

Aproximação da Resistência interna de Baterias de Chumbo-Ácido utilizando Mínimos Quadrados

Matheus De B. Ferreira¹, Luis Schuartz¹, André A. Mariano¹

¹UFPR, Curitiba, Brasil

matheus.ferreira@ufpr.br

Resumo - O objetivo deste trabalho é apresentar uma nova abordagem para determinação da resistência interna de uma bateria e utilizar esse valor como parâmetro para programar a manutenção de sistemas fotovoltaicos off-grid em locais remotos. Essa nova possibilidade casa bem com o cenário de crescimento do setor de geração de energia e entrega uma solução para melhorar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos de forma indireta, com a redução nos custos operacionais, já que serão realizados de uma forma mais estratégica pelas empresas. Em particular, foi escolhida a tecnologia de chumbo-ácido, por ser uma opção largamente utilizada nesse tipo de sistema, e a validação do modelo com simuladores de circuito e pacotes matemáticos. Apesar do uso dessas ferramentas computacionais, as características reais de um sistema foram levadas em consideração e, mesmo sendo limitantes, os cálculos de resistência apresentaram acurácia de 95% com um mínimo de amostras de 34 medições de tensão e corrente.

I. INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica na nossa sociedade é cada vez maior e para manter a disponibilidade ou mesmo entregar energia em locais remotos, novas fontes geradoras são instaladas com o passar dos anos. Uma opção que se destaca no mercado por ser considerada energia limpa e que representa aproximadamente 20% da geração no Brasil, são as instalações fotovoltaicas [1]. Existem dois sistemas para esse tipo de geração, *on-grid* (conectado à rede de energia elétrica brasileira) e *off-grid* (sem conexão com a rede), sendo que no segundo caso, como não há outra fonte de energia à noite, são utilizadas baterias para operar durante o período noturno.

No segmento de fiscalização de trânsito, por exemplo, os sistemas fotovoltaicos *off-grid* são muito utilizados. O lucro das empresas está diretamente relacionado e é proporcional ao tempo de funcionamento dos equipamentos. Sendo assim, é comum que sejam realizadas as trocas de baterias em tais sistemas, ou de forma prematura com o objetivo de garantir a operação ininterrupta ou tardia quando o equipamento precisa de uma medida corretiva com urgência. Uma telemetria que gere um indicador de saúde das baterias, não necessariamente em tempo real, mas quando solicitado, pode ser uma ferramenta poderosa para a tomada de decisão dos setores de manutenção e operação da empresa.

Em se tratando de baterias, um parâmetro que se destaca para monitoramento e posterior análise, é a sua resistência

interna. Com o envelhecimento da bateria, o valor da capacidade restante irá diminuir por conta dos mecanismos químicos internos de perda de capacidade. Simultaneamente, o valor da resistência interna aumenta, resultando na redução da potência da bateria [6]. Existem diversas abordagens para realizar a medição de resistência, como por exemplo, aplicando um pulso na bateria [2]. Com os dados de tensão e corrente obtidos desse ensaio, e utilizando a Lei de Ohm, é possível apurar o valor de resistência da bateria conforme

$$R_i = \frac{V_B - V_{BO}}{I_B - I_{BO}}, \quad (1)$$

onde, as variáveis com índice BO são medidas antes do pulso, enquanto as variáveis com índice B, são medidas em resposta ao pulso [2].

As condições para determinar a resistência com os métodos da literatura dependem de dois fatores principais, um espaço ou bancada de teste com controle total das grandezas envolvidas no processo (tensão, corrente, temperatura, umidade, entre outras), e um ou mais dados técnicos previamente conhecidos, como a tensão de corte e a tensão máxima de operação, em geral provenientes de ensaios de caracterização anteriores. Portanto, é necessário avaliar uma nova metodologia que não considere as informações técnicas das baterias e que permita obter a resistência em cenários com ruído considerável.

Neste artigo, o foco será apresentar uma nova abordagem para se chegar no valor de resistência interna de uma bateria de chumbo-ácido, conhecendo apenas informações de tensão e corrente nos terminais da bateria. Na seção II alguns métodos tradicionais serão revisados evidenciando as suas exigências, na seção III a nova proposta será apresentada com a fundamentação teórica, na seção IV tem-se a configuração utilizada e os resultados obtidos contemplando análises quanto a performance e limitações de aplicação do algoritmo desenvolvido, e seção V quais foram as conclusões finais.

II. BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

Historicamente, as baterias de chumbo-ácido foram as primeiras a serem utilizadas em sistemas fotovoltaicos e continuam até hoje com uma grande fatia do mercado, principalmente por serem uma opção barata. É possível montar um sistema equivalente com outras opções como Íon de Lítio (Li-Ion), Lítio-Ferro-Fosfato (LiFePo4), no entanto, como ainda

não são muito difundidas entre as empresas, optou-se por limitar o escopo deste artigo ao modelo de chumbo-ácido que em trabalhos futuros poderá ser mais facilmente aplicado.

Uma das informações principais de toda a bateria é a sua capacidade de corrente nominal. Esse dado é informado pela fabricante e com unidade em Ampère-hora (Ah). Com o envelhecimento da bateria, a capacidade de corrente real se mostrará cada vez menor, então, pode-se fazer a razão entre ambos os dados e estabelecer uma métrica denominada *State of Health* (SoH) [3]

$$SoH = \frac{C_{atual}}{C_{inicial}} \times 100\%, \quad (2)$$

onde C_{atual} é a capacidade no presente momento enquanto $C_{inicial}$ representa a capacidade máxima nominal.

Utilizando (1) para cálculo de R_i , também é possível obter o SoH por [2]:

$$SoH = \frac{R_{EoL} - R_i}{R_{EoL} - R_N} \times 100\%, \quad (3)$$

onde R_{EoL} é a resistência quando a bateria chegou ao fim da sua vida útil e R_N é a resistência nominal, idealmente ambos os dados sendo fornecidos via *Datasheet*.

Para a aplicação de (2), é necessário realizar a carga e a descarga completa da bateria [3]. Esse procedimento leva tempo e precisa de um ambiente controlado, como um laboratório, sendo inadequado para incorporar em uma solução na qual os materiais estarão alocados em um ambiente externo, como um sistema fotovoltaico.

Já a aplicação de (3), demanda conhecimento da resistência nominal, tradicionalmente aferida após a produção, e de fim de vida da bateria. Para esse último dado, não há garantia que a fabricante irá recolher e analisar as baterias descartadas, sendo assim, é de se esperar que esse dado não conste no *Datasheet*, como ocorreu com [4], foi encontrado o valor de resistência nominal, mas não o correspondente ao fim de vida. Além disso, a depender da aplicação o valor aferido pelo fabricante não necessariamente é o valor final, em especial naqueles que a demanda de energia da bateria é baixa e pouca potência é exigida para que o equipamento funcione.

III. PROPOSTA DE CARACTERIZAÇÃO DE RESISTÊNCIA

Como estratégia de contorno para os métodos relatados, isto é, para determinar a resistência de uma bateria de chumbo-ácido e utilizar apenas este parâmetro para informar o estado da bateria, uma nova abordagem é proposta. Considerando o uso de duas cargas diferentes e constantes aplicadas à bateria em instantes diferentes, por exemplo, dois estados de operação de um equipamento, são feitas múltiplas medições de tensão e corrente para cada caso. A diferença entre as tensões e a diferença entre as correntes, em valor absoluto, são armazenadas em vetores. De posse desses dados experimentais, utilizamos o método dos mínimos quadrados, inserido no contexto da álgebra linear, para ajustá-los ao modelo da Lei de Ohm. Como as medições estão sujeitas à ruído, a relação linear da Lei de Ohm não será perfeitamente

satisfeita, então, é feita a minimização da soma dos quadrados dos erros pela função de erro $E(R)$

$$E(R) = ||V - R \cdot I||^2, \quad (4)$$

onde V é correspondente ao vetor das diferenças de tensões, I é correspondente ao vetor das diferenças de correntes e R é a variável resistência. A função de erro, $E(R)$, é expandida

$$E(R) = V' \cdot V - 2R \cdot I' \cdot V + R^2 \cdot I' \cdot I. \quad (5)$$

Como se tratam de vetores, os pontos representam a multiplicação matricial e o apóstrofe se refere a matriz transposta. É feita então a derivada em relação a R e o resultado é igualado a zero, simplificando a equação para

$$R = \frac{I' \cdot V}{I' \cdot I}. \quad (6)$$

A equação (6) nos fornece o valor de R fazendo o ajuste de uma linha reta no espaço corrente-tensão e traz consigo uma característica natural de filtro. A aplicação de filtros analógicos ou digitais no sistema de aquisição não é descartada, porém matematicamente já existe tal função embutida na proposta. A desvantagem reside na quantidade de operações que devem ser executadas, orientando a construção da solução final em duas partes, por exemplo, uma para aquisição com microcontrolador e outra para processamento em um computador. A interface física e protocolo de comunicação entre os dois *hardwares* não será discutida neste artigo.

IV. RESULTADOS

A. AMBIENTE DE TESTES

Para validar a abordagem proposta foi escolhido montar primeiramente um circuito de teste no simulador *Qucs* e registrar o comportamento teórico. Em um segundo momento, analisar no software *Matlab* quantas medições de tensão e corrente, sujeitas à ruído, devem ser efetuadas para que ao se utilizar (6) seja possível atingir o valor de resistência implementada com grau de precisão de 95%.

No simulador a bateria foi modelada como uma fonte de tensão (U) de 12,5 V em série com uma resistência (R) de 50 mΩ, valor intermediário típico para o modelo considerado. Para simulação de carga foi inserida uma fonte de corrente ($LOAD$) com varredura do parâmetro de corrente na simulação CC. O circuito está apresentado na Fig. 1.

No *Matlab* a amplitude de ruído inserida foi previamente apurada em bancada, resultando em 36 mV de pico a pico, e a sua construção foi realizada com a função *rand* normalizada para esse valor. O fluxo de trabalho do algoritmo está apresentado na Fig. 2.

Na etapa de carregamento de dados, são gerados os vetores com uma quantidade arbitrária de medições correspondentes às leituras de tensão e corrente do *Qucs*, sendo o ruído adicionado em seguida, para duas cargas. Na etapa de cálculo, é feita a subtração entre os valores de tensão e entre os valores de corrente, em módulo, para a aplicação de (6). Os valores das resistências resultantes são armazenados em um novo vetor para as verificações subsequentes. Na etapa de análise de resultados, as informações estatísticas dos valores obtidos

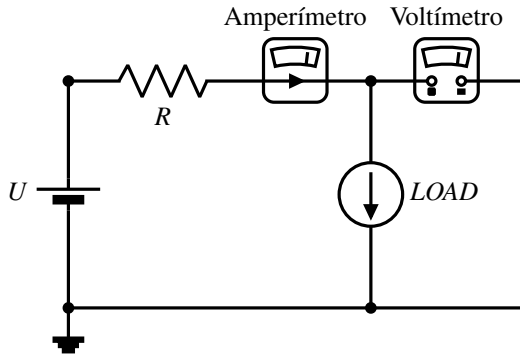


Figura 1: Circuito no simulador Quics.

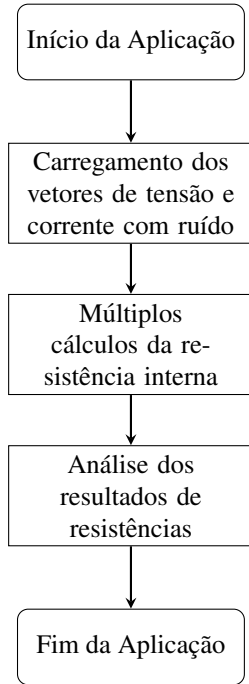


Figura 2: Estrutura do Algoritmo.

são confrontadas com os valores de referência, isto é, o conjunto de resistências deve ter idealmente erro estimado de $\pm 2,5 \text{ m}\Omega$ e nível de confiança de 95%.

B. RESULTADOS OBTIDOS

No circuito foi observado que para uma carga de 2 A a tensão medida no voltímetro foi de 12,4 V, enquanto que para uma carga de 4 A a tensão medida foi de 12,3 V. Antes de passar esses dados para a segunda etapa, um teste adicional foi realizado para confirmar que existe uniformidade, isto é, alterando-se a tensão (U) para outros valores e medindo a tensão para as mesmas cargas, foi observado que a diferença se manteve constante. Essa característica é muito importante, pois permite a aplicação do algoritmo na bateria de forma independente do seu estado de carga. Em um caso real, espera-se encontrar resultados próximos uma vez que no simulador todas as condições são ideais.

Para a análise matemática, a quantidade arbitrária de medições com ruído foi igual a 4 e a multiplicidade dos cálculos de resistência foi igual a 100. Com base nos resulta-

dos dessa primeira iteração e afim de averiguar o impacto de mais medições na precisão do método, o algoritmo foi executado uma segunda vez com 16 medidas. Os resultados das resistências pelo número de cálculos esperados eram próximos de $50 \text{ m}\Omega$ com erro de $\pm 2,5 \text{ m}\Omega$ e foram plotados na Fig. 3 para ambas as iterações.

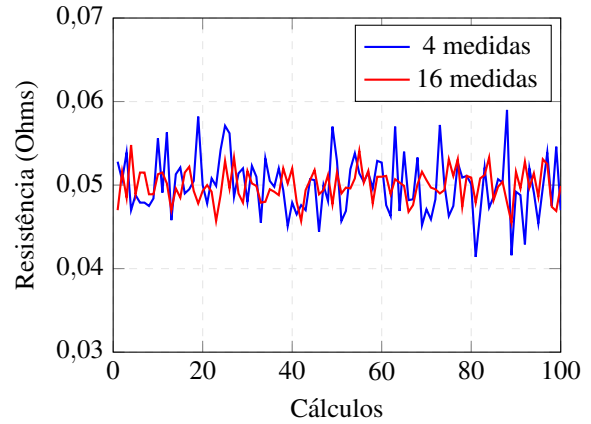


Figura 3: Cálculos de Resistência.

Nota-se que mais resultados ficaram mais próximo da resistência ideal após aumentar o número de medidas simuladas com ruído, aproximadamente 50% na primeira iteração e 75% na segunda ficaram dentro da margem de erro especificada. Sendo assim, faz sentido avançar para a próxima etapa e determinar estatisticamente qual o valor ótimo de amostras que deverão ser coletadas futuramente.

O cálculo do número de amostras necessárias para um intervalo de confiança e erro específicos sabendo o desvio padrão pode ser obtido a partir de

$$n = \left(\frac{Z_{\frac{\alpha}{2}} \times \sigma}{E} \right)^2, \quad (7)$$

onde n é o número de amostras necessárias, $Z_{\frac{\alpha}{2}}$ é o valor crítico da distribuição normal padrão (para 95% $\approx 1,96$), σ é o desvio padrão da população, E é o erro máximo aceitável (no ambiente = $5 \text{ m}\Omega$) [5].

Repetindo a primeira simulação com 4 amostras e em seguida aplicando (7), o número estimado de amostras aumentou, porém ficou abaixo do resultado obtido com 16 e não atinge, portanto, a precisão de 95% desejada. A formulação estatística não se aplica diretamente ao problema, pois as amostras sob controle são as tensões e correntes, enquanto a variável da qual são extraídos o desvio padrão, erro e intervalo de confiança é a resistência. A maneira como o erro das variáveis medidas se propaga e afeta a precisão da variável final em (6) exigem um desenvolvimento matemático adicional. No entanto, a abordagem numérica também é uma opção viável, apesar de ser necessário mais recurso computacional para encontrar o valor otimizado.

Seguindo a nova estratégia de análise, foram realizadas 100 iterações para cálculos de 10 mil resistências variando de uma em uma a quantidade de amostras. Em cada iteração, foi medido o número de resistências que ficaram dentro das especificações previamente estabelecidas e essa informação salva em um novo vetor. Após a conclusão das operações, a

curva que descreve o crescimento do índice de acertos com o aumento do número de amostras foi plotada e apresentada na Fig. 4. O primeiro valor de amostras a ultrapassar a taxa de acertos de 95% foi 34 e, portanto, trata-se do número mínimo necessário de medidas que garantem essa precisão.

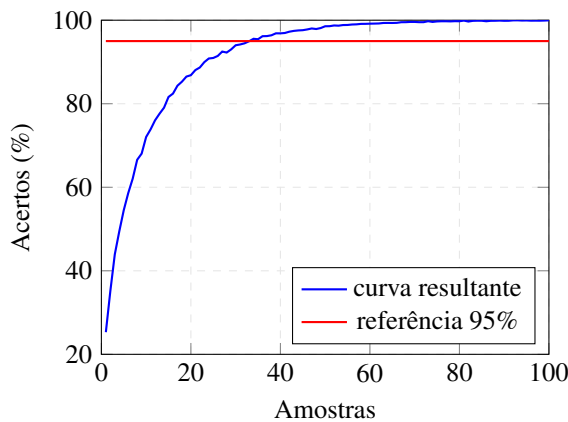


Figura 4: Porcentagem de acerto por quantidade de amostras.

V. CONCLUSÃO

Este artigo foi motivado pelo crescimento do número de sistemas fotovoltaicos instalados no país e que apresentam uma lacuna para comportar soluções inteligentes de monitoramento. O item mais crítico da instalação, a bateria de chumbo-ácido foi analisada a fim de se gerar um indicador para manutenção preditiva. Como revisado na literatura, existem algumas formas de se mensurar a saúde da bateria, mas considerando a aplicação final, onde só é possível medir os níveis de tensão e corrente que estão sujeitos à ruído e ainda não há regulação do ciclo de carga, uma nova abordagem foi proposta. Com um ruído na ordem de 36 mV de pico a pico, duas cargas distintas (dois estados de operação do equipamento) e erro máximo aceitável de 5 mΩ, foi possível calcular a resistência da bateria com taxa de acerto de 95%. Para isso se fazem necessárias ao menos 34 amostras de tensão e corrente, número factível para a aplicação final onde se espera empregar um sistema microcontrolado de aquisição.

AGRADECIMENTOS

Grato a empresa Perkons S.A. por fornecer materiais e por liberar horas para dedicação exclusiva desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] ABSOLAR, “Energia Solar Fotovoltaica no Brasil - Infográfico ABSOLAR,”[Online], Disponível: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>, [Acessado em: Setembro, 2024]
- [2] G. L. Bressanini, T. D. C. Busarello and A. Péres, “Design and implementation of lead-acid battery state-of-health and state-of-charge measurements,”Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), Juiz de Fora, Brazil, 2017.

- [3] S. Jiang, Z. Song, “A review on the state of health estimation methods of lead-acid batteries,”Journal of Power Sources, Volume 517, 2022.
- [4] FREEDOM, “MANUAL TÉCNICO BATERIA ESTACIONÁRIA,”Clarios Energy Solutions Ltda., Brazil, 2022.
- [5] D. C. Montgomery, G. C. Runger, “Applied Statistics and Probability for Engineers,”7ª ed., Wiley, 2017.
- [6] W. Li, M. Rentemeister, J. Badede, D. Jöst, D. Schulte, D. U. Sauer, “Digital twin for battery systems: Cloud battery management system with online state-of-charge and state-of-health estimation,”Journal of Energy Storage, Volume 30, 2020.