33
536	92,29	9,24	572	101,44	8,31
537	92,53	9,22	573	101,70	8,29
538	92,78	9,19	574	101,95	8,27
539	93,02	9,17	575	102,21	8,25
540	93,27	9,14	576	102,50	8,22
541	93,51	9,12	577	102,76	8,21
542	93,75	9,10	578	103,02	8,19
543	93,97	9,08	579	103,28	8,17
544	94,26	9,05	580	103,57	8,13
545	94,50	9,03	581	103,84	8,10
546	94,75	9,00	582	104,10	8,09
547	95,04	8,97	583	104,36	8,08
548	95,29	8,95	584	104,62	8,07
549	95,54	8,93	585	104,92	8,05
550	95,78	8,91	586	105,16	8,04
551	96,06	8,88	587	105,44	8,02
552	96,31	8,85	588	105,70	8,00
553	96,56	8,83	589	106,01	7,96
554	96,81	8,71	590	106,24	7,93
555	97,06	8,69			

Além disso, a fim de resumir os valores encontrados e ilustrar os resultados da pesquisa, foram gerados os seguintes gráficos. O apresentado na Figura 36 representa as potências médias encontrada (de acordo descrito no método) para cada valor de empuxo, já o apresentado na Figura 37 representa a autonomia total encontrada para cada valor de empuxo e, como esperado, a autonomia é inversamente proporcional ao aumento de tração.

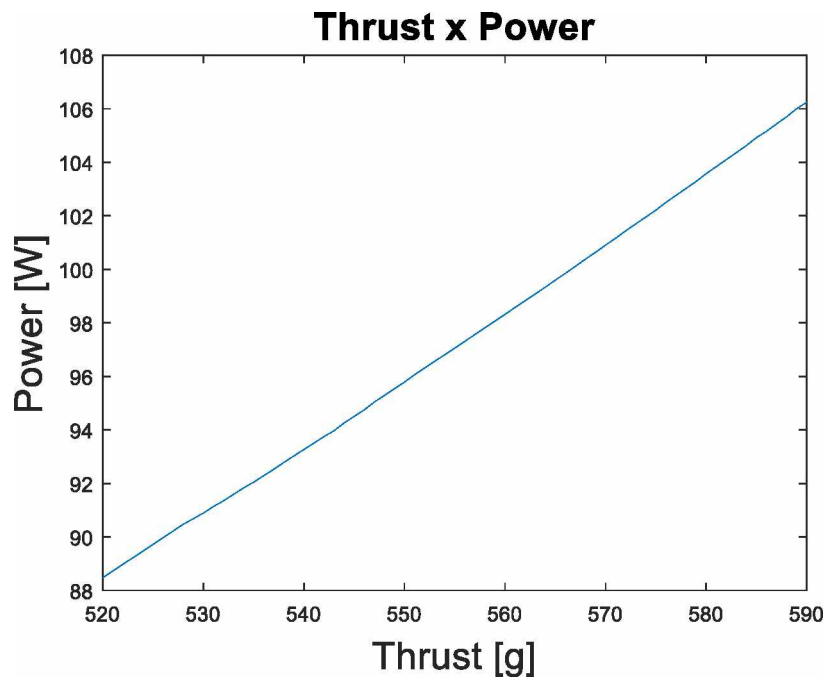


Figura 36- Empuxo x Potência.

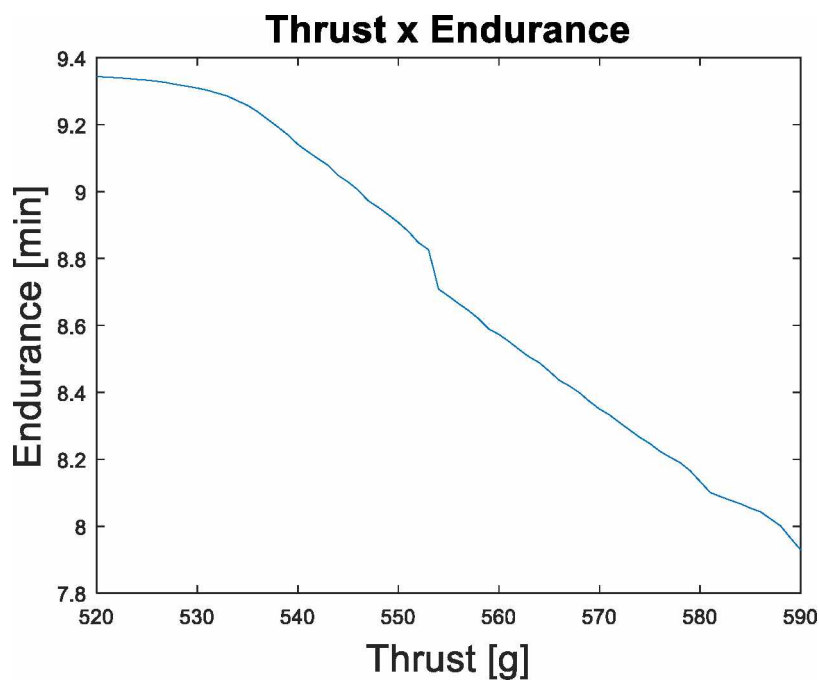


Figura 37- Empuxo x Autonomia Total.

A Figura 38 representa uma superfície com a autonomia instantânea no decorrer do tempo de voo, para cada empuxo. Essa superfície pode ser utilizada para determinar a autonomia de missões mais complexas (quando a tração não é constante), pois com ela é possível determinar em qualquer momento da missão (*Time of Flight*) e para qualquer tração trimada o tempo de voo restante.

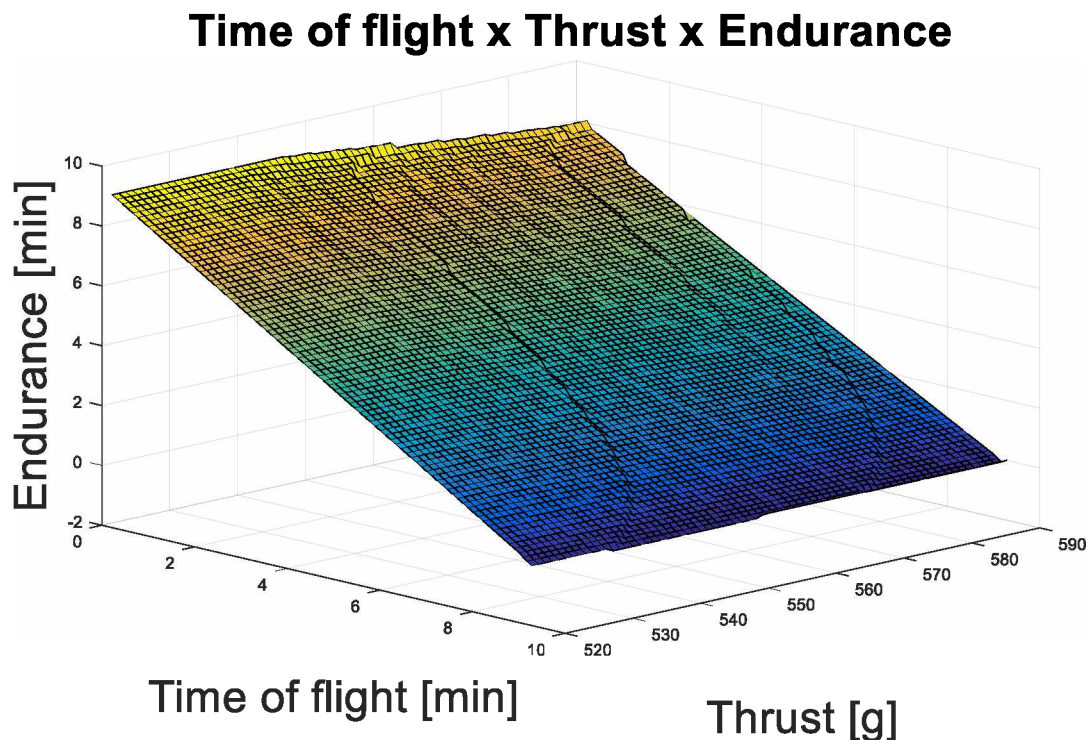


Figura 38- Autonomia instantânea no decorrer do tempo de voo, para cada empuxo.

Com esses gráficos podemos prever a autonomia de voo para diferentes missões e também encontrar qual a melhor configuração de trimagem da aeronave para cada missão, ou seja, qual configuração que irá fornecer o melhor custo benefício para missão.

No decorrer do desenvolvimento do método percebeu-se que ele é efetivo quando a tração estudada estiver em todas as linhas da matriz empuxo, ou seja, quando é possível chegar a dada tração em todos os níveis de tensão coletados. Isso porque, durante o processo de busca de coordenadas para determinar a autonomia do voo, não seria encontrada as trações fora das coletadas.

6. Considerações Finais

O método apresentado neste trabalho apresenta algumas peculiaridades discutidas durante o desenvolvimento do mesmo, porém, com uma rotina de testes automatizadas e implementação destes dados coletados no código até aqui desenvolvido, será possível determinar as características de consumo elétrico e desempenho do conjunto motopropulsor elétrico de qualquer VANT. Além disso, é importante ressaltar que a metodologia descrita neste trabalho é passível de melhorias.

Acredita-se que, a priori, as principais melhorias seriam no aumento de resolução ao coletar os dados de i_0 , possibilitando maior confiabilidade nas análises a baixos níveis de *throttle*. Outra melhoria a ser considerada é a realização dos testes em faixas maiores de tensão e com uma melhor análise estatística na coleta dos dados aumentando a confiabilidade dos dados.

Considerando o elevado grau de complexidade para realizar estas análises analiticamente, onde seria necessário considerar, por exemplo, o campo magnético do motor *brushless* para, a partir da corrente de alimentação, determinar a rotação do mesmo, o método se apresenta muito útil, pois apresenta dados relevantes com um grau de análise menos complexo. Além disso, o método, historicamente falando, integra métodos numéricos de análise de baterias (anteriormente já estudados) com dados experimentais de um dado conjunto motopropulsor elétrico.

7. Referências

BRONDANI, M. DE F.; SAUSEN, A. T. Z. R.; SAUSEN, P. S. APLICAÇÃO DO MODELO ELÉTRICO BATTERY NA PREDIÇÃO DO TEMPO DE VIDA DE BATERIAS DE LÍTIO ÍON POLÍMERO. In: ENCONTRO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL, 17., 2014, Petrópolis/RJ, Brasil. 15-17 out. 2014 p. 1–8.

C. NELSON, W. *Airplane Propeller Principles*, 1944.

COELHO, J. P. C.; SILVA, J. R. M. DA. *Agricultura de Precisão*. Disponível em: <https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30699658/Diapositivos_Agricultura_de_Precisao.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1529548590&Signature=THMbSD4OrLYyItEWSheIVZ5OrYE%3D&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAgricultura>. Acesso em: 15 jun. 2018.

D'OLEIRE-OLTMANN, S. et al. *Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco*. Remote Sensing, v. 4, n. 11, p. 3390–3416, 2012.

DEMOLINARI, H. C. *Projeto De Construção Um Drone Hexacóptero*. p. 13–62, 2016.

DIAS, M. et al. *Motores Síncronos Trifásicos com Ímãs Permanentes* *Technologia*, 2005.

DJI. *FlameWheel 550 User Manual V2.0*. p. 1–9, 2015.

DRELA, M. *DC Motor / Propeller Matching*. n. 6, p. 6, 2005.

DRELA, M. *DC Motor / Propeller Characterization*, 2006. Disponível em: <<https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/systems-labs-06/spl3.pdf>>

FREITAS, D. J. B. *Estudo e Aplicação de Modelos Analíticos na Predição do Tempo de Vida de Baterias Utilizadas em Dispositivos Móveis : Proposição de Extensões aos Modelos Tradicionais* *Estudo e Aplicação de Modelos Analíticos na Predição*, 2015.

GIBIANSKY, A. *Quadcopter Dynamics , Simulation , and Control* *Introduction Quadcopter Dynamics*. p. 1–18, 2012.

INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. DE C. *AGRICULTURA DE PRECISÃO - Resultados de um Novo Olhar*. EMBRAPA ed. São Carlos - SP: [s.n.].

MATHWORKS. *Battery*. Disponível em:

<<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>>. Acesso em: 22

jun. 2018.

MELO, A. S. DE. *Implementação de um Quadrotor como Plataforma de Desenvolvimento para Algoritmos de Controle*. p. 114, 2010.

OST, A. *Modelagem Matemática do Conjunto ESC-Motor-Hélice de um VANT Utilizando Identificação de Sistemas*. p. 123, 2015.

PINTO, P. M. A. F.; MARTINS, C. A.; VENSON, G. G. *Numerical modeling of propeller performance using blade element theory with experimental validation*. 14 Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, p. 3–6, 2012.

SILVA, R. A. DA; NETO, R. M. F. *Bancada de ensaio para motores eletricos de pequeno porte*. [s.l: s.n.].

VINCENT, C. A.; SCROSATI, B. C. H. *Modern Batteries. An Introduction to Electrochemical Power Sources*. 2nd. ed. Burlington: [s.n.].

WOTTRICH, S. C. *Modelagem Matemática do Tempo de Vida de Baterias de Lítio Íon Polímero a partir do Modelo Elétrico para Predizer Runtime e Características V-I* Suelen Cibeli Wottrich *Modelagem Matemática do Tempo de Vida de Baterias de Lítio Íon Polímero a partir do Modelo Elétrico para Predizer Runtime e Características V-I*. 2017.

XIA, C. *Permanent Magnet Brushless Dc Motor Drives and Controls*. [s.l: s.n.].

8. Anexos

8.1. ANEXO 1 – CÓDIGO MATLAB

```

%% ===== CÓDIGO TCC =====
% Autor: Gabriel Araújo Hernández - 11411EAR031
% Orientador: Leonardo Sanches
% Objetivo: A partir de dados coletados de um teste de bancada, analisar
% características de consumo do conjunto motopropulsor e de desempenho do
% mesmo.
%% =====
clear all
close all
clc
format short g
load('Bateria.mat')
%% ===== Coleta de dados do experimento =====
teste_consultado='DADOS TCC';
% Conferir quantas planilhas tem o documento
NumPlanilhas=xlsread(teste_consultado,1,'B1');
% Armazenar os dados da planilha na variável dados
for k=1:NumPlanilhas
    dados(:,k)= xlsread(teste_consultado,k,'A3:G23');
end
%% ===== Legenda dos dados =====
% dados(:,1) = Throttle [%]
% dados(:,2) = Tensão [V]
% dados(:,3) = Corrente [A]
% dados(:,4) = Potência [W]
% dados(:,5) = RPM
% dados(:,6) = Tração [g]
% dados(:,7) = Io
% dados(:,8) = Torque
%% ===== Armazenar dimensões da matriz dados =====
dimDados=size(dados);
NumLinhas=dimDados(1,1);
NumColunas=dimDados(1,2);
%% ===== Distribuiendo os dados para cada variável =====
% Tensão [V]
for k=1:NumPlanilhas
    tensao(k,:)=dados(2,2,k);
end
% Throttle [%]
throttle(1,:)=dados(:,1,1);
% Tração [g]
for k=1:NumPlanilhas
    tracao(k,:)=dados(:,6,k);
end
% Potência [W]
for k=1:NumPlanilhas
    potencia(k,:)=dados(:,4,k);
end
% Corrente [A] - Fiz dessa maneira para ter mais casas decimais
for k=1:NumPlanilhas
    corrente(k,:)=potencia(k,:)./tensao(k);
end
% Corrente vazia
for k=1:NumPlanilhas
    i0(k,:)=dados(:,7,k);
end
% RPM

```

```

for k=1:NumPlanilhas
    rpm(k,:)=dados(:,5,k);
end
potencia=potencia*0.8; % Considerando perdas do ESC.
%% ===== Dados Hélice =====
% Dados geométricos hélice 9.4x4.3"
dHelice=convlength(9.4,'in','m'); % Diâmetro da Hélice [m]
rHelice=dHelice/2; % Raio da Hélice [m]
pHelice=convlength(5,'in','m'); % Passo da Hélice
%% ===== Encontrar Torque =====
kv=920*0.104719755; %rad/s/V - Kv dado pelo fabricante
torque=(corrente-i0)/kv;
%% ===== Potência Mecânica do Eixo =====
% Definindo Potência Mecânica a partir da formula do QDSC, levando em
% consideração as velocidades do veículo são baixas, portanto, vh é a
% velocidade do ar ao pairar.
omega=rpm*0.104719755; % Velocidade angular rad/s
potenciaM=torque.*omega; % Potencia do eixo
%% ===== Rendimento Motor =====
rendimentoMotor=potenciaM./potencia.*100; % Rendimento motor [%]
%% ===== Rendimento Hélice =====
% Definindo densidade do ar a partir da altitude media de Uberlândia (863m)
[~,~,~,rho]=atmosisa(863);
g=9.81; % Gravidade [m/s^2]
tracaoN=tracao*g./1000; % Tração [N]
aHelice=pi*rHelice^2; % Área da Hélice [m^2]
vh=(tracaoN./(2*rho*aHelice)).^(1/2); % Velocidade [m/s]
Ptracao=tracaoN.*vh; % Potencia de tração [W]
nHelice=Ptracao./potenciaM.*100; % Rendimento da Hélice
%% ===== Interpolação dos pontos da matriz =====
% Criei a função que interpola os pontos da matriz de dados, fazendo com
% que ela dobre de tamanho e fique mais visual. Então serão criadas novas
% matrizes de análise para características de desempenho
throttle=0:2.5:100;
tensao=15:0.1:17;
newEmpuxo=refinamento_da_matriz(tracao);
newCorrente=refinamento_da_matriz(corrente);
newPotencia=refinamento_da_matriz(potencia./0.8);
newTorque=refinamento_da_matriz(torque);
newPotenciaM=refinamento_da_matriz(potenciaM);
newRendimentoMotor=refinamento_da_matriz(rendimentoMotor);
newnHelice=refinamento_da_matriz(nHelice);
newI0=refinamento_da_matriz(i0);
%% ===== Autonomia =====
conti=1;
linha =0;
% Vetor TracaoCte para estabelecer o intervalo simulado
for TracaoCte= 515:.1:590
    % Encontrando as coordenadas de valores próximos à Tracaodentro da
    matriz
    % empuxo.
    [Lin,Col]=size(newEmpuxo);
    MatrizDif = newEmpuxo-TracaoCte*ones(Lin,Col);
    MatrizDif=MatrizDif';
    [Lin,Col]=size(MatrizDif);
    for c=1:Col
        for l=1:Lin
            if MatrizDif(l,c)<0
                MatrizDif(l,c)=MatrizDif(l,c)*(-1);
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
    A=min(MatrizDif, [], 1);
    i=1;
    for c=1:Col
        for l=1:Lin
            if MatrizDif(l,c)==A(l,c)
                CordMin(c,:)= [l c]; %VETOR COODENADAS DOS VALORES MINIMOS
                i=i+1;
            end
        end
    end

    % FAZENDO INTERPOLACAO DOS VALORES ENTRE EMPUXO E CORRENTE PARA DAR O
    % VALOR EXATO DE EMPUXO
    [Lin,Col]=size(CordMin);

    for l=1:Lin
        Yl=newCorrente(CordMin(l,2),CordMin(l,1));
        Y0=newCorrente(CordMin(l,2),CordMin(l,1)-1);
        Xl=newEmpuxo(CordMin(l,2),CordMin(l,1));
        X0=newEmpuxo(CordMin(l,2),CordMin(l,1)-1);
        corr(l,1)=-((X0-TracaoCte)/(X0-Xl)*(Y0-Yl))+Y0;
    end
    % Busca da potência para TracaoCte

    [Lin,Col]=size(CordMin);

    for l=1:Lin
        Yl=newPotencia(CordMin(l,2),CordMin(l,1));
        Y0=newPotencia(CordMin(l,2),CordMin(l,1)-1);
        Xl=newEmpuxo(CordMin(l,2),CordMin(l,1));
        X0=newEmpuxo(CordMin(l,2),CordMin(l,1)-1);
        pot(l,1)=-((X0-TracaoCte)/(X0-Xl)*(Y0-Yl))+Y0;
    end
    tendPot=polyfit(tensao,pot,0); %APROXIMACAO DE RETA CONSTANTE
    % Por fim encontrando a autonomia
    CutOffT=15; % Tensao de Cut-Off
    TensaoNom=16.8; % Tensão Nominal da bateria
    % While até chegar no CutOff ou até chegar na carga mínima
    % Corrente de entrada
    startI=tendPot/TensaoNom;

    % ENCONTRANDO AS COORDENADAS DE VALORES PROXIMOS A startI DENTRO DA
    % MATRIZ amper

    [Lin,Col]=size(amper);
    MatrizDif = amper-startI*ones(Lin,Col);
    MatrizDif=MatrizDif';
    [Lin,Col]=size(MatrizDif);
    for c=1:Col
        for l=1:Lin
            if MatrizDif(l,c)<0
                MatrizDif(l,c)=MatrizDif(l,c)*(-1);
            end
        end
    end

    A=min(MatrizDif, [], 1);

    i=1;

```

```

for c=1:Col
    for l=1:Lin
        if MatrizDif(l,c)==A(l,c)
            CordMinI(c,:)= [i l]; %VETOR COORDENADAS DOS VALORES MINIMOS
            i=i+1;
        end
    end
end
% Encontrando Tensão de CutOff
[Lin,Col]=size(voltage_V);
MatrizDif = voltage_V-CutOffT*ones(Lin,Col);
MatrizDif=MatrizDif';
[Lin,Col]=size(MatrizDif);
for c=1:Col
    for l=1:Lin
        if MatrizDif(l,c)<0
            MatrizDif(l,c)=MatrizDif(l,c)*(-1);
        end
    end
end
A=min(MatrizDif,[],1);

i=1;
for c=1:Col
    for l=1:Lin
        if MatrizDif(l,c)==A(l,c)
            CordMinV(c,:)= [i l]; %VETOR COORDENADAS
            i=i+1;
        end
    end
end
tempo=time_min(CordMinI(1,2),2);
colunV=3;
CutOffExp=voltage_V(CordMinI(1,2),CordMinV(CordMinI(1,2),2));
T=voltage_V(CordMinI(1,2),2);
armazena(1)=T;
n=1;
while T>=CutOffT
    T=voltage_V(CordMinI(1,2),colunV);
    armazenar(n+1)=T;
    I=tendPot/T;
    [Lin,Col]=size(ampere);
    MatrizDif = abs(ampere-I*ones(Lin,Col));
    MatrizDif=MatrizDif';
    [Lin,Col]=size(MatrizDif);

    A=min(MatrizDif,[],1);

    i=1;
    for c=1:Col
        for l=1:Lin
            if MatrizDif(l,c)==A
                CordMinI(c,:)= [i l]; %VETOR COORDENADAS DOS VALORES
MINIMOS
                Teste(n,:)= [i l];
                i=i+1;
            end
        end
    end
end

```

```

        tempo=tempo+time_min(CordMinI(1,2),colunV)-
time_min(CordMinI(1,2),colunV-1);
        tempox(n)=time_min(CordMinI(1,2),colunV);
        aut(n)=time_min(CordMinI(1,2),CordMinV(CordMinI(1,2),2))-
time_min(CordMinI(1,2),colunV);
        colunV=colunV+1;
        n=n+1;
    end
    % Autonomia total simulada
    tempo=tempo/6; %6 motores
    disp(tempo);
    % Autonomia instantânea
    tempox=tempox./6;
    aut=aut./6;

    linha=linha+1;
    contador(linha,1)=TracaoCte;
    contador(linha,2)=tendPot;
    contador(linha,3)=tempo;
    Tempox(linha,:)=tempox;
    Aut(linha,:)=aut;
end
%% ===== Plotagem dos dados =====
disp(contador);
figure(1)
surf(Tempox(1,:),contador(:,1),Aut)
title('\fontsize{26}Time of flight x Thrust x Endurance');
xlabel('\fontsize{26}Time of flight [min]');
ylabel('\fontsize{26}Thrust [g]');
zlabel('\fontsize{26}Endurance [min]');
figure(2)
for c=1:linha;
    plot(contador(:,1),contador(:,3));
    title('\fontsize{26}Thrust x Endurance');
    xlabel('\fontsize{26}Thrust [g]');
    ylabel('\fontsize{26}Endurance [min]');
    hold on
end
figure(3)
for c=1:linha;
    plot(contador(:,1),contador(:,2));
    title('\fontsize{26}Thrust x Power');
    xlabel('\fontsize{26}Thrust [g]');
    ylabel('\fontsize{26}Power [W]');
    hold on
end
figure(4)
surf(throttle,tensao,newEmpuxo)
title('\fontsize{16}Throttle x Voltage x Thrust');
xlabel('\fontsize{12}Throttle [%]');
ylabel('\fontsize{12}Voltage [V]');
zlabel('\fontsize{12}Thrust [g]');

figure(5)
surf(throttle,tensao,newTorque)
title('\fontsize{16}Throttle x Voltage x Torque');
xlabel('\fontsize{12}Throttle [%]');
ylabel('\fontsize{12}Voltage [V]');
zlabel('\fontsize{12}Torque [N.m]');

figure(6)

```

```

surf(throttle,tensao,newCorrente)
title('\fontsize{16}Throttle x Voltage x Current');
xlabel('\fontsize{12}Throttle [%]');
ylabel('\fontsize{12}Voltage [V]');
zlabel('\fontsize{12}Current [A]');

figure(7)
surf(throttle,tensao,newPotencia)
title('\fontsize{16}Throttle x Voltage x Eletrical Power');
xlabel('\fontsize{12}Throttle [%]');
ylabel('\fontsize{12}Voltage [V]');
zlabel('\fontsize{12}Power [W]');

figure(8)
surf(throttle,tensao,newPotenciaM)
title('\fontsize{16}Throttle x Voltage x Shaft Power');
xlabel('\fontsize{12}Throttle [%]');
ylabel('\fontsize{12}Voltage [V]');
zlabel('\fontsize{12}Power [W]');

figure(9)
surf(throttle,tensao,newRendimentoMotor)
title('\fontsize{16}Throttle x Voltage x Motor Efficiency');
xlabel('\fontsize{12}Throttle [%]');
ylabel('\fontsize{12}Voltage [V]');
zlabel('\fontsize{12}Motor Efficiency [%]');

figure(10)
surf(throttle,tensao,newnHelice)
title('\fontsize{16}Throttle x Voltage x Propeller Efficiency');
xlabel('\fontsize{12}Throttle [%]');
ylabel('\fontsize{12}Voltage [V]');
zlabel('\fontsize{12}Efficiency [%]');

figure(11)
surf(throttle,tensao,newIO)
title('\fontsize{16}Throttle x Voltage x Current at zero load');
xlabel('\fontsize{12}Throttle [%]');
ylabel('\fontsize{12}Voltage [V]');
zlabel('\fontsize{12}Current at zero load [A]');

% Plot especial para rendimento da Hélice
throttleh=67.5:2.5:100;
newnHeliceh=newnHelice(:,(28:41));
figure (12)
surf(throttleh,tensao,newnHeliceh)
title('\fontsize{16}Throttle x Voltage x Propeller Efficiency');
xlabel('\fontsize{12}Throttle [%]');
ylabel('\fontsize{12}Voltage [V]');
zlabel('\fontsize{12}Efficiency [%]');

```

8.2. ANEXO 2 – FUNÇÃO REFINAMENTO DE MATRIZ

```

function matriz_nova_nova = refinamento_da_matriz(matriz)
[numLinhas,numColunas]=size(matriz);
newNumLinhas=numLinhas*2-1;
newNumColunas=numColunas*2-1;
matriz_nova=ones(numLinhas,newNumColunas);

for l=1:numLinhas
    a=1;
    b=2;
    c=1;
    while c<=newNumColunas
        if mod(c,2)==0
            matriz_nova(l,c)=(matriz(l,a)+matriz(l,b))/2;
            c=c+1;
            a=a+1;
            b=b+1;
        end
        if mod(c,2)~=0
            matriz_nova(l,c)=matriz(l,a);
            c=c+1;
        end
    end
end
matriz=matriz_nova;
for col=1:newNumColunas
    a=1;
    b=2;
    c=1;
    while c<=newNumLinhas
        if mod(c,2)==0

matriz_nova_nova(c,col)=(matriz_nova(a,col)+matriz_nova(b,col))/2;
            c=c+1;
            a=a+1;
            b=b+1;
        end
        if mod(c,2)~=0
            matriz_nova_nova(c,col)=matriz_nova(a,col);
            c=c+1;
        end
    end
end
end

```