

# Projeto e Desenvolvimento de um Descarregador de Baterias Chumbo-Ácido com Aquisição de Dados

Lucas M. Ilha<sup>1</sup>, João Pedro S. Cipriani<sup>1</sup>, Giancarlo C. Daros<sup>1</sup>, Leonardo de Oliveira<sup>1,2</sup>,  
Álysson R. Seidel<sup>1</sup>, Leandro Roggia, Adriano P. de Moraes<sup>1</sup>, Luciano F. da Rocha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento em Sistemas Elétricos e Computacionais - GSEC

<sup>2</sup>Companhia Estadual de Energia Elétrica – Geração e Transmissão

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Santa Maria, Brasil

lucasilhamonteiro@gmail.com

**Resumo** — Este artigo apresenta o projeto e desenvolvimento de um descarregador de baterias chumbo-ácido para elementos com tensão nominal de 2 V com aquisição de dados e possibilidade de variar a corrente de descarga entre 1 e 20 A. Primeiramente, é apresentado o escopo e revisão bibliográfica sobre baterias chumbo-ácido. Posteriormente, o descarregador de baterias é desenvolvido e detalhado. Por fim, uma aplicação prática com obtenção de resultados visa validar o comportamento do descarregador. A partir dos dados adquiridos, verifica-se o estado de saúde da bateria sob teste.

**Palavras-chave** — Aquisição de dados, Baterias, Chumbo-Ácido, Corrente Constante, Descarregador de Baterias, Ensaio de Capacidade.

## I. INTRODUÇÃO

Baterias de chumbo-ácido, uma das mais antigas tecnologias de baterias recarregáveis, são amplamente utilizadas em aplicações comerciais e industriais, como a partida em veículos de combustão interna e fontes de alimentação ininterrupta (UPS) [1]. Essa tecnologia de baterias possui baixo custo de fabricação em comparação a outras tecnologias, assim como um processo construtivo mais simples e disseminado industrialmente, tendo significativa produção nacional. Outra vantagem da utilização de baterias de chumbo-ácido é o reduzido custo por kWh, fornecendo um serviço confiável e com razoável autodescarga, em torno de 2 a 5% ao mês em condições de temperatura ideais [2-3].

No entanto, as baterias de chumbo-ácido possuem algumas desvantagens relevantes quando comparadas a outras tecnologias. Não permitem uma carga rápida: por recomendação dos fabricantes, são limitadas a cargas entre 10 e 20 horas para evitar sobreaquecimento. Além disso, possuem uma baixa densidade de potência e energia, além de que ciclos de descargas profundas que reduzem, em muito, a vida útil dos elementos [2]. Dessa forma, exigem sobredimensionamento da capacidade para aumento da vida útil e ocupam grandes volumes.

Nesse contexto, estão inseridas as subestações de energia elétrica. Estas possuem bancos de baterias chumbo-ácido estacionárias, responsáveis por suprir energia para os sistemas de telecomunicações e proteção da subestação durante uma falta

do sistema. Visto que os bancos de baterias estão instalados em sistemas de suma importância para a subestação, deve-se garantir que os elementos estejam em boas condições de uso. Assim, existem normativas, como a NBR 14199 [4] e NBR 14205 [5], que definem uma série de ensaios periódicos que devem ser realizados para prever e evitar eventuais problemas.

Dentre os ensaios periódicos previstos para a manutenção dos elementos da subestação, destacam-se os ensaios de capacidade. Esses ensaios exigem que o banco de baterias seja descarregado e carregado com regulação de corrente e tensão, conforme instruções fornecidas pelos manuais dos fabricantes [6-7] e pelas próprias normas [4-5]. No entanto, a realização desses ensaios é trabalhosa, requerendo a atenção constante de um técnico qualificado. Além disso, equipamentos especializados para a realização automática desse processo possuem custo elevado.

Embora todos os elementos sejam monitorados durante o ensaio, apenas a capacidade do banco inteiro é observada pois quando qualquer elemento do banco atinge a tensão mínima de ensaio, o teste deve ser interrompido. Para conhecer a capacidade individual dos elementos são necessários testes de descarga individuais

Este trabalho, idealizado em função da parceria com a Companhia Estadual de Energia Elétrica - Geração e Transmissão (CEEE-GT), tem como objetivo desenvolver um descarregador portátil de baterias individuais que opere em malha fechada e inclua um sistema de aquisição de dados. O descarregador deve atender as especificações previstas nas supracitadas normas para os modelos de baterias do tipo FVLA (bateria chumbo-ácido ventilada) e VRLA (bateria chumbo-ácido regulada por válvula), que são os modelos mais utilizados pela companhia parceira.

O artigo é estruturado da seguinte forma: na seção II é apresentada uma revisão bibliográfica sobre baterias de chumbo-ácidas estacionárias, seus tipos e as normas que regem os ensaios desses elementos. Na seção III é apresentado o processo de desenvolvimento do descarregador com base nessas especificações. Por fim, na seção IV, são apresentados os resultados experimentais do trabalho e na seção V, as conclusões.

## II. BATERIAS CHUMBO-ÁCIDO ESTACIONÁRIAS E NORMATIVAS

### A. Baterias de Chumbo-Ácido

Baterias de chumbo-ácido estacionárias são comumente utilizadas como fonte de energia reserva em sistemas que necessitam de alimentação ininterrupta. No caso de subestações, os elementos são dispostos em série, formando bancos de baterias. Esses bancos devem permanecer em flutuação e permanentemente carregados, de forma a ficarem operantes para eventuais faltas na rede elétrica, mantendo o sistema na qual estão conectadas funcionando [3].

Como citado anteriormente, os bancos de baterias da empresa parceira são compostos, basicamente, por dois tipos de baterias, onde cada banco é formado apenas por um tipo de elemento por possuírem diferentes características. O primeiro tipo, as baterias de chumbo-ácido ventiladas (Fig. 1), necessitam de intervalos regulares de inspeção devido a perda de água em seu funcionamento e emissão de gases perigosos danosos à saúde. Por conta desses fatores, o banco de baterias deve ser instalado em salas exclusivas, com sistema de controle de ar e instalações elétricas à prova de descarga elétrica de curta duração (faísca), a fim de evitar explosões [8], cuidado que deve ser considerado para o desenvolvimento de um descarregador comercial. Esses elementos devem ser armazenados apenas na posição projetada, a fim de evitar vazamentos do eletrólito.



Fig. 1. Exemplo de baterias chumbo-ácido ventiladas [6].

O segundo tipo, baterias de chumbo-ácido regulada por válvula (Fig. 2), foram desenvolvidas nos anos 70 e são livres de manutenção do eletrólito pois a maior parte dos gases produzidos durante seu funcionamento são recombinados, fazendo com que a perda de água seja reduzida [8]. Diferentemente das ventiladas, as baterias reguladas por válvula podem operar em qualquer posição, visto que o eletrólito fica totalmente retido.



Fig. 2. Exemplo de baterias chumbo-ácido regulada por válvula [7].

Existe pouca normatização no Brasil em relação a quais dados de baterias devem ser fornecidos pelo fabricante [9]. No entanto, as características gerais de carga e descarga são mantidas entre os diferentes modelos. A Fig. 3 apresenta os resultados típicos para um ensaio de descarga com corrente constante de uma bateria comercial de 250 Ah.

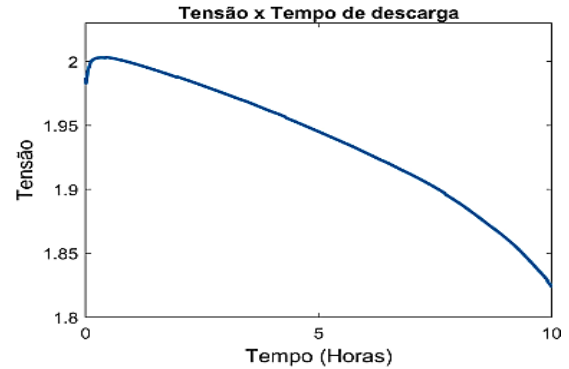


Fig. 3. Curva de tensão por tempo de descarga. Fonte: Autor.

O procedimento é realizado em um elemento que foi previamente totalmente carregado e deixado em flutuação na tensão nominal de 2,2 V. Após retirado da flutuação, aguardam-se 4 horas de descanso antes de iniciar o processo de descarga. O procedimento, seguindo instruções do fabricante, é interrompido quando o elemento chega à uma tensão mínima de final de carga – geralmente de 1,75 V ou de 1,85 V, a depender do regime de operação que se espera. A capacidade do elemento é medida pela quantidade de carga que ela foi capaz de fornecer durante esse período.

### B. Modelo Elétrico

Eletricamente, uma bateria de chumbo-ácido pode ser representada pelo modelo simplificado da Fig. 4. A fonte de tensão interna  $v_{oc}$  possui uma relação não linear com o Estado de Carga (SoC, do inglês *state of charge*) das baterias e representa a tensão ( $V_{bat}$ ) das baterias quando em circuito aberto. Quando o sistema é carregado ou descarregado, a queda de tensão no resistor  $r_0$  se soma a essa tensão interna, de forma a resultar nas curvas de carga e descarga apresentadas nos manuais. Embora o valor da resistência  $r_0$  varie significativamente de acordo com a corrente de carga e descarga ( $I_{bat}$ ), de maneira geral correntes maiores resultam em maiores perdas durante a descarga. Assim, é comum que os fabricantes informem diferentes capacidades para as baterias de acordo com as correntes de descarga às quais o elemento estará submetido [9].

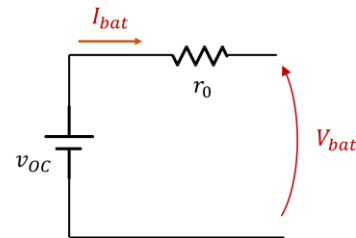


Fig. 4. Modelo elétrico simplificado. Fonte: Autor.

Pode-se ainda verificar o estado de carga realizando a medida de tensão de circuito aberto entre os terminais da bateria. O resultado é analisado através de gráficos de tensão de circuito aberto por *SoC*, comumente encontrado nos manuais dos fabricantes como uma curva da tensão pela capacidade restante, exemplificado pela Fig. 5.

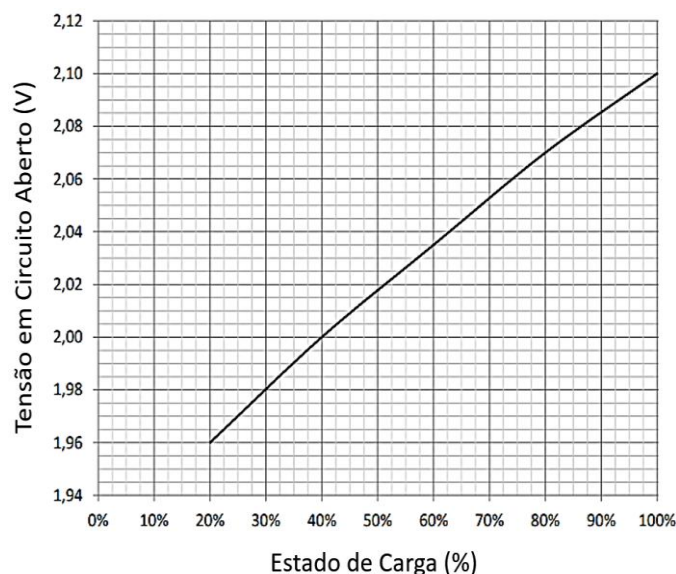


Fig. 5. Curva de tensão por *SoC*. Adaptado de [7].

A capacidade nominal de uma bateria é uma unidade de medida da capacidade de armazenamento energético, a qual indica a quantidade de energia que o elemento possui quando em plena carga, sendo expressada em Ah. [3]. O teste indicado pelas normas para avaliar a capacidade de uma bateria é o ensaio de capacidade, que consiste em realizar a descarga de um elemento específico ou do banco de baterias e avaliar os resultados. As normativas contemplam formas variadas de realizar esses testes de acordo com a necessidade.

Além do modelo simplificado da Fig. 4, baterias de chumbo-ácido possuem uma série de dinâmicas internas, relacionadas com a formação de uma capacitância de dupla camada [10] e com as diversas reações químicas que ocorrem durante o processo de carga e descarga. Dessa forma, a interrupção do processo ou a alteração das condições de corrente durante a descarga podem afetar a avaliação da capacidade da bateria. Ainda, a regulação da temperatura dos elementos durante o ensaio também é essencial, devendo ser mantida entre  $25 \pm 3^\circ$ . Assim, as normas são rígidas em relação à precisão com que devem ser realizados os ensaios.

### C. Normativas

As normativas, tanto internacionais quanto nacionais, têm como objetivo fornecer ao usuário informações e recomendações relativas à manutenção, testes e substituição de baterias chumbo-ácidas, tanto ventiladas quanto reguladas por válvula [9].

Para a escolha dos parâmetros do descarregador, serão utilizadas como referência duas normas de âmbito nacional: a

normativa ABNT NBR 14199 [4] especifica os requisitos para a execução dos ensaios em acumuladores chumbo-ácidos estacionários ventilados. Esta norma estabelece os procedimentos aplicados à realização de ensaios de rotina em bateria. Já a normativa ABNT NBR 14205 [5] especifica os requisitos para a execução dos mesmos ensaios e procedimentos em acumuladores chumbo-ácidos estacionários regulados por válvula.

Em caso de qualquer irregularidade durante os testes, sejam mensais, semestrais ou anuais, deve-se corrigi-los afim de evitar problemas críticos. Destaca-se dentro dos testes anuais a avaliação da capacidade dos elementos, com isso pode-se determinar o quanto da vida útil ainda resta. Se após o ensaio se verificar que a bateria atingiu 80% ou menos da sua capacidade nominal, essa deve ser substituída [11]. Para o presente projeto, é de suma importância seguir as indicações das normas para realizar o teste de capacidades dos elementos.

### III. DESENVOLVIMENTO DO DESCARREGADOR

Descarregadores de baterias encontrados no mercado nacional apresentam custo elevado, sendo geralmente voltados para aplicações de instalação permanente [12-13] ou com especificações técnicas que não podem ser adaptadas para a aplicação do projeto. Com isso foi idealizado um descarregador de baterias que atenda as especificações de um modelo de baterias atualmente utilizado em subestações de energia, o modelo 5 OPzS 250 da *EnerSystem*, de 250 Ah.

Pela definição do regime de média descarga, em que o elemento é descarregado entre 1 e 20 horas, é possível se escolher a corrente de descarga entre aproximadamente 250 A e 12,5 A com *ripple* (ondulação) de corrente de  $\pm 1\%$ , sendo permitidas variações de  $\pm 5\%$ , desde que os ajustes não ultrapassem 20 s [6-7]. Para esse descarregador, no entanto, busca-se uma solução que atenda uma descarga mais lenta devido a disponibilidade de componentes eletrônicos. As especificações do projeto são apresentadas na Tabela I.

TABELA I – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Tensão de entrada – Fonte Auxiliar	100-240 Vac – 60Hz
Corrente de descarga	1-20A
Tensão nominal da bateria	2 V
Potência máxima de descarga	40W
<i>Ripple</i> máximo de corrente	1%
Variáveis para Instrumentação e Controle	Corrente de descarga Tensão de descarga Temperatura do elemento Limite de tempo Limite inferior de tensão

Além das características apresentadas, deseja-se que o protótipo seja portátil, possua baixo volume e que seja possível realizar a aquisição de dados enquanto o descarregamento é executado.

## A. Sistema Proposto

A literatura apresenta uma variedade de circuitos para descarga de baterias, sendo que a maioria tem características passivas ou com chaves controladas [14]. Para um sistema de baixo custo voltado a ensaios de baixa intensidade e que não prevê uso constante, o fator da eficiência energética não é tão significativo. Assim, a energia da bateria pode ser dissipada na forma de calor sem necessidade de reaproveitamento. Para esse projeto, se propõe o uso de *MOSFETs* operando como uma fonte de corrente e colocados em série com a bateria.

Considerando o nível de precisão exigido para a aquisição dos dados da descarga e para o controle da corrente, se escolhe um microcontrolador Atmega328 [15] inserido na placa de desenvolvimento Arduino Nano [16] para realizar o controle do circuito. Nesse dispositivo, que possui conversor A/D de 10 bits integrado, é implementado o controlador digital de corrente. Para atuar na tensão  $V_{gs}$  dos *MOSFETs*, utiliza-se um conversor digital analógico externo do tipo R2R de 12 bits. A alta resolução é necessária para garantir o controle da corrente na bateria com precisão.

## B. Funcionamento

Os primeiros passos para implementar o descarregador baseiam-se na definição das especificações técnicas de: nível de corrente para descarga, limite mínimo de tensão desejado e limite de tempo de ensaio. Uma vez que a proteção tenha sido implementada para todos esses casos, é possível conectar com segurança o elemento na placa.

O circuito proposto tem o funcionamento de uma carga eletrônica, porém dispensa o uso de resistor shunt, comumente utilizado nesse tipo de circuito [17], com dissipação da potência diretamente em até  $n$  *MOSFETs* colocados em paralelo. A leitura de corrente de descarga é realizada através do sensor de corrente de efeito hall ACS712 [18] amostrado pelo A/D do ATmega328 e calibrado para erro inferior a 10 mA. A Fig. 6 apresenta o funcionamento geral do sistema em malha fechada, correspondendo às etapas de controle, atuação e proteção do circuito.

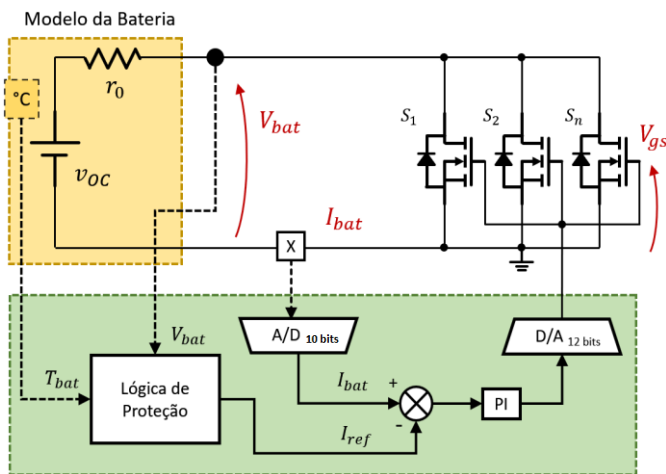


Fig. 6. Diagrama simplificado do sistema, incluindo instrumentação e controle. Fonte: Autor.

O valor lido pelo microcontrolador passa por um controle com parcelas proporcional e integral (PI) [19]. O valor de saída do controle PI, implementado através da biblioteca PID\_v1.h [20], é transmitido ao módulo conversor digital/analógico (DAC) MCP4725 [21]. A interface quantiza a ação de controle e adapta a tensão  $V_{gs}$  dos *MOSFETs*. A tensão de gate, por sua vez, altera o ponto de operação do *MOSFET*, o que, por sua vez, altera nível de corrente na carga, fechando a malha. Valores para os ganhos dos controladores foram obtidos experimentalmente, dada a dificuldade do processo de obtenção dos parâmetros da planta [9]. Buscou-se tempos de subida na ordem de 1 segundo e minimização do *overshoot*.

## C. Leitura e Aquisição de Dados

Concomitantemente à atuação do controlador no descarregamento do elemento, o Arduino é conectado a um computador, o qual armazena os dados adquiridos pelos sensores de corrente, tensão e temperatura. Sistemas de condicionamento de sinais e proteção são incluídos [22] de forma a garantir a medição adequada do elemento. A leitura da temperatura é realizada através de um sensor LM35 [23] com seu corpo em contato diretamente com o elemento. A aquisição dos dados é feita com a ferramenta PLX-DAQ [24] que realiza a aquisição dos dados lidos pela porta serial do microcontrolador e salva em arquivo de texto.

Questões de segurança como descarga profunda e excesso de temperatura são controladas através do microcontrolador para que não ocorram danos ao elemento em teste. Foram inseridas ao circuito algumas chaves *ON/OFF* que controlam a alimentação geral do circuito e início e fim manual do teste.

Foram inseridos três *LEDs* com função de indicar o estado do circuito no momento: enquanto a descarga é realizada tem-se o *LED* verde ligado. Caso a descarga apresente alguma falha, o processo é interrompido e o *LED* vermelho pisca. Ultimamente, em caso de teste completo sem falhas, o *LED* amarelo permanecerá aceso.

## IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O circuito implementado experimentalmente (Fig. 7) é dividido em partes modulares, onde uma é responsável pelo controle e outra pela conexão com o elemento em teste e descarga do mesmo.

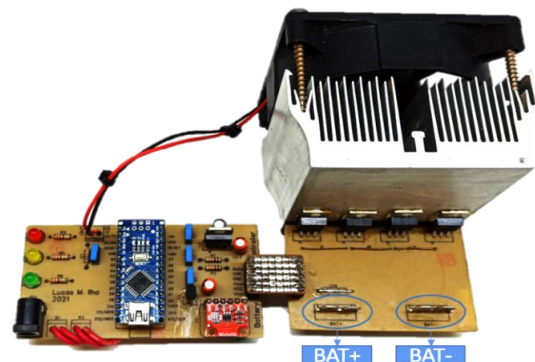


Fig. 7. Circuito Implementado. A placa da esquerda é o módulo de controle, enquanto a placa da direita é o módulo descarregador. Fonte: Autor.

O módulo de descarga pode ser reprojeto para comportar diferentes correntes de descarga sem a necessidade de alterar o módulo de controle. Para aumentar a corrente de descarga pode-se refazer o *layout* da placa adicionando *MOSFETs* em paralelo afim de reduzir a resistência do circuito, assim como também é possível utilizar outros modelos de *MOSFETs* sem alterar o *layout*. Além disso, se faz necessária a troca do sensor de corrente para um modelo que comporte correntes mais altas.

Para a validação do funcionamento do descarregador utilizou-se a bateria do modelo 5 OPzS 250 da empresa EnerSystem, com capacidade nominal de 250 Ah. Conforme o manual do elemento, para efetuar a descarga com corrente menor que a nominal de 25 A durante 10 horas, deve-se definir a tensão mínima (1,75 V, 1,80 V ou 1,85 V) e então observar a tabela, ou equivalente, que define a capacidade da bateria em relação ao tempo de descarga do elemento [6]. Define-se então para teste do protótipo uma tensão mínima de 1,85 V e obtém-se a partir da tabela presente no manual uma capacidade de 260 Ah. Isso é equivalente a realizar a descarga em 13 A durante 20 horas.

Como validação da operação em malha fechada, é apresentada na Fig. 8 a resposta do sistema em malha fechada para um degrau na referência de corrente de 13 A para 14 A, porém como o tempo para observar o comportamento é longo, ocorre uma adição de aproximadamente 300 mA no valor da corrente lida no osciloscópio que é considerado um erro de medição. Esse erro não está presente ao aproximar a visualização da forma de onda, pois assim tem-se mais precisão na amostragem do equipamento.

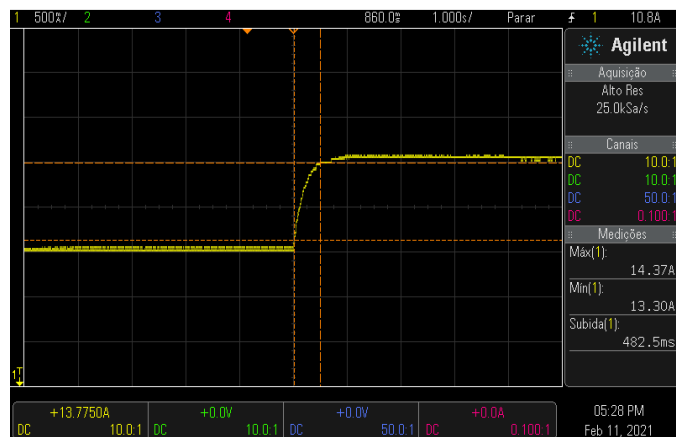


Fig. 8. Resposta medida do osciloscópio para o sistema em malha fechada. Fonte: Autor

Os resultados da curva de descarga plotada a partir dos dados adquiridos pelo sistema descarregador são mostrados na Fig. 9. Para melhor visualização foi feito a interpolação polinomial dos dados.

A comparação entre os resultados obtidos pelo sistema carregador e a medição a partir de um voltímetro de bancada calibrado mostra que, para fins de qualificação da capacidade de descarga e extração da curva de descarga de um elemento, o equipamento desenvolvido demonstra-se adequado, cumprindo o propósito do mesmo.

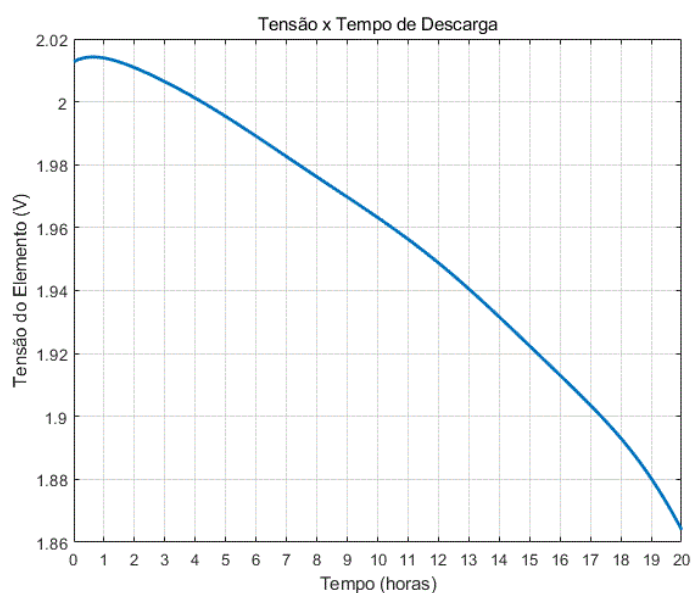


Fig. 9. Gráfico da descarga do elemento sob teste. Fonte: Autor.

Também, a partir desses resultados conclui-se que o elemento sob teste está em plena condição de uso, com sua capacidade acima de 100% visto que não alcançou a tensão mínima de 1,85V no tempo de 20 horas. Esse comportamento está de acordo com o esperado, uma vez que o elemento testado é um elemento relativamente novo que não foi exposto a condições ambientais desfavoráveis e nem mesmo a ciclos de descarga.

## V. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentado o projeto e desenvolvimento de um descarregador de baterias de chumbo-ácido com reduzido volume e aquisição de dados. Após projeto e aplicação prática foi possível observar os resultados experimentais, que apontaram o correto funcionamento do descarregador, do sistema de realimentação, do sistema de aquisição de dados e observou-se a baixa ondulação da corrente de descarga. Por fim, verificou-se que o elemento sob teste estava em boas condições de uso, confirmado através da curva de descarga do mesmo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CEEE-GT que, através do projeto intitulado "Projeto e Desenvolvimento do Carregador de Banco de Baterias para Emprego em Subestação de Energia Elétrica", forneceu incentivo financeiro para realização da pesquisa e também realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- [1] Chen, A. e Sen, P.K (2016). Advancement in battery technology: A state-of-the-art review. IEEE Industry Application Society, *52<sup>nd</sup> Annual Meeting: IAS 2016*, 1-10. doi:10.1109/IAS.2016.7731812.
- [2] B. Isidor, Batteries in a Portable World A Handbook on Rechargeable Batteries. Cadex Electronic Inc, 2011.
- [3] Carneiro, R. L. Aspectos essenciais das Baterias Chumbo-Ácido e Princípios Físico-Químicos e Termodinâmicos do seu Funcionamento Rev. Virtual Quim., 2017, vol. 9 no.3, 889-911. Data de publicação na Web: 7 de junho de 2017.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14199: Acumulador chumbo-ácido estacionário ventilado – Ensaio, mar. 2014.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14205: Acumulador chumbo-ácido estacionário regulado por válvula - Método de ensaio, Jun. 2018.
- [6] EnerSys PowerSafe OPzS. Unibat. Disponível em: <<https://unibat-sa.gr/en/product/enersys-powersafe-opzs/>>. Acesso em: 08 de jan. de 2021.
- [7] EnerSys PowerSafe OPzV. Power-Solutions. Disponível em: <<https://www.power-solutions.com/batteries/enersys/enersys-powersafe-opzv>>. Acesso em: 08 de jan de 2021.
- [8] Wilson, M. Novas Tecnologias para Avaliação de Baterias. Dissertação (Curso de Mestrado Profissionalizante em Desenvolvimento de Tecnologia do IEP/LACTEC). Curitiba, 2007.
- [9] Cipriani, J. P. Modelagem e Extração Paramétrica de Baterias de Chumbo-Ácido para Desenvolvimento de Conversores. CBA Nov. 2020.
- [10] Rangel, Thalles. Estudo dos métodos não convencionais para determinação do estado de carga e saúde em baterias VRLA. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/p/arquivostccs/442.pdf>>. Acesso em: 13 de fev. De 2021.
- [11] Como Aumentar a Vida Útil da Bateria. STA-eletronica. Disponível em: <<https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-recarregaveis-em-geral/como-aumentar-a-vida-util-da-bateria#:~:text=o%20que%20%C3%A9%20a%20vida,80%25%20de%20sua%20capacidade%20nominal.>>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.
- [12] Descarregador de baterias Amperis. Disponível em: <<https://www.amperis.com/pt/produtos/misc/descarregadores-baterias/bdx>>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.
- [13] Descarregador Portátil 150 A. Disponível em: <<https://luffe.com.br/produtos/descarregadores-de-baterias/descarregador-de-baterias-portatil>>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.
- [14] Lima, R.P. MONITORAMENTO DA DESCARGA DE BATERIA COM O USO DE MICROPROCESSADOR ARM. Disponível em: <<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005184.pdf>>. Acesso em: 13 de fev. de 2021.
- [15] megaAVR® Data Sheet. Disponível em: <<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061B.pdf>>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.
- [16] Arduino Nano (V2.3) User Manual. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoNanoManual23.pdf>>. Acesso em: 21 de jan. de 2021
- [17] The MOSFET. Electronics-tutorials. Disponível em: <[https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran\\_6.html](https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_6.html)>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.
- [18] Carga eletrônica ajustável (Dummy load). Disponível em: <<https://www.virtuatec.com.br/2013/08/carga-eletronica-ajustavel-dummy-load.html>>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.
- [19] Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kV RMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.
- [20] Explicando a Teoria PID. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/pid-theory-explained.html>>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.
- [21] PID Library. Disponível em: <<https://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary/>>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.
- [22] 12-Bit Digital-to-Analog Converter with EEPROM Memory in SOT-23-6. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/MCP4725.pdf>>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.
- [23] Sacco, Francesco. Buffers e Seguidores de Tensão. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/buffers-e-seguidores-de-tensao>>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.
- [24] LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.
- [25] PLX-DAQ. Disponível em: <<https://www.parallax.com/package/plx-daq>>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.
- [26] Acumulador Chumbo-Ácido Estacionário Ventilado PowerSafe OPzS. Disponível em: <<https://fccid.io/ANATEL/02064-06-01801/Manual-Powersafe-OPzS-Rev-161018/95370314-818D-4F54-848F-4AD9D5DD28E2/PDF>>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.