

PROCEDIMENTO PARA ESCOLHA DE BATERIAS PARA AERONAVES REGIONAIS UTILIZANDO TÉCNICA DE *TRADE-OFF*

José Affonso Moreira Penna, zeaffonso@gmail.com

Marcelo Ferreira Consorte, mconsorte@gmail.com

Marco Antonio Sarter Stoco, mstoco@gmail.com

Marcus Filipe Pereira, pereira.marcus@gmail.com

Thiago Henrique Fraga da Silva, thfraga@gmail.com

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (Mestrado Profissionalizante ITA/Embraer), São José dos Campos, Brasil

Geraldo José Adabo, adabo@ita.br

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil

Abstract. *The purpose of this paper is to present a trade-off methodology to provide a guidance in a NiCd battery specification for a small commercial aircraft's electrical system. First of all, the methodology is explained and detailed. After that a case study is exposed focusing on the trade-off methodology cited before.*

Keywords: *batteries, trade-off, NiCd, commercial aircraft*

1. INTRODUÇÃO

No cenário da aviação moderna, as aeronaves precisam ser projetadas de maneira a atender a requisitos de segurança, de desempenho e de mercado. A especificação correta do sistema de armazenamento de energia representa um impacto considerável nos aspectos de custo, peso, confiabilidade, manutenibilidade e simplicidade do projeto como um todo. Além disso, esses aspectos possuem caráter conflitante. A escolha, portanto, trata-se de um problema de otimização multi-objetivo, onde não existe uma única solução. A otimização utilizando *trade-off* representa um método de solução sem ser necessário transformar o problema multi-objetivo em um problema escalar (Cunha e Oliveira, 2008).

Aeronaves de pequeno porte utilizam preferencialmente sistema elétrico com corrente contínua (CC). Essa escolha deve-se a diversos fatores entre eles fatores históricos e evolutivos. Utilizando uma arquitetura com cargas CC predominantes, torna-se necessária a utilização de armazenadores de energia, tipicamente baterias químicas. Seus tipos se diferem principalmente pela composição e pela reação associada à transformação da energia química em energia elétrica. As mais comuns para aplicações em engenharia são compostas de: íons de lítio, níquel-cádmio, níquel-zinco, ácido de chumbo, e as alcalinas.

A escolha do conjunto de baterias de uma aeronave tem sido uma dificuldade para os especialistas do projeto, visto que os mesmos não seguem um procedimento que norteie este trabalho de modo a se tomar uma decisão embasada em aspectos técnicos e mercadológicos pré-analisados. Desta forma, este trabalho visa apresentar um procedimento de auxílio à tomada de decisão com relação à escolha do conjunto de baterias de uma aeronave regional, baseando-se na técnica de *trade-off*.

Primeiramente, foi feita uma pequena revisão bibliográfica abordando as tecnologias de baterias disponíveis atualmente no mercado e os requisitos de certificação que estão diretamente ligados à validade do projeto elétrico. Em seguida é apresentada a metodologia utilizada na condução deste trabalho. Apresentada a metodologia, detalha-se e explica-se o procedimento proposto. Um estudo de caso envolvendo o projeto elétrico de uma aeronave comercial de pequeno porte é posteriormente apresentado a fim de ilustrar o procedimento proposto no item anterior. Finalmente, discutem-se os resultados obtidos e conclui-se o trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma bateria pode ser definida como um dispositivo que utiliza energia química armazenada para produzir energia elétrica. Pode ser fisicamente construída com uma única célula ou com várias células interconectadas. A bateria, também conhecida como acumulador, é um dispositivo eletroquímico capaz de transformar em energia elétrica a energia química desenvolvida em uma ou várias reações. Difere da pilha pelo fato de poder ser recarregada várias vezes, acumulando energia elétrica sob forma de energia química, por isso é também conhecida como pilha reversível. A primeira bateria para alta corrente foi descrita em 1840. A partir de 1870, um mercado consumidor mais abrangente foi criado pela fabricação de campainhas elétricas para residências, escritórios, hotel, etc. Atualmente existe um número muito elevado de equipamentos construídos para serem alimentados por baterias, ocasionando a produção de uma grande variedade de tipos, tamanhos e formas de baterias. Inclusive têm-se produzido baterias especiais para atender necessidades específicas, como por exemplo, sistemas de memória de computadores, telefones celulares, aviões, satélites entre outras. Com relação à terminologia utilizada em baterias, chamamos de anodo o terminal negativo e catodo o terminal positivo. A capacidade de uma bateria é a quantidade de carga que a mesma é capaz de fornecer sob especificada condição de descarga expressa em ampere-hora (Ah) ou miliampere-hora (mAh). Chamamos de

profundidade de descarga (DOD - *depth of discharge*) a quantidade percentual de energia entregue à carga pela bateria com relação à sua capacidade de carga nominal.

As baterias de Níquel-Cádmio (NiCd) e Chumbo-Ácido selado (SLA) são amplamente utilizadas em projetos aeronáuticos. A bateria de NiCd possui longo ciclo de vida, tipicamente de 1500 vezes, com baixa resistência elétrica interna, aconselhada para grandes correntes elétricas de recarga e descarga. É amplamente aconselhada e utilizada na aviação comercial e executiva, onde as descargas e recargas ocorrem em uma frequência considerável. Além disso, ela atende satisfatoriamente a requisitos de segurança referentes à flamabilidade e a probabilidade de explosões. Entretanto, como característica intrínseca das mesmas, a descarga em um nível acentuado (DOD) reduz significativamente sua vida útil. Seu peso e custo são relacionados linearmente com a quantidade de energia acumulada. Já a bateria SLA possui um ciclo de vida de aproximadamente 1200 vezes e, normalmente, considera-se dois anos de vida útil para essa bateria. Apesar de uma vida útil menor quando comparada com a bateria NiCd, a bateria SLA apresenta menor custo e não necessita de manutenção.

Objetivando prolongar a vida útil das baterias e recarregar as mesmas de maneira mais rápida, pode-se fazer a opção do uso do carregador de bateria (*battery charger*). O *battery charger* é um dispositivo baseado em eletrônica de potência que possibilita a recarga com uma corrente constante controlada.

Aeronaves com até 19 assentos ou com peso máximo de decolagem (MTOW – *Maximum Take-off Weight*) até 19000 lbs são descritas no FAR (*Federal Aviation Regulations*) Part 23 da FAA (*Federal Aviation Administration*), tendo seus requisitos de segurança do voo regidos por essa norma. Já requisitos relacionados com a segurança do voo para aeronaves comerciais ou com limites de assentos e MTOW acima dos descritos para o PART 23 estão contidos no Part 25 e no Part 121 da FAR, que por sua vez são definidas e atualizadas pela FAA. Tais normas foram levadas em conta durante a condução desse trabalho. Como definido no § 121.305 (FAR, 2009), após falha total da geração de energia elétrica na aeronave, a mesma deve ser capaz de operar com seus equipamentos de voo e navegação básicos por no mínimo 30 minutos, possibilitando a continuidade do voo e um pouso seguro.

3. METODOLOGIA

O primeiro passo do desenvolvimento desse trabalho se deu através da identificação da necessidade de um procedimento que auxiliasse a tomada de decisão em relação à especificação e escolha do conjunto de baterias para uma determinada aeronave. A identificação dessa necessidade se deu no estudo de Fundamentos de Sistemas Elétricos, disciplina ministrada pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, no mestrado profissionalizante, e baseou-se na apostila do curso (Adabo, 2009). Através de pesquisas bibliográficas, foi possível obter informações a respeito de sistemas elétricos e de baterias aeronáuticos. Posteriormente foram feitas pesquisas a respeito de técnicas de *trade-off* para, a partir daí ser iniciada a construção de um procedimento baseado nessa técnica e voltado para a necessidade dos especialistas e estudantes de projetos elétricos de aeronave. Este procedimento foi baseado na metodologia sobre seleção de conceitos (Ulrich e Eppinger, 2000), através da técnica de tabela de pontuação, conhecida também como *concept scoring*. Esta ferramenta é geralmente usada quando se deseja determinar a melhor solução ou produto, dado um amplo conjunto de possibilidades e critérios. Em seguida, foi feito um estudo de caso visando à aplicação do procedimento criado no projeto de uma aeronave regional. Finalmente, foram apresentados e comentados os resultados obtidos.

4. PROCEDIMENTO

Nesta seção é proposto um procedimento para auxiliar a seleção de um conjunto de baterias de uso aeronáutico, dado uma série de possibilidades e critérios, pois muitas vezes este tipo de tarefa se torna difícil quando estão envolvidas diversas variáveis. Para auxiliar o entendimento do procedimento em questão, na Fig. 1 é demonstrado o fluxograma de atividades envolvidas no método, e, em seguida, é explicada a funcionalidade de cada bloco.

1. Escolha do tipo de tecnologia: A primeira tarefa recomendada é a realização da escolha do tipo de tecnologia a ser utilizada no projeto. Nesta primeira etapa, é importante relacionar as tecnologias presentes no segmento aeronáutico (aquelas utilizadas atualmente e aquelas que estão em desenvolvimento) e compará-las visando a obter as vantagens e desvantagens de cada uma.
2. Requisitos técnico-operacionais da aeronave: Esta atividade abrange a coleta de informações técnicas da aeronave que influenciam a operação e o funcionamento das baterias. É importante que as premissas operacionais e os requisitos de certificação sejam conhecidos.
3. Pesquisa de mercado e contato com fornecedores: Uma vez conhecidos os requisitos técnicos e escolhida a tecnologia a ser utilizada, parte-se para a pesquisa de mercado à procura de informações relevantes como, por exemplo, possíveis fornecedores, preços praticados no mercado, centros de manutenção e suporte.
4. Configurações do tipo de tecnologia: As informações coletadas anteriormente servirão para auxiliar na escolha das possíveis configurações de baterias que poderão ser utilizadas no projeto em questão e, desta forma, precisarão ser analisadas com mais cuidado.

5. Escolha de uma configuração para análise: A partir deste ponto cada configuração deverá ser analisada separadamente, com o intuito de verificar se a mesma atende aos requisitos básicos de operação e certificação. Além disso, deve-se verificar se a mesma está super dimensionada de acordo com os requisitos técnicos abordados na etapa 2. Nesta etapa, é importante que todas as configurações escolhidas na etapa 4 sejam verificadas, pois, de acordo com o resultado, a continuação do procedimento pode ser simplificada. O requisito que geralmente pode ser determinante para esta primeira seleção é a margem de segurança. Caso algum modelo ou conjunto esteja muito abaixo ou muito acima dos valores de referência, os mesmos podem ser eliminados ou descartados respectivamente. A Tab. 1 apresenta uma forma de avaliação da margem de segurança dos conjuntos de baterias. A Capacidade Total Líquida (CTL) pode ser calculada a partir da capacidade de carga das baterias (C) e do valor do *derating* da bateria ($T_{derating}$), levando em consideração, por exemplo, o uso ou não de *battery chargers* e o número de baterias (n). Para tanto, utiliza-se a Eq. 1. A taxa de *derating* típica pode variar de 0,72 a 0,85, sendo o menor valor referente a uma bateria sem *battery charger*, e o maior a uma bateria com *battery charger*.

$$CTL = n \times C \times T_{derating} \quad (1)$$

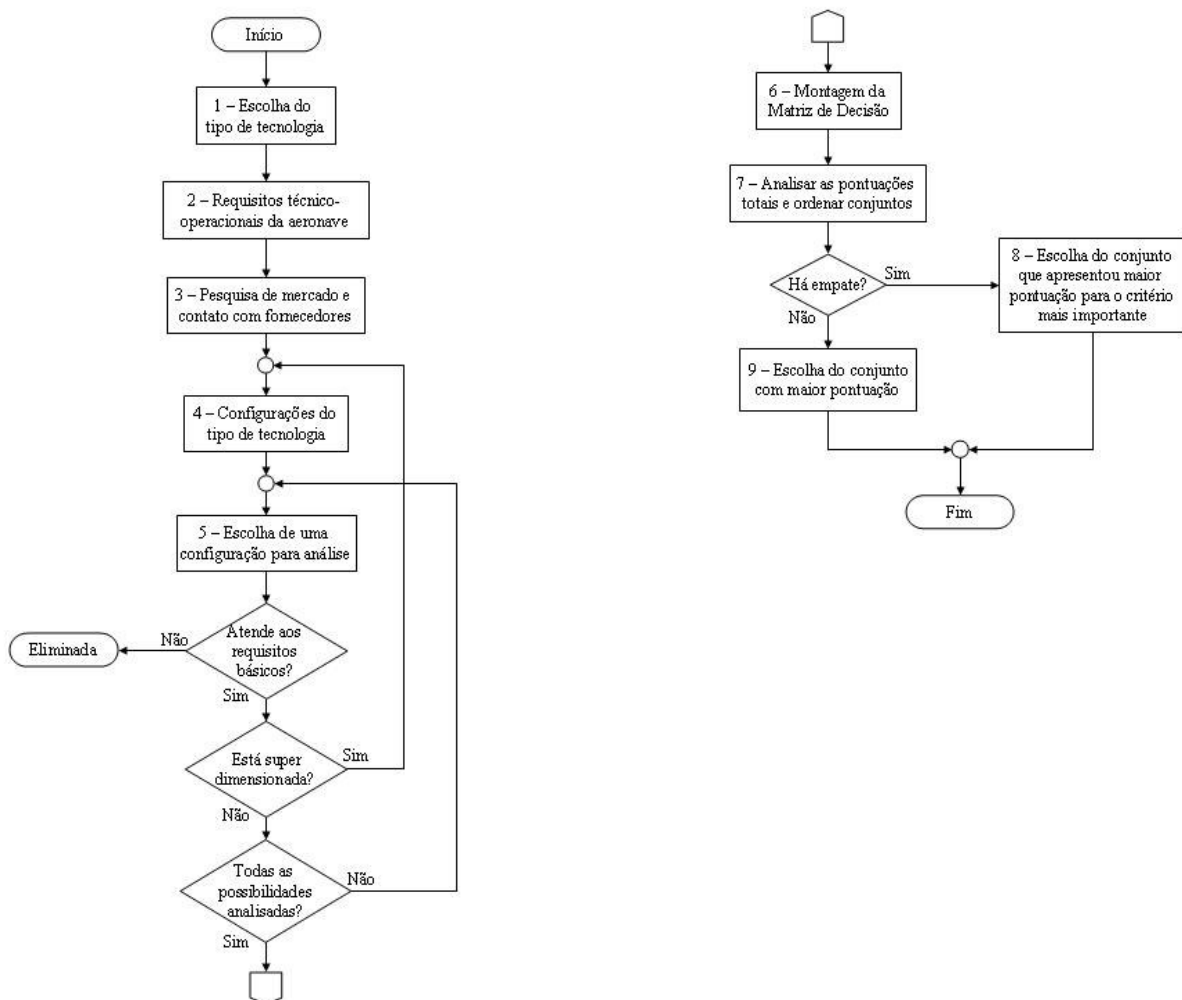


Figura 1. Fluxograma de Procedimento para determinação de conjunto de baterias de aeronaves regionais.

6. Montagem da Matriz de Decisão: Uma vez realizada a pré-seleção, inicia-se a elaboração da matriz de decisão, na qual os membros envolvidos no estudo poderão estabelecer os critérios, pesos e formas de pontuação dos conjuntos restantes. Os principais critérios levados em consideração neste problema estão explicados a seguir, como também a forma de pontuação dos critérios.
 - Massa: peso adicionado na aeronave pelo conjunto de baterias. O conjunto que possuir o menor peso receberá a maior nota e os maiores pesos subsequentes receberão notas menores gradualmente. Recomendamos a utilização

de escalas de pontuação com intervalos iguais entre si, divididos de acordo com a quantidade de conjuntos existentes.

Tabela 1. Tabela para verificação da margem de segurança dos conjuntos de baterias

Baterias	Capacidade Total Líquida (Ah)	Margem de Segurança	Resultado
Conjunto 1	Capacidade Liq. 1	Margem 1	Aprovado
Conjunto 2	Capacidade Liq. 2	Margem 2	Eliminado
Conjunto 3	Capacidade Liq. 3	Margem 3	Aprovado
.....			
Conjunto n	Capacidade Liq. N	Margem n	Descartado

- Custos: custo de aquisição do conjunto a ser utilizado na aeronave. A pontuação para este critério recebe a mesma lógica do critério anterior. Notas maiores para conjuntos mais baratos.
- Margem de Segurança: valor excedente de energia disponível (em porcentagem) pelo conjunto de baterias em relação à energia mínima necessária para uma operação de interesse. A pontuação para este critério é baseada no desvio em relação ao valor de margem de segurança de referência. Quanto maior esse desvio, menor é a nota. Desvios negativos devem ser pesados de maneira mais punitiva se comparado aos desvios positivos. Entende-se como desvio negativo, o desvio ocorrido quando a margem de segurança calculada estiver abaixo da margem de segurança objetivada. Essa diferenciação pode ser feita multiplicando o desvio negativo por um fator escalar.
- Comunalidade: proporção de variância entre os componentes utilizados no conjunto. Para a pontuação deste critério, conjuntos dotados de componentes exatamente iguais recebem maior nota. A menor nota será dada ao conjunto que apresentar o menor número de componentes comuns entre si.
- Simplicidade: quantidade de componentes do conjunto. Para a pontuação deste critério, conjuntos que possuem a menor quantidade de componentes recebem nota maior. Portanto à medida que o número de componentes aumenta a nota para o conjunto diminui.
- Manutenção: periodicidade de manutenção do conjunto. Para a pontuação deste critério, conjuntos que possuem componentes que demandem menor número de manutenção dentro de uma mesma quantidade de horas de voo recebem maior nota. O conjunto que necessitar de mais paradas para manutenção dentro deste intervalo de horas, recebe menor nota.
- DOD: porcentagem de capacidade removida de uma bateria comparada com a capacidade total da mesma. Este critério geralmente é utilizado para se estudar o ciclo de vida de uma bateria. Considera-se que, quanto menor for a profundidade da descarga de uma bateria, maior será o ciclo de vida da mesma. Para a pontuação deste critério o conjunto que apresentar menor profundidade de descarga, dada uma quantidade de energia consumida (este pode ser arbitrado), recebe a maior nota. À medida que o valor do DOD aumenta a nota do conjunto diminui.

Tabela 2. Tabela de pontuação para escolha de conjunto de baterias

Critério de Seleção	Peso	Conjuntos de opções						
		Conjunto A		Conjunto B			Conjunto m	
		Nota	Total	Nota	Total	...	Nota	Total
Critério 1	Peso 1	Nota 1A	Peso 1 x Nota 1A	Nota 1B	Peso 1 x Nota 1B		Nota 1m	Peso 1 x Nota 1m
Critério 2	Peso 2	Nota 2A	Peso 2 x Nota 2A	Nota 2B	Peso 2 x Nota 2B		Nota 2m	Peso 2 x Nota 2m
Critério 3	Peso 3	Nota 3A	Peso 3 x Nota 3A	Nota 3B	Peso 3 x Nota 3B		Nota 3m	Peso 3 x Nota 3m
...	...	...	...	...	...	...	...	...
Critério n	Peso n	Nota nA	Peso n x Nota nA	Nota nB	Peso n x Nota nB		Nota nm	Peso n x Nota nm
Total			Soma dos totais		Soma dos totais			Soma dos totais

A tabela 2 demonstra um formato padrão da matriz de decisão após a realização das atividades mencionadas anteriormente.

7. Analisar as pontuações totais e ordenar conjuntos: Uma vez preenchida a matriz da decisão, a tarefa seguinte é a análise dos resultados, que consiste em verificar a soma total de pontos de cada um dos conjuntos e ordená-los em ordem decrescente. De posse dos resultados será necessário verificar se houve algum empate, e, caso positivo, será necessário executar a etapa 8. Caso negativo prossegue-se para a etapa 9.

8. Escolha do conjunto que apresentou maior pontuação para o critério mais importante: Caso haja um empate de pontuação, o critério de desempate poderá ser realizado através da comparação das notas no critério mais importante. O conjunto que receber a maior nota nesse critério será então escolhido.
9. Escolha do conjunto com maior pontuação: Caso não haja um empate, será então escolhido o conjunto que apresentar a maior pontuação total.

O próximo capítulo irá abordar um estudo de caso, onde este procedimento foi utilizado para a determinação do conjunto de baterias mais adequado para uma aeronave comercial de pequeno porte, dados alguns critérios e premissas de projeto.

5. ESTUDO DE CASO

Nesse estudo de caso será exemplificada a utilização da metodologia descrita anteriormente para determinada aeronave comercial de pequeno porte. O detalhamento básico da operação da aeronave em questão será descrito a seguir.

Será discutida nesse tópico a escolha de um conjunto de baterias para a aeronave do estudo, cujo foco de operação é a aviação regional. Devido à sua larga utilização na indústria aeronáutica, será feita a análise de utilização de baterias de NiCd.

A Fig. 3 mostra a topologia básica do sistema elétrico da aeronave. A mesma possui dois geradores CC com capacidade nominal de 28V de tensão e 300A de corrente cada. O gerador da APU tem as mesmas características de capacidade de fornecimento elétrico de cada um dos outros geradores. A partida dos geradores é feita de forma elétrica.

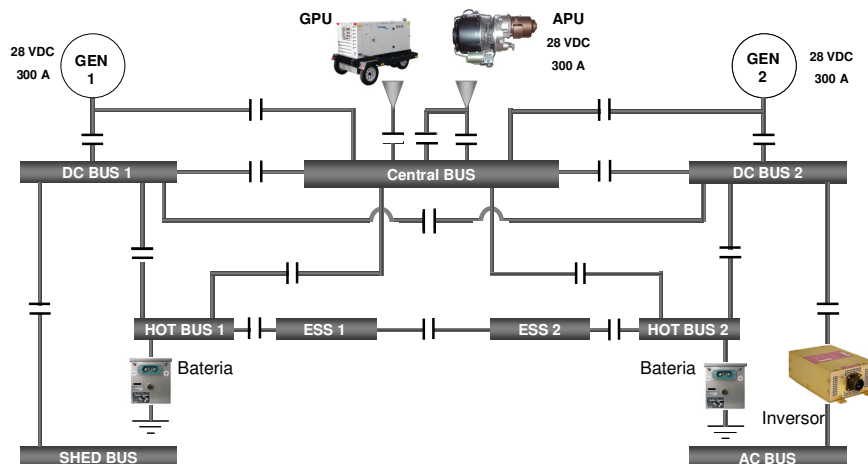


Figura 3. Diagrama elétrico da aeronave em estudo

O projeto do sistema elétrico mostrado na Fig. 3 foi feito de modo a permitir que qualquer um dos geradores seja ligado por uma das baterias (bateria 1) enquanto o restante das cargas da aeronave seja alimentado pela outra bateria. Dessa forma, sendo a bateria 1 responsável pela partida dos motores, seu consumo de carga será diferenciado em relação à bateria 2. A Tab. 3 mostra os dados de peso e custo das baterias disponíveis para o estudo, bem como do *battery charger*. Os valores de custo estão mostrados de forma comparativa, variando em função de uma variável x .

Tabela 3. Dados das baterias

	Peso (kg)	Custo (US\$)
<i>Battery charger</i>	3	50x
Bateria de 36 Ah	30	25x
Bateria de 44 Ah	37	30x
Bateria de 53 Ah	41	40x

Abaixo estão especificadas algumas necessidades a serem atendidas pela solução procurada:

- Fornecer 60 A por 5 minutos – 5 Ah (cargas de solo)
- Fornecer 600 A por 30 segundos – 5 Ah (partida de um motor)

- Fornecer 50 A por 45 minutos após emergência elétrica – 37,5 Ah (exigência de certificação)
- Margem de segurança de 20%
- Carga rápida
- Projeto simples
- Menor peso
- Menor custo
- Menor manutenção

Tabela 4. Combinações de baterias

2x36 sem <i>battery charger</i>
2x36 com <i>battery charger</i>
36+44 sem <i>battery charger</i>
36+44 com <i>battery charger</i>
2x44 sem <i>battery charger</i>
2x44 com <i>battery charger</i>
36+53 sem <i>battery charger</i>
36+53 com <i>battery charger</i>
44+53 sem <i>battery charger</i>
44+53 com <i>battery charger</i>

A operação padrão da aeronave consiste de duas tentativas de partida dos motores em solo (uma partida para cada motor apenas) realizado pelas baterias, seguido de tempo padrão de taxi de 10 minutos. Essas peculiaridades operacionais serão importantes durante a análise do *trade-off*. A Tab. 4 lista algumas possíveis combinações de conjuntos (10 no total) para a solução do problema dado. Esses conjuntos foram utilizados neste estudo e constituem-se basicamente de combinações das baterias disponíveis com ou sem o uso de *battery charger*. Conhecidas as alternativas a serem analisadas, será feito o *ranking* das alternativas, levando em consideração os seguintes critérios: massa, custo, manutenção, margem de segurança, comunalidade, simplicidade e DOD.

5.1. Critérios de análise

5.1.1 Margem de segurança

O primeiro critério a ser analisado é a margem de segurança, que foi fixada em um dos requisitos do projeto. Se apresentar valor negativo, a solução analisada é inviabilizada. A margem de segurança representa um peso de 17% no total da nota para cada solução. Esse valor foi arbitrado de acordo com o seu grau de importância em relação aos demais critérios.

Tabela 5. Notas no critério margem de segurança

	Margem de Segurança	Nota
2x36 sem BC	-1,3%	Eliminada
2x36 com BC	16,6%	8
36+44 sem BC	9,7%	5
36+44 com BC	29,5%	8
2x44 sem BC	20,7%	10
2x44 com BC	42,5%	4
36+53 sem BC	22,1%	9
36+53 com BC	44,1%	4
44+53 sem BC	33,0%	7
44+53 com BC	57,0%	1

Quanto mais próxima de 20%, melhor é a margem de segurança. Ou seja, nem margens de segurança muito altas e nem margens de segurança muito baixas são boas alternativas. A nota final de cada solução foi dada pela nota máxima (10) subtraída do modulo da diferença entre a margem da solução e os 20% objetivados. Margens de segurança menores do que a objetivada são escolhas potencialmente piores do que margens de segurança maiores do que a objetivada. Por isso foi aplicado um fator multiplicativo de 1/2 para margens menores do que 20%, o que as penaliza em dobro.

A Tab. 5 mostra as notas de cada conjunto de baterias. Vale observar que, devido a uma margem de segurança negativa, o conjunto de 2 baterias de 36 Ah sem *battery charger* foi eliminado, e não mais fará parte das futuras análises.

5.1.2. Massa

Esse parâmetro representa 18% da nota total. O peso de cada solução é um parâmetro extremamente importante no projeto de uma aeronave, pois o peso das baterias pode onerar outros sistemas, como por exemplo, o propulsivo. Soluções mais leves reduzem o peso vazio da aeronave e consequentemente reduzem o consumo de combustível, aumentando o retorno do investimento para o comprador e o operador. Para cada uma das 9 soluções analisadas nesse momento, foi dada uma nota que variou de 2 a 10, sendo que a maior nota foi dada para a solução mais leve, e a menor nota foi dada para a solução mais pesada.

5.1.3. Custo

Esse parâmetro representa 22% da nota total. O custo de cada solução é também um parâmetro extremamente importante no projeto da aeronave, pois atinge de forma direta o custo final da mesma, tornando-a mais competitiva se o custo das baterias acrescido do custo do *battery charger* for menor. Para cada uma das 9 soluções analisadas nesse momento, foi dada uma nota que variou de 2 a 10, sendo que a maior nota foi dada para a solução mais barata, e a menor nota foi dada para a solução mais cara.

5.1.4. Manutenção

Esse parâmetro representa 13% da nota total. A presença do *battery charger* aumenta a vida útil das baterias. O conjunto de baterias iguais que apresentar o *battery charger* necessitará de menos manutenções periódicas, recebendo assim nota 10. Para baterias diferentes com o *battery charger*, foi dada nota 8. Para o caso de conjuntos sem o *battery charger*, conjuntos com baterias iguais receberam nota 6, e baterias diferentes receberam nota 4.

5.1.5. Comunalidade

Esse parâmetro representa 10% da nota total. Nesse caso conjunto de baterias iguais, com ou sem o *battery charger*, receberam a maior nota (nota 10). Para o caso de baterias diferentes sem o *battery charger*, foi dado nota 8, e para o caso de baterias diferentes com o *battery charger*, foi dado nota 6, pois nesta situação, considerou-se a utilização de *battery charger* diferentes.

5.1.6. DOD

Tabela 6. Notas no critério DOD

	DOD	Nota
2x36 com BC	24,5%	3
36+44 sem BC	26,0%	2
36+44 com BC	22,1%	6
2x44 sem BC	23,7%	4
2x44 com BC	20,1%	8
36+53 sem BC	23,4%	5
36+53 com BC	19,8%	9
44+53 sem BC	21,5%	7
44+53 com BC	18,2%	10

Esse parâmetro representa 8 % da nota total. Sabe-se que, a vida útil da bateria aumenta com a redução do seu DOD, dessa forma, quanto menor for o DOD da solução maior nota lhe será atribuída. Para o cálculo do DOD, foi considerado um valor fixo de consumo de 15Ah, que corresponde à carga utilizada em uma partida em cada motor somada à carga típica utilizada em solo. A Tab. 6 mostra os valores de DOD para cada solução estudada. As notas variaram de 2 a 10.

5.1.7. Simplicidade

Esse parâmetro representa 12% da nota total. Segundo o critério de simplicidade, baterias iguais sem o *battery charger* representam a solução mais simples, recebendo a nota 10. Baterias diferentes sem o *battery charger* receberam

nota 8, baterias iguais com o *battery charger* tiveram nota 6 e baterias diferentes com o *battery charger* receberam nota 4, pois é a solução menos simples.

5.2. Apresentação dos resultados de *trade-off*

A partir das análises realizadas até agora, foi gerada a Tab. 7, que mostra detalhes do processo de *trade-off*. O conjunto de duas baterias de 44 Ah sem o uso do *battery charger* apresentou a maior nota e, portanto é o conjunto escolhido.

Tabela 7. *Trade off*

	Peso	2x36 c/ BC		36+44 c/ BC		2x44 c/ BC		36+53 c/ BC		44+53 c/ BC	
		Nota	Total	Nota	Total	Nota	Total	Nota	Total	Nota	Total
Massa	0,18	10	1,8	7	1,26	3	0,54	5	0,9	2	0,36
Custo	0,22	6	1,32	5	1,1	4	0,88	3	0,66	2	0,44
Manutenção	0,13	10	1,3	8	1,04	10	1,3	8	1,04	8	1,04
Margem de Segurança	0,17	8	1,36	8	1,36	4	0,68	4	0,68	1	0,17
Comunalidade	0,1	10	1	6	0,6	10	1	6	0,6	6	0,6
Simplicidade	0,12	6	0,72	4	0,48	6	0,72	4	0,48	4	0,48
DOD	0,08	3	0,24	6	0,48	8	0,64	9	0,72	10	0,8
<i>Total</i>			7,7		6,3		5,8		5,1		3,9
	Peso	36+44 s/ BC		2x44 s/ BC		36+53 s/ BC		44+53 s/ BC			
		Nota	Total	Nota	Total	Nota	Total	Nota	Total		
Massa	0,18	9	1,62	6	1,08	8	1,44	4	0,72		
Custo	0,22	10	2,2	9	1,98	8	1,76	7	1,54		
Manutenção	0,13	4	0,52	6	0,78	4	0,52	4	0,52		
Margem de Segurança	0,17	5	0,85	10	1,7	9	1,53	7	1,19		
Comunalidade	0,1	8	0,8	10	1	8	0,8	8	0,8		
Simplicidade	0,12	8	0,96	10	1,2	8	0,96	8	0,96		
DOD	0,08	2	0,16	4	0,32	5	0,4	7	0,56		
<i>Total</i>			7,1		8,1		7,4		6,3		

5.3. Análise de cenários

Com o conjunto de baterias escolhido, foram analisados três cenários de emergência elétrica durante diferentes situações de voo, e foi feita a análise da solução escolhida. Em todos os três cenários é considerado que, em solo, a bateria 1 fornece 12Ah para dar partida nos dois motores, e que a bateria 2 fornece 6Ah para as cargas em solo. Nota-se que esses valores assim como os resultados das cargas restantes para alimentar as barras essenciais incluem 20% de margem de segurança sobre o consumo. A aeronave permanece 10 minutos em taxi e nesse tempo as baterias se carregam. A carga (C) em ampère-hora de uma bateria de NiCd obedece à Eq. (2), onde o tempo é dado em minutos, e a carga(t) é dada em valores percentuais da carga total.

$$C(t) = 103 \times (1 - e^{-0,02835t}) \quad (2)$$

5.3.1. Emergência elétrica imediatamente após a decolagem – cenário 1

Inicialmente, calculou-se a carga da bateria imediatamente após ligar os motores. Em seguida, através da Eq. (2), foram obtidas as cargas das baterias 1 e 2 após 10 minutos de taxi. Esse cálculo fornece a quantidade de energia que estará disponível nas baterias no caso de falha imediatamente após a decolagem.

Após a falha, assume-se que o piloto pode tentar dar 3 partidas nos motores, ou seja, gastar 18Ah nessa atividade. Essa energia consumida é subtraída da carga líquida das baterias calculada anteriormente, obtendo a carga líquida disponível para alimentar os barramentos de emergência da aeronave. De posse dessa carga, calculou-se quanto tempo as barras essenciais da aeronave podem ser alimentadas, resultando na Tab. 8.

Em caso de pane elétrica imediatamente após a decolagem, o piloto pode tentar partir os motores por 3 vezes e alimentar as barras essenciais por 32 minutos.

Tabela 8.Carga nas baterias para cenário 1

Bateria	Carga Líquida após partida (Ah)	Carga após partida (%)	Carga após 10 min (%)	Carga Líquida após 10 min (Ah)
1	19,7	62,1%	72,2%	22,9
2	25,7	81,1%	86,5%	27,4
Total (Ah)				50,3
Tempo de voo restante após 3 tentativas de partida (min)				32

5.3.2. Emergência elétrica após 10 minutos de voo – cenário 2

Inicialmente, calculou-se a carga da bateria imediatamente após ligar os motores (cenário 1). Após isso, através da Eq. (2), foram obtidas as cargas das baterias 1 e 2 após 10 minutos de taxi e 10 minutos de voo (20 minutos de carga nas baterias). Após a falha, assume-se novamente que o piloto pode tentar dar 3 partidas nos motores. Subtraindo o valor inicial pela carga consumida nas partidas, obtemos a carga líquida disponível para alimentar os barramentos de emergência da aeronave, resultando na Tab. 9.

Tabela 9.Carga nas baterias para cenário 2

Bateria	Carga Líquida após partida (Ah)	Carga após partida (%)	Carga após 20 min (%)	Carga Líquida após 20 min (Ah)
1	19,7	62,1%	79,8%	25,3
2	25,7	81,1%	90,6%	28,7
Total (Ah)				54,0
Tempo de voo restante após 3 tentativas de partida (min)				36

Em caso de pane elétrica 20 minutos após a decolagem, o piloto pode tentar partir os motores por 3 vezes e alimentar as barras essenciais por 36 minutos.

5.3.3. Emergência elétrica após 30 minutos de voo – cenário 3

Considerando as mesmas condições iniciais das baterias, através da Eq. (2) foram obtidas as cargas das baterias 1 e 2 após 30 minutos de voo (40 minutos de carga nas baterias). Essas cargas são as cargas das baterias no caso de falha há 30 minutos após a decolagem. Após a falha, assume-se que o piloto pode tentar dar 3 partidas nos motores, como no cenário anterior, consumindo 18Ah. Calculou-se, novamente e da mesma maneira, quanto tempo as barras essenciais da aeronave podem ser alimentadas. Os resultados podem ser encontrados na Tab. 10.

Tabela 10.Carga nas baterias para cenário 3

Bateria	Carga Líquida após partida (Ah)	Carga após partida (%)	Carga após 40 min (%)	Carga Líquida após 40 min (Ah)
1	19,7	62,1%	89,8%	28,5
2	25,7	81,1%	95,9%	30,4
Total (Ah)				58,9
Tempo de voo restante após 3 tentativas de partida (min)				41

Em caso de pane elétrica 40 minutos após a decolagem, o piloto pode tentar partir os motores por 3 vezes e alimentar as barras essenciais por 41 minutos.

6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Após a construção da matriz de decisão e a análise dos cenários acima, nota-se que a adoção de duas baterias de 44 Ah sem a utilização de *battery charger* atende a todos os requisitos de certificação e operacionalidade para a aeronave comercial em questão. Tal aeronave, devido ao seu caráter de vôos comerciais regionais, demanda um conjunto de baterias que lhe permitam uma considerável despachabilidade e independência operacional em relação à infra-estrutura

aeroportuária, sem perda da confiabilidade do sistema. A carga líquida da aeronave em todas as situações analisadas supera a carga líquida desejada e, mesmo não sendo a melhor opção em alguns critérios do *trade-off*, o conjunto se coloca como uma solução ótima global segundo os critérios estabelecidos no projeto. Observa-se também que o tempo de voo restante após a detecção da emergência elétrica em todos os cenários supera 30 minutos, o que é bastante positivo para o operador. No cenário onde ocorre a emergência elétrica logo após a decolagem, por exemplo, a aeronave possui uma carga líquida total de 50,3 Ah no momento da emergência, possibilitando voo seguro por mais 32 minutos. Sabe-se que, em geral, um voo típico da aviação regional dura cerca de 60 minutos. Assim, em uma situação onde a aeronave entra em emergência elétrica durante a fase de cruzeiro (20 minutos de voo), a probabilidade de a mesma retornar ao seu aeroporto de origem ou chegar ao seu aeroporto de destino é muito grande, pois suas baterias já estarão bastante carregadas, proporcionando cerca de 40 minutos restantes de voo seguro.

Pode-se comparar os resultados obtidos com os valores da aeronave Dassault Falcon 2000. Essa aeronave apresenta dois geradores de 300 Ah e duas baterias de NiCd de capacidade de 36 Ah cada. O valor da bateria encontrada no estudo de caso desse trabalho apresentou diferença de aproximadamente 20% em relação à aeronave Falcon 2000, para dois geradores de capacidade semelhante.

7. CONCLUSÃO

O procedimento de especificação do sistema de bateria baseado em *trade-off* se demonstrou aplicável para o segmento aeronáutico, permitindo tomar decisões sobre qual conjunto de baterias utilizar dentre um conjunto de vastas opções. Embora somente demonstrado o caso de uma bateria de NiCd, os demais tipos de baterias se adequam a esse método. Os resultados do caso estudado representam um forte argumento possível de ser utilizado em etapas de certificação da aeronave, dispensando horas de testes em voo.

8. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Embraer, pelo suporte financeiro e logístico que permitiu à realização desse estudo. Da mesma forma, agradecemos aos especialistas funcionários da Embraer, que nos orientaram durante o desenvolvimento do mesmo.

9. REFERÊNCIAS

- Adabo, G. J., “Baterias de Aplicação Aeronáutica”, apostila da disciplina EA-704 – Fundamentos de Sistemas aeronáuticos do Programa de Mestrado Profissionalizante em Engenharia Aeronáutica (PEE), 2009.
- Cunha, J. O., and Oliveira, P. R., “Informações Tradeoff Em Problemas Multiobjetivos”, Proceedings of the “VIII Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional - ERMAC 2008”, Natal, Brazil, 2008, pp 1-7.
- Federal Aviation Administration, “Federal Aviation Regulation”, <http://www.faa.gov/>, United States of America, June 12, 2009.
- Ulrich, K. T. and Eppinger, S. D., “Product Design and Development”, 2nd Edition, Irwin/McGraw-Hill, 2000, pp. 117-120.

10. NOTA DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído nesse artigo.