

Dimensionamento e arranjo de baterias em um sistema de propulsão aeronáutica e as tendências para o futuro

Hudson Vieira Coutinho* Danilo Azevedo**
Thales A. C. Maia***

* *Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, MG (e-mail: hudsonpericias@gmail.com)*

** *Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, (e-mail: dcrazevedo@gmail.com).*

*** *Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, (e-mail: thalesmaiaufmg@gmail.com)*

Abstract:

The constant evolution of battery technologies, driven by electric cars, has enabled aircraft electrification, as well as hybridization between combustion engines and batteries. However, as weight and performance restrictions have a strong impact on aviation, limiting current developments to short-range and touring aircraft. Seeking to contribute to this niche, an electric aircraft with a maximum weight of 500 kg to break the world speed record was proposed by the Center for Aeronautical Studies CEA / UFMG. This work proposes to dimension the energy storage for the aircraft based on the current development scenario and trends for the sector. The battery choice will be made based on the specific energies and powers of each technology to meet the need for the electric plane's flight plan.

Resumo: A constante evolução das tecnologias de baterias, impulsionadas pelos carros elétricos, vem tornando possível a eletrificação de aeronaves, bem como a hibridização entre motores a combustão e baterias. No entanto, as restrições de peso e desempenho têm forte impacto na aviação, limitando os desenvolvimentos atuais a aeronaves de turismo e curto alcance. Buscando contribuir para este nicho, uma aeronave elétrica com peso máximo de 500 kg para quebra do recorde mundial de velocidade foi proposta pelo Centro de Estudos Aeronáuticos CEA/UFMG. O presente trabalho trata do dimensionamento do armazenamento de energia para a aeronave com base no cenário atual de desenvolvimento e tendências para o setor. A escolha da bateria será feita com base nas energias e potências específicas de cada tecnologia para atender a necessidade do plano de voo do avião elétrico.

Keywords: battery, energy storage, aircraft electrification

Palavras-chaves: baterias, armazenamento de energia, eletrificação de aeronaves

1. INTRODUÇÃO

A eletrificação de aeronaves tem sido tema recorrente nos mais diversos meios de divulgação. A recente evolução das baterias através de pesquisas e investimentos tornam viável a eletrificação de aeronaves.

A utilização de motores elétricos na aeronáutica data de 1973, com o voo da aeronave Militky Brditschka MB-E1, originalmente derivada da Brditschka HB-3, foi reconhecida oficialmente como a primeira aeronave elétrica. Esse reconhecimento surgiu a partir de um voo de 15 minutos utilizando um motor Bosch de 10 kW e baterias Varta de Ni-Cd, contrariando as expectativas trazidas em função do peso excessivo das baterias (Hepperle, 2012).

A corrida pela eletrificação ocorre em função de suas vantagens. Para aeronaves de pequeno porte, a redução nos custos de manutenção é a mais significativa. A redução no número de partes móveis mecânicas reduz o custo global

de inspeção. Além disso, a probabilidade de falha reduz consideravelmente. Podemos traduzir essas vantagens em custo e segurança, sendo um grande motivador para escolas de voo. Em aeronaves comerciais de linha aérea, Ploetner (2013) faz uma estimativa do custo do ciclo de vida para um conceito de aeronave elétrica de transporte regional e compara com o Boeing 787-3+. Todos os custos que independem da propulsão elétrica, permanecem elevados, sendo estes o do aeroporto e treinamento. Contudo, ao avaliar o ciclo de vida, a diferença é considerável.

Além dos aspectos financeiros, diversos são os benefícios das aeronaves totalmente elétricas para a redução de emissões. Choma and Ugaya (2017) fazem uma análise do ciclo de vida dos combustíveis dos transportes leves, mostrando que a matriz energética, majoritariamente, renovável, no Brasil as baterias promovem uma redução nas emissões. O que não ocorre em países onde a matriz

energética é baseada em combustíveis fósseis, esse ganho pode ser comprometido.

Na segurança, Courtin and Hansman (2018) analisam as aeronaves elétricas de mobilidade urbana, ramo para o qual a indústria tem direcionado massivos investimentos, e mostram que ainda que os motores elétricos tenham reconhecida confiabilidade, a incerteza associada à durabilidade das baterias e problemas de gerenciamento térmico podem ser catastróficos, elevando o grau de risco deste tipo de motorização.

A adaptação de motores utilizados em automóveis é frequente e já se entende que esta estratégia pode posicionar o sistema fora do seu ponto de projeto, criando aeronaves menos eficientes aerodinamicamente devido ao excesso de arrasto de coleta, provocado na tentativa de baixar a temperatura do sistema de propulsão.

Outro problema é a grande diferença entre o regime de cruzeiro, ponto para o qual a maioria dos projetos é elaborado, e a fase de decolagem e arremetida. Nestes momentos os motores trabalham em sobrecarga e a demanda por potência e taxa de descarga se eleva, principalmente na arremetida. Estas fases do voo são críticas no que diz respeito a segurança por não haver altitude suficiente para planeio em caso de falha do motor.

Esse trabalho apresenta alguns tipos de armazenadores de energia presentes no mercado, assim como um dimensionamento do armazenador de energia do avião elétrico que foi projetado pelo centro de estudos aeronáuticos da UFMG.

2. SISTEMAS ARMAZENADORES DE ENERGIA

O armazenamento de energia é fundamental quando há a necessidade de usar energia com a indisponibilidade de sua geração. Os aviões e automóveis convencionais utilizam a alta energia específica dos combustíveis fósseis como Diesel e gasolina, em torno de 12 kWh/kg (Huggins, 2010) em conjunto com motores a combustão e nos fornece alta potência específica, já as baterias, geralmente são utilizadas nos sistemas auxiliares como para partida dos motores, sistema auxiliar de potência e backup de emergência de energia para equipamentos essenciais do avião (Vutetakis, 2009).

Duas características muito importantes para a escolha da tecnologia a ser utilizada em um sistema embarcado são a energia específica, a razão entre a energia armazenada pela massa, e a potência específica, dado pela razão da potência que o armazenador pode fornecer por sua massa. O gráfico de Ragone relaciona essas duas propriedades no plano, como na figura 1.

2.1 Baterias

Nas baterias, a energia é armazenada através de reações químicas quando os componentes químicos passam de um estado de baixa energia para um estado de maior energia utilizando a energia elétrica, de forma reversa, os componentes químicos cedem energia e reduzem seu nível de energia (Besenhard, 1999). A bateria é composta por dois eletrodos metálicos, o anodo e o catodo, e um meio chamado de solução eletrolítica, conforme a figura 2. O anodo possui um metal com mais facilidade em

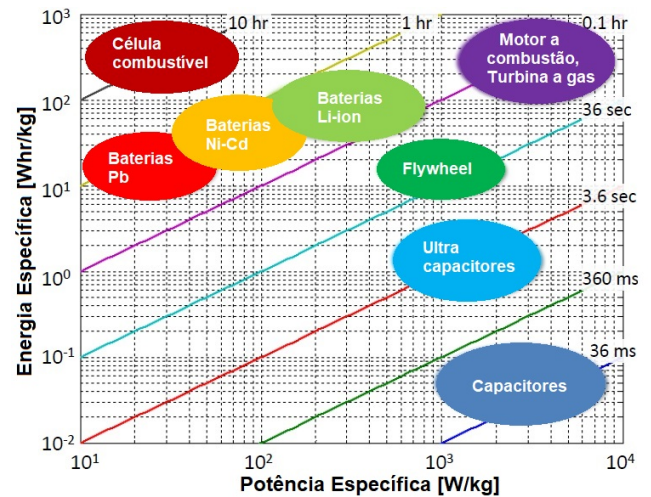


Figura 1. Gráfico de Ragone para algumas tecnologias de armazenamento de energia, adaptado de Moura et al. (2010)

perder elétrons do que o catodo e quando os eletrodos são conectados externamente por um condutor, há um fluxo de elétrons do anodo para o catodo. Ao ceder elétrons, o anodo começa a dissolver o metal A no meio eletrolítico, caracterizando um processo de corrosão, já o catodo começa a depositar o metal B. A corrente cessa quando o metal B é completamente dissolvido ou quando todos os íons do metal B são depositados.

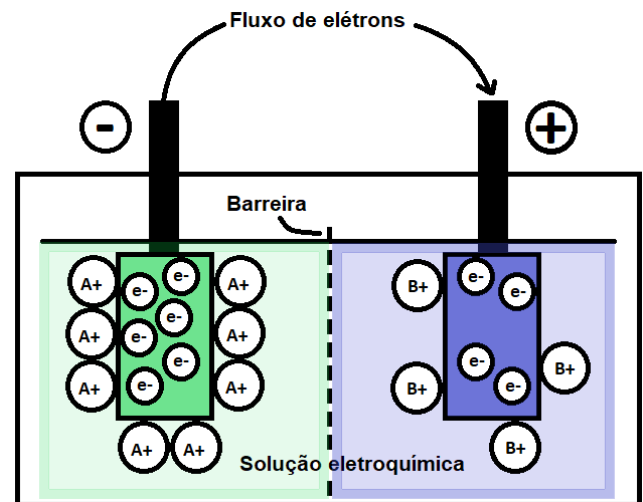


Figura 2. Célula eletroquímica, adaptado de Besenhard (1999)

O tipo de metal dos eletrodos em conjunto com o eletrólito escolhido definem as características da bateria como corrente de operação, capacidade de armazenamento, tensão nominal da célula e até a temperatura de operação. A seguir alguns tipos de bateria serão apresentados.

Chumbo ácido Os eletrodos são feitos de metal e óxido de chumbo, e uma solução diluída de ácido sulfúrico atua como eletrólito. É amplamente utilizada devido ao seu baixo custo, seu material é reciclável e sua tecnologia de operação é bastante conhecida (Stevenson, 2009). Apesar de possuir baixa taxa de auto-descarga, alta confiabilidade

e eficiência, tem baixo desempenho em temperatura baixa e perda de vida útil em temperaturas altas, além de não poderem ser completamente descarregadas (PowerThru, 2016). Possui energia específica de 25-35 Wh/kg e potência específica em torno de 150 W/kg (Besenhard, 1999), mas quando carregada, pode fornecer uma corrente de pico de até 10 vezes sua corrente nominal, caracterizando uma boa potência específica (Rufer, 2018).

Bateria de Níquel As baterias a base de níquel empregam esse elemento como principal material constituinte do eletrodo positivo, o primeiro tipo de bateria a base de níquel foi a bateria de níquel cádmio, cujas principais características são: grande quantidade de ciclos, rápido carregamento, alta performance em baixa temperatura, baixa taxa de auto-descarga (Crompton, 2000). São mais caras do que as baterias de Chumbo ácido e possuem energia específica em torno de 25 Wh/kg (Crompton, 2000).

Bateria de Lítio A bateria de lítio é um dos elementos mais eletropositivos e mais leves da tabela periódica, seguidos apenas do hélio e do hidrogênio, sendo então um material de baixa densidade, produzindo baterias mais leves. Na bateria, os íons de lítio são transportados pelo eletrólito, que é feito a base de sais de lítio em solventes orgânicos por ser muito reativo com a água (Rufer, 2018). O anodo, composto por lítio metálico, fornece o íon de lítio pelo eletrólito fornecendo uma carga negativa para o circuito externo. O anodo metálico pode ser substituído por outros materiais com facilidade de ceder lítio, como exemplo o grafite enriquecido com lítio (LiC_6). Possuem alta eficiência de recarga, densidades de energia e potência altas, 80-120 Wh/kg e 500-800 W/kg respectivamente (Besenhard, 1999), baixa taxa de auto-descarga, número elevado de ciclos e sem efeito de memória (Miao et al., 2019). Em função de todas essas vantagens, a tecnologia é mais promissora em mobilidade e praticamente domina os portáteis. A temperatura afeta significativamente o funcionamento da bateria, sendo importante um rigoroso controle de temperatura durante sua carga, evitando sobreaquecimento e risco de explosão.

Bateria a base de Sódio Também conhecida como bateria de sal fundido, elas utilizam o íon de sódio como transporte de carga no eletrólito. O enxofre de sódio é conhecido por sua alta densidade de energia, chegando até 760 Wh/kg, alta eficiência, materiais de baixo custo e alto ciclo de vida. Sua principal desvantagem é a necessidade de alta temperatura de operação, em torno de 350°C, para manter o sódio no estado líquido (Rufer, 2018), sendo assim, parte da energia armazenada é utilizada para manter a temperatura de operação, tornando uma desvantagem, pois assim sua taxa de auto-descarga global torna-se alta.

2.2 Célula combustível

A energia é proveniente da oxidação química de um combustível, geralmente hidrogênio ou etanol, na presença de um agente oxidante, como o oxigênio presente no ar. O princípio de funcionamento basicamente igual ao das baterias eletroquímicas, porém o fornecimento dos agentes redutores e oxidantes é contínuo, o que garante um maior tempo de funcionamento, limitado pela capacidade de armazenamento do combustível. Conforme a figura 1,

possuem alta energia específica, porém baixa potência de saída devido a lentidão das reações químicas. Seu custo ainda é alto se comparado a outras tecnologias (Ali and Salman, 2006)

Bateria de fluxo Existem dois eletrólitos nesse tipo de bateria, um positivo e um negativo, separados por uma membrana que permeia íons. Esses eletrólitos contêm materiais eletroativos os quais são bombeados para uma célula eletroquímica, onde ocorre a troca iônica pela membrana e o desprendimento de elétrons no anodo, conforme exemplificado na figura 3. Possui longa vida útil, pois os eletrólitos são separados em tanques distintos, ocorrendo degradação somente na membrana, o que é praticamente nulo, por isso essa tecnologia tem boa vida útil. É versátil quanto à capacidade de armazenamento, pois é relacionado basicamente ao tamanho do reservatório dos eletrólitos, tem uma operação segura com temperatura ambiente e produtos que não são inflamáveis, sua descarga pode ser completa sem nenhum dano, tem baixo custo de manutenção e custo de implementação mais baixo que baterias de lítio (Gonzalez, 2016). Apesar de sua energia específica variar entre 70-90 Wh/kg, dependendo da densidade do tipo dos fluidos utilizados (Smith, 2000), sua capacidade de armazenamento pode ser ampliada pelo tamanho dos tanques, assim como sua potência pode variar de acordo com o tamanho da membrana e quantidade de membranas, o que é um limitante devido ao alto custo das membranas (Barnes and Levine, 2011).

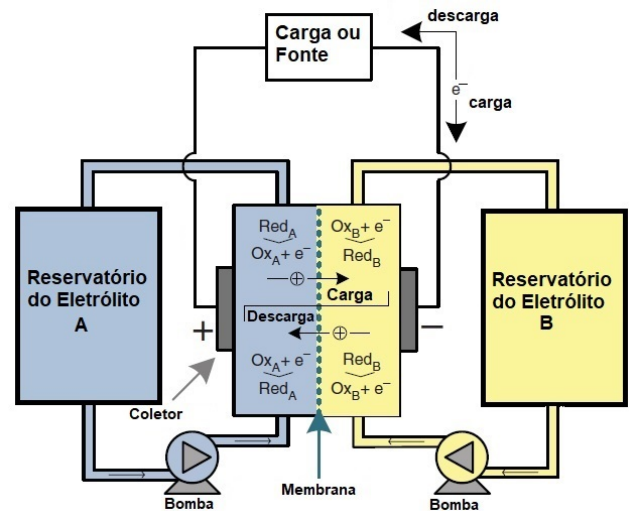


Figura 3. Esquemático de uma bateria de fluxo, adaptado de Gonzalez (2016)

2.3 Supercapacitores

Possuem uma capacitância muito maior do que os capacitores convencionais, alta densidade de potência por permitirem alta corrente, porém baixa densidade de energia se comparado com as baterias (González et al., 2016). Possuem rápida resposta dinâmica, tornando atraente sua hibridização com baterias, como exemplo em fontes intermitentes de energia (UPS) e no-breaks. Devido a capacidade de fornecer alta corrente e potência, os supercapacitores absorvem os picos de demanda poupando a bateria de

trabalhar com correntes altas de descarga, reduzindo seu estresse como apresentado por Lahyani et al. (2013).

2.4 Volantes de inércia

É composto por um disco girante acoplado a um motor elétrico. A energia é armazenada quando o motor faz o disco girar e extraída quando a inércia do disco faz o rotor do motor girar. A energia armazenada é dada pela (1), onde J é o momento de inércia do disco e ω a sua velocidade angular. Possui eficiência energética variando de 85% a 90%, longa vida útil e alta taxa de descarga (Gonzalez, 2016). Sua limitação é a rigidez mecânica do disco e os atritos envolvidos. Estudos pela NASA já foram feitos para utilizar o volante de inércia em estações espaciais, substituindo sensores de altitude como o volante de reação, e complementando bancos de baterias (NASA, 2015).

$$E = \frac{J\omega^2}{2} \quad (1)$$

3. ARMAZENADORES EMBARCADOS

Atualmente, as baterias mais utilizadas em aeronaves são aquelas baseadas em íons de Lítio, cenário igual ao relatado por Hepperle (2012). São exemplos disso, as aeronaves Siemens-FlyEco Magnus e-Fusion, atual detentora do recorde mundial de velocidade (Sonex Electric Sports Aircraft, Pipistrel Taurus Electro e Electro G2), Eviation Alice, que utiliza baterias de Alumínio-ar com um suporte de baterias de íons de Lítio, e a nacional Sora-E. Importante ressaltar a primeira homologação de uma aeronave elétrica foi a aeronave Pipistrel Velis que usa baterias de lítio. A certificação foi realizada pela Agência de Segurança da Aviação da União Europeia (EASA) em 18 de maio de 2020 (Pipistrel, 2020).

O surgimento de novas tecnologias tem gerado confiança no setor aeronáutico. A promessa de aumento da densidade de energia das tecnologias de Lítio-Enxofre e Zinco-Ar, ainda que com limitações de taxa de descarga têm incentivado grandes empresas a investir no tema. A EMBRAER, juntamente com a WEG e com a Oxis-Energy (Energy, 2018), fabricante de baterias de Lítio-Enxofre, desenvolveu um demonstrador elétrico usando a plataforma do Embraer 203 Ipanema (Embraer, 2019). A Rolls-Royce também investiu no projeto Electro-Flight e tem desenvolvido seu protótipo utilizando a plataforma da aeronave Nemesis para tentar quebrar o recorde de velocidade de aeronaves elétricas (Rolls-Royce, 2019).

Roof et al. (2013) apresentam um comparativo entre as tecnologias de baterias e a equivalente densidade de energia da gasolina, apresentado na Figura 4. Hepperle (2012) fez um prospecto de desenvolvimento das diferentes tecnologias, como mostrado na Figura 5.

Ainda que teoricamente possível, não é necessário atingir a densidade de energia da gasolina para que o combustível seja substituído, mas espera-se que ao longo dos anos as baterias desenvolvidas caminhem na direção dos motores a combustão, com alta potência e energia específicas. Investimentos vêm sendo aplicados para a melhoria de

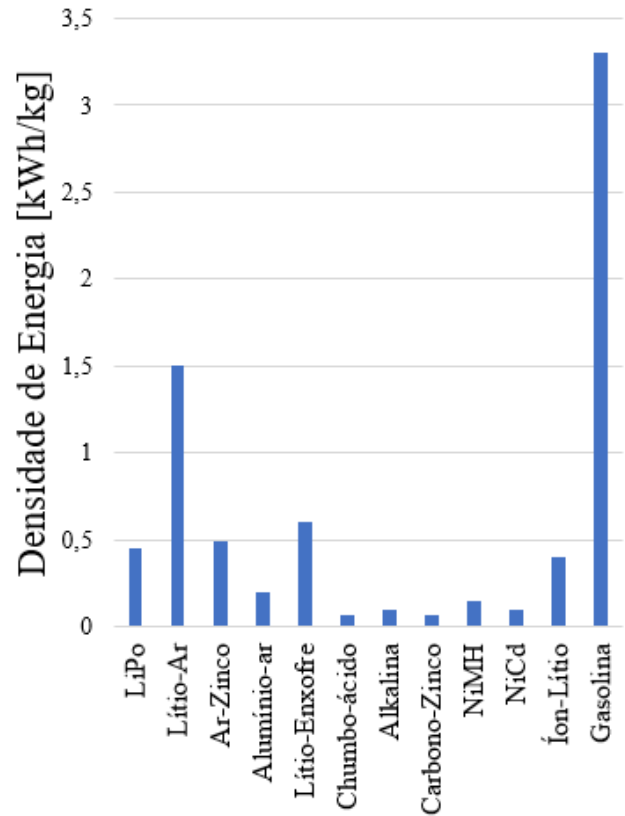


Figura 4. Densidade de energia de diversas tecnologias (Roof et al., 2013)

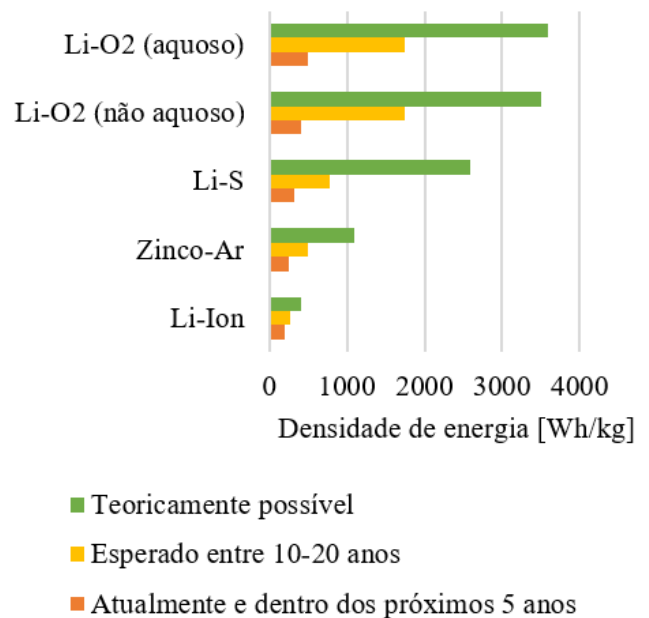


Figura 5. Expectativa de desenvolvimento das baterias, adaptado de Hepperle (2012)

baterias de Lítio com expectativas de densidade energética de 400-500 Wh/kg para aplicação em carros elétricos (Misra, 2018), que em paralelo poderão ser utilizados em aviões elétricos. Enquanto isso, muitos estudos vêm sendo feito para melhorar a estabilidade energética de aviões comerciais com a hibridização de baterias e motores a

combustão como os trabalhos de Wang et al. (2020) e propulsão híbrida de Fugaro et al. (2018).

A densidade de energia entra no projeto da aeronave, como proposto por Hepperle, numa modelagem do alcance em relação à densidade de energia das baterias, como apresentada na Equação 2.

$$R = E^* \cdot \eta \cdot \frac{1}{g} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{m_{bateria}}{m} \quad (2)$$

onde,

$$\begin{aligned} R &= \text{Alcance [m]} \\ E^* &= \text{Densidade de Energia [Wh/kg]} \\ \eta &= \text{Eficiência de propulsão} \\ g &= \text{Gravidade [m/s}^2\text{]} \\ L/D &= \text{Eficiência aerodinâmica} \\ m_{bateria}/m &= \text{Fração de peso das baterias} \end{aligned}$$

A aproximação de Hepperle é simplificada e desconsidera as características da bateria utilizada, sua taxa de descarga, temperatura de operação e tempo (quantidade de ciclos já realizados) de vida. No entanto, foi utilizada na fase de projeto preliminar para estimar a fração de peso de baterias.

Traub (2016) e Sahoo et al. (2020) tratam do mesmo tema de Hepperle e na primeira obra busca-se a fração de massa de bateria ótima para a aeronave, enquanto na segunda modelam-se o alcance e autonomia porém, considerando as variáveis citadas no parágrafo anterior, como mostra a Equação 4 e 5. Resultados semelhantes podem ser observados também por Avanzini and Giulietti (2013)

$$E_{max} = R_t^{1-n} \left(\frac{\eta_{tot} V \times C}{(2/\sqrt{\rho S} C_{D,0}^{1/4} (2W\sqrt{K}/3)^{3/2})} \right)^n \quad (3)$$

$$R_{max} = R_t^{1-n} \left(\frac{\eta_{tot} V \times C}{(1/\sqrt{\rho S} C_{D,0}^{1/4} (2W\sqrt{K})^{3/2})} \right)^n \cdot \Psi \quad (4)$$

$$\Psi = \sqrt{\frac{2W}{\rho S}} \sqrt{\frac{K}{C_{D,0}}} \cdot 3.6 \quad (5)$$

onde,

$$\begin{aligned} E_{max} &= \text{Autonomia máxima [h]} \\ R_{max} &= \text{Alcance máximo [km]} \\ R_t &= \text{Razão de tempo da bateria} \\ \eta_{total} &= \text{Eficiência de propulsão} \\ n &= \text{Parâmetro de descarga} \\ V &= \text{Tensão em V} \\ C &= \text{Capacidade em Ah} \\ C_{D,0} &= \text{Coeficiente de Arrasto} \\ W &= \text{Peso} \\ K &= \text{parâmetro de arrasto induzido} \end{aligned}$$

4. ESTUDO DE CASO

O centro de estudos aeronáuticos da UFMG desenvolveu um avião elétrico para bater recorde de velocidade. Além do projeto da aeronave, existem duas barreiras tecnológicas a serem vencidas: o motor elétrico e o armazenador

de energia. A proposta desse trabalho é dimensionar um sistema armazenador de energia que atenda a missão de voo da aeronave, conforme a figura 6.

Para uma análise inicial do problema, caracterizam-se a energia e potência específicas requeridas no avião para posteriormente aplicá-las nas figuras de Ragone e então define-se os tipos de baterias a serem utilizados no problema. O avião deverá ter um armazenador de energia com limite de massa em 150 kg e a potência requerida será dada segundo plano de voo da aeronave.

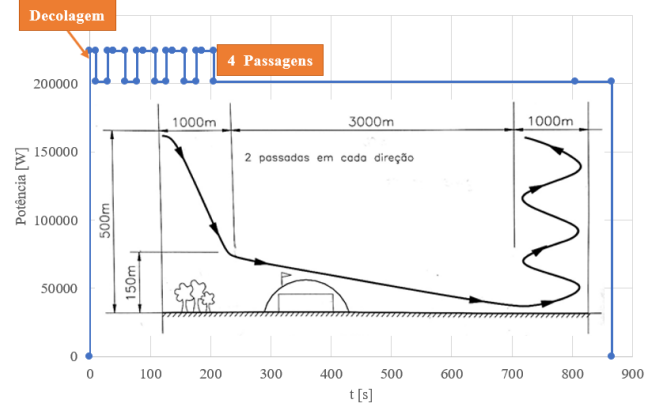


Figura 6. Demanda de Potência para 4 passagens, loiter e pouso

A energia total requerida é dada pela (6), que será a área sob o gráfico da figura 6. Portanto o armazenador deverá fornecer um total de 177,3 MJ ou 49,2 kWh. Como o peso máximo é de 150 kg, a energia específica requerida será dada pela (7).

$$E = \int P(t) dt \quad (6)$$

$$e_m = \frac{E}{m} = \frac{49,2kWh}{150kg} = 328,3 \text{ Wh/kg} \quad (7)$$

Para o cálculo da potência específica p_m será considerada a potência média demandada durante todo o percurso, calculada na (8), conforme a figura 6, pelo limite de peso, e pela (9), tem-se $p_m = 1,36 \text{ kW/kg}$.

$$P_{med} = \frac{E}{t_{percurso}} = 204,4 \text{ kW} \quad (8)$$

$$p_m = \frac{P_{med}}{m} = \frac{204,4kW}{150kg} = 1,36 \text{ kW/kg} \quad (9)$$

4.1 Escolha das baterias

Com os requisitos de energia e potência definidos, a figura 7, onde há algumas baterias comerciais utilizadas para carros, drones e aviões, pode ser útil para definir qual bateria é a mais adequada. Observa-se que não há tecnologia que atenda individualmente os quesitos do projeto, tornando-se necessário combinar diferentes tipos de tecnologia para atender a potência requerida e o armazenamento de energia.

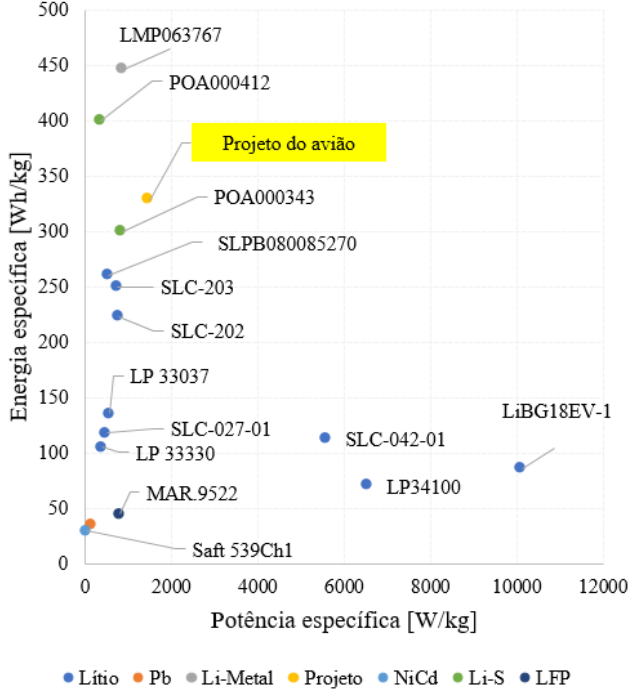


Figura 7. Gráfico de Ragone para algumas baterias comerciais (na caixa de texto o modelo da bateria)

Consultando a figura 7, verifica-se que há baterias com capacidade de armazenamento energético suficiente para atender a demanda do projeto, mas sua capacidade de fornecer potência não atende a demanda do avião. De forma análoga, há baterias com alta capacidade de potência, porém com pouco armazenamento energético. Sendo assim, a combinação desses dois tipos de baterias parece atraente, de tal forma que atenda a potência e a energia armazenada requerida no problema.

Dois tipos de bateria a e b podem ser combinados de tal forma a fornecer um armazenamento equivalente dado pela (10), onde E_i é a energia armazenada e m_i sua respectiva massa, fornecendo um armazenador final com energia específica e_{total} (Isikveren et al., 2014):

$$e_{mtotal} = \frac{E_{total}}{m_{total}} = \frac{E_a + E_b}{m_a + m_b} = \frac{e_{ma} \cdot m_a + e_{mb} \cdot m_b}{m_a + m_b} \quad (10)$$

O armazenamento híbrido pode ser visto como o espaço vetorial dado pela combinação linear dos tipos de armazenadores, como no caso, duas baterias, uma de alta energia específica e outra de alta potência específica. Sejam o vetores \mathbf{B}_1 e \mathbf{B}_2 , representando a bateria tipo 1 e bateria tipo 2, respectivamente, e a bateria equivalente \mathbf{B}_{eq} dados pela (11), onde e_1 e e_2 são as energias específicas e p_1 e p_2 são as potências específicas de cada bateria, e_{eq} e p_{eq} da bateria equivalente.

$$\begin{cases} \mathbf{B}_1 = \begin{pmatrix} e_1 \\ p_1 \end{pmatrix} \\ \mathbf{B}_2 = \begin{pmatrix} e_2 \\ p_2 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

A bateria equivalente \mathbf{B}_{eq} será dada pela combinação linear $\mathbf{B}_{eq} = k_1 \mathbf{B}_1 + k_2 \mathbf{B}_2$ com restrição dada pela massa total, sendo resolvida pelo sistema de equações em (12), onde k_1 e k_2 é a razão $k_i = m_i/m_{total}$, sendo o i o índice da bateria a ser associada.

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} e_1 & e_2 \\ p_1 & p_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} e_{eq} \\ p_{eq} \end{pmatrix} \\ k_1 + k_2 \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

Sendo assim, as células de bateria Hermes LMP063767 (SolidEnergy, 2020) e a SLC-042-01 (Technologies, 2016) foram escolhidas para o exemplo. Substituindo seus parâmetros da tabela 1 na (12), teremos cerca de 105 kg da LMP063767 e 20 kg da SLC-042-01, resultando em energia e potências específicas equivalente a requerida no projeto.

Tabela 1. Especificações das baterias escolhidas.

Fabricante Modelo	Hermes LMP06376	Eagle Picher SLC-042-01
Tensão nominal [V]	3,8	4,2
Capacidade [Ah]	3,4	27
Corrente máxima [A]	6,8	1330
Peso por célula [kg]	0,030	1
Energia específica [Wh/kg]	445	113
Potência específica [W/kg]	890	5586

Para simplificar, B_1 refere-se a bateria da Hermes e B_2 refere-se a bateria da Eagle Picher.

4.2 Arranjo das células

Primeiramente define-se a quantidade de células para cada tipo de bateria. Os 105 kg de B_1 equivalem a $105/0,030 = 3621$ células e os 20 kg da B_2 equivalem a 20 células.

Para simplificar o arranjo das células, considera-se um barramento de tensão contínua composto pelas 20 células da B_2 em série. Como cada célula trabalha em 4,2 V, teremos um barramento de 84V. Dessa forma, divide-se a tensão do barramento pela tensão de operação das células B_1 , que é 3,8 V conforme a tabela 1, onde 23 células em série, dividindo o total de células B_1 pelos 23 em série, teremos 158 *strings* em paralelo. A figura 8 representa o arranjo das baterias desconsiderando os circuitos eletrônicos para regulação de tensão entre *strings*.

4.3 Verificação do tempo de descarga

O tempo de descarga é dado por:

$$t_{descarga_i} = \frac{E_{armazenada_i}}{P_{saída_i}} = \frac{m_i \cdot e_i}{P_{saída_i}} \quad (13)$$

onde $E_{armazenada_i}$ é a energia armazenada, m_i a massa total utilizada, e_i a energia específica e $P_{saída_i}$ a potência demandada da respectiva bateria i , limitada pela corrente máxima que suas células operam.

A potência máxima fornecida por cada tecnologia é calculada em (14), onde p_i é a potência específica de cada bateria i . Sendo assim, substituindo os parâmetros de cada bateria, conforme a tabela 1, em (13) e (14) B_1 consegue fornecer 93,56 kW e B_2 no máximo 111,7 kW.

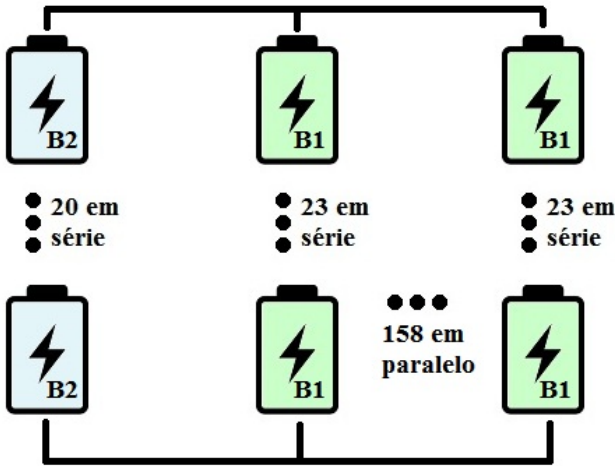


Figura 8. Arranjo das baterias.

$$P_{max_i} = m_i \cdot p_i \quad (14)$$

Dessa forma, de acordo com (13), o tempo de descarga de B_1 será $t_{descarga_1} = 30$ min e para B_2 teremos $t_{descarga_2} = 1,2$ min. Observa-se que a potência fornecida pelas baterias atende o requerido da potência média, porém B_2 se descarrega antes de completar o trajeto requerido, com duração de 14,4 min, e B_1 ainda sobra carga. Mesmo acrescentando-se mais 15 kg de B_2 , até completar os 150 kg de limite, haveria apenas mais 0,9 min de disponibilidade.

Vários detalhes da operação das baterias não foram considerados no projeto como a capacidade de descarregamento total, controle da temperatura de operação, sistema de gerenciamento das baterias (BMS), bem como a eletrônica de potência envolvida. Tudo isso gera uma perda de rendimento global, sendo necessário aumentar o dimensionamento do armazenador. O foco do trabalho foi dar um norte no dimensionamento dos armazenadores híbridos com base nas potências e energias específicas.

5. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi feito o dimensionamento de baterias baseado nas tecnologias disponíveis comercialmente, afim de atender as especificações do avião elétrico a ser desenvolvido pela UFMG, buscando limitar o peso das baterias em no máximo 150 kg. Afim de simplificar a abordagem inicial de um dimensionamento de baterias, alguns aspectos técnicos não foram abordados como a capacidade de descarga completa das baterias, temperatura de operação, conversores de tensão e rendimento de carga e descarga das baterias, bem como o sistema de gerenciamento do banco de baterias.

Observa-se que as tecnologias de baterias disponíveis atualmente não atendem a necessidade do avião totalmente elétrico em questão, pois, apesar da disponibilidade da energia nas baterias necessária o conjunto das baterias não consegue fornecer toda a potência demandada durante o percurso. As células têm um limite de corrente de operação que limita a sua capacidade de drenar energia.

Trabalhos futuros poderão ser realizados de forma a verificar a operação dinâmica juntamente com o modelo elétrico das baterias, comportamento térmico e um sistema gerenciamento do banco de baterias (BMS).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFMG, FAPEMIG, CNPq e CAPES pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- Ali, D.M. and Salman, S.K. (2006). A comprehensive review of the fuel cells technology and hydrogen economy. In *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference*, volume 1, 98–102.
- Avanzini, G. and Giulietti, F. (2013). Maximum range for battery-powered aircraft. *Journal of Aircraft*, 50(1), 304–307. doi:10.2514/1.C031748. URL <https://doi.org/10.2514/1.C031748>.
- Barnes, F. and Levine, J. (2011). *Large Energy Storage Systems Handbook*. CRC Press.
- Besenhard (1999). *Handbook of battery materials*. Wiley-VCH, Weinheim New York.
- Choma, E.F. and Ugaya, C.M.L. (2017). Environmental impact assessment of increasing electric vehicles in the Brazilian fleet. *Journal of Cleaner Production*, 152, 497–507. doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.091. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652615010203>.
- Courtin, C. and Hansman, R.J. (2018). Safety Considerations in Emerging Electric Aircraft Architectures. In *2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Atlanta, Georgia. doi:10.2514/6.2018-4149. URL <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2018-4149>.
- Crompton, T.R. (2000). *Battery reference book*. Newnes, Oxford, England Boston.
- Embraer (2019). Embraer: notícias - Embraer avança com projeto de avião demonstrador de tecnologias de propulsão elétrica. URL <https://embraer.com/br/pt/noticias?slug=1206637-embraer-avanca-com-projeto-de-aviao-demonstrador-de-tecnologias-de-propulsao-eletrica>. Library Catalog: embraer.com.
- Energy, O. (2018). OXIS Energy Begins Manufacturing in Brazil. URL <https://oxisenergy.com/httpsoxisenergy-comwp-content/uploads201805press-release-23-may-2018-oxis-energy-begins-manufacturing-in-brazil-pdf/>. Library Catalog: oxisenergy.com.
- Fugaro, F., Palmieri, M., Cascella, G.L., and Cupertino, F. (2018). Aeronautical hybrid propulsion for more electric aircraft: a case of study. In *2018 AEIT International Annual Conference*, 1–6.
- Gonzalez, F. (2016). *Energy storage in power systems*. John Wiley & Sons, Inc, Chichester, West Sussex.
- González, A., Goikolea, E., Barrena, J.A., and Mysyk, R. (2016). Review on supercapacitors: Technologies and materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1189 – 1206. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.249. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115016329>.
- Hepperle, M. (2012). Electric flight – potential and limitations. 30.

- Huggins, R. (2010). *Energy storage*. Springer, New York London.
- Isikveren, A., Kaiser, S., Pernet, C., and Vratny, P. (2014). Pre-design strategies and sizing techniques for dual-energy aircraft. *Aircraft engineering and aerospace technology*, 86, 525–542. doi:10.1108/AEAT-08-2014-0122.
- Lahyani, A., Venet, P., Guermazi, A., and Troudi, A. (2013). Battery/supercapacitors combination in uninterruptible power supply (ups). *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(4), 1509–1522.
- Miao, Y., Hynan, P., von Jouanne, A., and Yokochi, A. (2019). Current li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, 12(6), 1074. doi:10.3390/en12061074. URL <http://dx.doi.org/10.3390/en12061074>.
- Misra, A. (2018). Energy storage for electrified aircraft: The need for better batteries, fuel cells, and supercapacitors. *IEEE Electrification Magazine*, 6, 54–61. doi:10.1109/MELE.2018.2849922.
- Moura, S.J., Siegel, J.B., Siegel, D.J., Fathy, H.K., and Stefanopoulou, A.G. (2010). Education on vehicle electrification: Battery systems, fuel cells, and hydrogen. In *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1–6.
- NASA (2015). Nasa technology roadmaps - ta 3: Space power and energy storage. URL <https://www.nasa.gov/offices/oct/home/roadmaps/index.html>.
- Pipistrel (2020). Pipistrel obtains first ever Type Certificate in the world for an electric aeroplane from EASA – Pipistrel. URL <https://www.pipistrel-aircraft.com/pipistrel-obtains-first-ever-type-certificate-in-the-world-for-an-electric-aeroplane-from-easa/>. Library Catalog: www.pipistrel-aircraft.com.
- Ploetner, K.O. (2013). Operating Cost Estimation for Electric-Powered Transport Aircraft. In *2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Los Angeles, CA. doi:10.2514/6.2013-4281. URL <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2013-4281>.
- PowerThru (2016). Lead acid battery working – lifetime study. URL <http://www.powerthru.com/documents/TheTruthAboutBatteries-POWERTHRUWhitePaper.pdf>.
- Rolls-Royce (2019). Press releases. URL <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases.aspx>. Library Catalog: www.rolls-royce.com.
- Roof, C., Bari, M., Oza, A., and Chudoba, B. (2013). The Future of Electric Aircraft. In *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Grapevine (Dallas/Ft. Worth Region), Texas. doi:10.2514/6.2013-943. URL <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2013-943>.
- Rufer, A. (2018). *Energy storage : systems and components*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Sahoo, S., Zhao, X., and Kyprianidis, K. (2020). A review of concepts, benefits, and challenges for future electrical propulsion-based aircraft. *Aerospace*, 7(4). doi:10.3390/aerospace7040044. URL <https://www.mdpi.com/2226-4310/7/4/44>.
- Smith, W. (2000). The role of fuel cells in energy storage. *Journal of Power Sources*, 86(1), 74 – 83. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00485-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00485-1). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775399004851>.
- SolidEnergy (2020). *High Energy Rechargeable Metal Cells for Space*. SolidEnergy Systems Corporation. Rev. 1.
- Stevenson, M. (2009). Recycling | lead-acid batteries: Overview. In J. Garche (ed.), *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 165 – 178. Elsevier, Amsterdam. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00402-0>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527455004020>.
- Technologies, E. (2016). *EaglePicher SLC-042-01 Space Cell*. EaglePicher Technologies, LLC.
- Traub, L. (2016). Optimal battery weight fraction for maximum aircraft range and endurance. *Journal of Aircraft*, 53, 1–3. doi:10.2514/1.C033416.
- Vutetakis, D. (2009). Applications – transportation | aviation: Battery. In J. Garche (ed.), *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 174 – 185. Elsevier, Amsterdam. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00370-1>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527455003701>.
- Wang, Y., Xu, F., Mao, S., Yang, S., and Shen, Y. (2020). Adaptive online power management for more electric aircraft with hybrid energy storage systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1–1.