



# Análise de Riscos por Árvore de Falhas e Simulação de Monte Carlo da Degradação de Baterias Chumbo-Ácido Utilizadas na Aviação

**Resumo** — Este trabalho apresenta uma análise por árvore de falhas e simulação de Monte Carlo a fim de avaliar a degradação profunda de baterias do tipo chumbo-ácido, amplamente utilizadas não somente em sistemas de partida e fontes de back-up de monomotores a pistão, aeronaves militares de treinamento e helicópteros, mas também como GPU's para aeronaves durante operações em solo e, com isso, reduzindo a necessidade do combustível motor como fonte de energia para os sistemas de bordo. A análise por árvore de falhas incorpora os eventos de inicialização, i.e., sulfatação, não-coesão da massa ativa, corrosão e estratificação, sendo o evento topo a ser modelado a própria degradação do sistema. A partir um conjunto de dados contendo data e hora, corrente, voltagem e temperatura, as distribuições de probabilidade de cada evento podem ser determinadas e, com isso, a simulação é conduzida a fim de estimar a probabilidade final de desgaste. A análise demonstra as limitações causadas pela indisponibilidade dos dados na obtenção dos parâmetros de cálculo, levando assim à incorporação de aproximações excessivas. O resultado final obtidos pela modelagem indica uma probabilidade de degradação de aproximadamente 3.80%, valor este alinhado com a informação a priori de que a bateria, no momento da medição, não havia atingido o seu fim de vida útil e, portanto, não havia sofrido degradações significativas.

## I. INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta uma visão geral a respeito da análise profunda de uma bateria do tipo chumbo-ácido, com foco específico no comportamento ao final da sua vida útil. O estudo combina uma análise por árvore de falhas e a implementação de uma simulação de Monte Carlo a fim de avaliar a probabilidade de degradação do sistema a partir da revisão bibliográfica de como tal evento é induzido pelas propriedades internas da bateria [1, 2, 3].

## II. METODOLOGIA

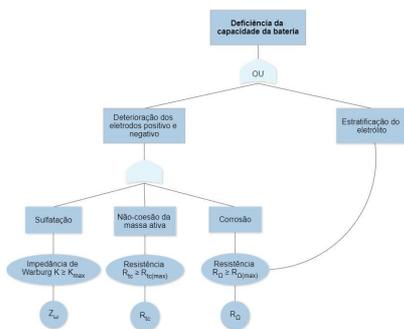
### A. COLETA DOS DADOS

Um conjunto de dados contendo medições de data e hora, corrente, voltagem e temperatura de uma bateria do tipo ácido-chumbo foi coletado para a análise. Tais medições forneceram os dados necessários para a investigação.

### B. ANÁLISE POR ÁRVORE DE FALHAS

Baseado em uma estrutura já previamente proposta [4], uma árvore de falhas semelhante a um diagrama *BowTie* com portão lógico do tipo foi construída com base nos eventos de inicialização conhecidos por contribuir para o processo de degradação. Aqui considera-se o evento topo a ser modelado a própria degradação, e os eventos de inicialização que sabidamente influenciam nesse processo sendo a sulfatação, não-coesão da massa ativa, corrosão e estratificação.

Tais eventos são sabidamente os principais fatores que levam à deflagração do evento topo e, portanto, a estrutura fornece uma representação sistemática das relações de interdependências entre esses eventos, auxiliando na compreensão do mecanismo de degradação como um todo.



Árvore de falhas para o evento de degradação de uma bateria chumbo-ácido e os parâmetros relacionados ao evento topo: Sulfatação (elemento de impedância de Warburg), não-coesão da massa ativa (resistência à transferência de carga), estratificação e corrosão (resistência interna). Fonte: O autor.

### C. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS

A partir dos dados coletados, foi possível estimar os parâmetros associados a cada um dos eventos: o elemento de impedância de Warburg ( $Z_W$ ), a resistência à transferência de carga ( $R_{IC}$ ) e a resistência interna ( $R_{i0}$ ). Para o cálculo de  $R_{IC}$ , utilizou-se uma simplificação da equação de Tafel e, para o cálculo de  $R_{i0}$ , a 1ª Lei de Ohm, abordagens generalistas devido à indisponibilidade de dados específicos. Esses cálculos forneceram aproximações iniciais para os respectivos parâmetros, entretanto até a data de submissão do presente trabalho, não havia sido possível incorporar o parâmetro de impedância ao evento de sulfatação, sendo utilizados somente os dois primeiros durante a análise.

### D. CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

A etapa da determinação das distribuições de probabilidade para os parâmetros calculados envolveu o ajuste de diferentes tipos de distribuições, e a adequação de cada uma é validada a partir das técnicas de *Akaike Information Criterion* (AIC) e gráficos do tipo Q-Q Plot. Tais processos auxiliam na identificação das distribuições probabilísticas que melhor se ajustam aos parâmetros associados à cada um dos eventos.

## E. SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

Com as distribuições de probabilidade previamente definidas, diferentes amostras dos dados e números de simulações são realizadas. Cada uma é capaz de gerar um conjunto de amostras a fim de estimar com precisão a probabilidade do evento principal. A simulação de Monte Carlo contabiliza as incertezas associadas aos eventos de inicialização e seus respectivos parâmetros, fornecendo uma avaliação probabilística da degradação da bateria como um todo.

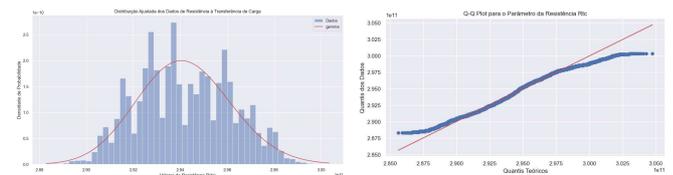


Imagem à esquerda: Curva de probabilidade do tipo Gamma ajustada aos dados da resistência  $R_{IC}$ . Imagem à direita: gráfico de probabilidades do tipo Q-Q mostrando os quantis de Rtc versus os quantis teóricos associados à distribuição ajustada. Fonte: O autor.

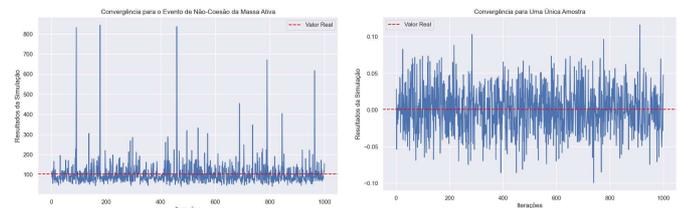


Imagem à esquerda: Gráfico de convergência do evento de não-coesão da massa ativa. Imagem à direita: Gráfico de convergência para o evento topo. Para a modelagem deste, foram consideradas somente as distribuições para os eventos de não-coesão, estratificação e corrosão (os dois últimos sem os gráficos representados). Fonte: O autor.

## III. CONCLUSÃO

Este trabalho ilustrou as etapas e metodologia empregadas a fim de avaliar a degradação de uma bateria do tipo chumbo-ácido, amplamente utilizadas na aviação comercial e militar. Apesar das limitações e indisponibilidade de dados específicos, o estudo oferece conclusões interessantes sobre os fatores causadores do evento em questão. Os resultados das simulações geraram uma probabilidade de degradação em torno de 3.80%, valor este alinhado com dados a priori de que a bateria, no momento das medições, não havia chegado ao fim de sua vida útil.

É importante reconhecer as limitações do estudo, particularmente as simplificações excessivas devido a restrições de dados. No entanto, a pesquisa demonstra o potencial das técnicas aqui empregadas como ferramentas valiosas na tomada de decisões no que tange a manutenção dessas baterias, além de destacar a importância da obtenção de dados experimentais, como medições de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS), a fim de aumentar a precisão e a confiabilidade em análises futuras.

## REFERÊNCIAS

- P. Ruetschi, "Aging mechanisms and service life of lead-acid batteries", *Journal of Power Sources*, vol. 127, p. 33-44.
- R. Yahmadi, K. Brik, F. B. Ammar, "Failures analysis and improvement lifetime of lead acid battery in different applications", *Proceedings of Engineering & Technology (PET)*, 2016, p. 148-154.
- M. Mohsin, A. Picot, "Lead-acid Battery modelling in perspective of ageing: a review", *IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDMPED)*, 2019, p. 425-431.
- K. Brik, F. B. Ammar, "Causal tree analysis of depth degradation of a lead acid battery", *Journal of Power Sources*, vol. 228, 2013, p. 39-46.