

Hardware and Software Development of an Open Source Battery Management System

G. R. Sylvestrin, H. F. Scherer and O. H. Ando Junior

Abstract—In order to guarantee adequate operating conditions in an energy storage system (SAE), extending its useful life, and offering safety to the user, a device known as the battery management system (BMS) is used. Most devices currently sold are restricted to operating characteristics of lithium battery technologies, which are different in different ways from the operation of other types of batteries that are studied and developed in laboratories. The restriction of use in other technologies could be circumvented through open platforms, allowing modifications in the BMS in order to adapt to the application technology. This adaptive characteristic is rarely found in commercialized devices, being fundamental when the objective of the BMS is linked to academic research that requires experimental steps. Therefore, this work proposes a low cost adaptive open source BMS prototype, capable of monitoring the variables of voltage, current, temperature and state of charge for a battery with up to 10 cells in series. The development includes hardware and software for the basic functioning of BMS functions. The proposed BMS was developed based on two cell technologies with: 18650 lithium ions, and sodium nickel chloride. The versatility of BMS in operating on these two technologies aims to demonstrate the adaptive capacity of the system. For remote monitoring, an interface was developed using the Node-RED and IBM Watson tools.

Index Terms—BMS, open source, energy storage, 18650 lithium ions, sodium nickel chloride.

I. INTRODUÇÃO

A utilização de baterias secundárias vem tendo destaque dentro das tecnologias de sistema de armazenamento de energia (SAE) aplicados a sistemas estacionários pelo seu potencial de redução de custo e características favoráveis, tais como: maturidade tecnológica e comercial, rápido tempo de resposta, densidade energética, eficiência, modularidade e escalabilidade [1]–[3]. Nos sistemas de energia, o emprego de baterias pode auxiliar na regulação de frequência, suporte de tensão, melhoria da qualidade de energia, realocação de energia, correção de carga, armazenamento de energia por geração distribuída e integração de energias renováveis [4], [5]. Na geração fotovoltaica e eólica, o uso de baterias pode mitigar a variabilidade da potência injetada [6].

Iniciativas na América Latina que integram SAE's ao

Submission date: May, 07th, 2020.

Giovane Ronei Sylvestrin, mestrando do Programa Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação - PGEEC, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, e-mail: giovane.sylvestrin@gmail.com.

Helton Fernando Scherer, pesquisador da Fundação Parque Tecnológico Itaipu - FPTI, email: helton@pti.org.br.

Oswaldo Hideo Ando Junior, professor do Programa Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia & Sustentabilidade - PPGIES, Universidade Federal da Integração Latino-Americana - UNILA, e-mail: oswaldo.junior@unila.edu.br.

sistema elétrico já são percebidas. No Brasil, em 2017, a ANEEL aprovou 23 propostas da chamada de P&D estratégico nº 21/2016 “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro”, destas propostas, 22 utilizavam baterias secundárias [7].

Para garantir que o SAE com bateria opere com eficiência, segurança e confiabilidade, utiliza-se um controlador conhecido pelo termo sistema de gerenciamento de bateria, ou pela sigla BMS (*Battery Management System*) [8]. O BMS é um sistema embarcado (*hardware e software*) com funções específicas sobre a bateria, entre elas ações de segurança, monitoramento e controle das variáveis (tensão, corrente, temperatura) e, estimação de parâmetros, como estado de carga (SOC) e estado de saúde (SOH) [9].

Grande parte do desenvolvimento de pesquisas na área de BMS é dedicado à tecnologia eletroquímica de células de lítio, impulsionado pelo setor de veículos elétricos [10], [11]. As opções de dispositivos atualmente fornecidos no mercado seguem esta tendência, conforme demonstra levantamento apresentado adiante. As possibilidades de adaptações desses dispositivos comercializados às características de operação de outras tecnologias de baterias estão restritas à condição *open source*, que em geral é dificilmente encontrada e está relacionada a um maior custo de aquisição.

As barreiras para modificações no BMS estão mais ligadas ao *software*, pela alteração de parâmetros de segurança, operação e inserção de novas funções, do que necessariamente em alterações consideráveis no *hardware* do controlador [12]. É possível deduzir pelos componentes, circuitos integrados e métodos comuns utilizados para medição de tensão, corrente e temperatura, que a diferença entre os níveis de operação de diferentes células pode ser condicionada em uma estrutura de *hardware* comum [13].

O emprego de sistemas de gerenciamento que permitam modificações é um fator relevante e fundamental para pesquisas acadêmicas desenvolvidas em laboratório. Uma plataforma aberta pode proporcionar o desenvolvimento de pesquisas relacionadas à estimação de SOC, degradação de bateria, análises de equalização, entre outros pontos que visam compreender o comportamento das tecnologias. Essas condições na fase de estudo das baterias possibilitam otimizar sua aplicabilidade e aumentar sua vida útil.

Diante disso, esta pesquisa propõe o desenvolvimento de um sistema embarcado adaptável para o monitoramento da tensão, corrente e temperatura. O protótipo foi desenvolvido visando ser uma ferramenta laboratorial para estudos e desenvolvimento de algoritmos para BMS podendo ser aplicado em bateria de lítio ou sódio composta por até 10 células em série, sem arranjos paralelos.

O sistema embarcado para fins laboratorial é composto por *hardware e firmware* aberto para adequação e alteração do BMS. Adicionalmente, desenvolveu-se *software* supervisor com interface de usuário que possibilita o monitoramento remoto. A adaptabilidade da ferramenta é avaliada no uso de célula de íons de lítio e célula de sódio-cloreto de níquel (Na-NiCl₂), que apresentam parâmetros de tensão, corrente e temperatura consideravelmente distintos. Para garantir a capacidade de modificações, o BMS proposto foi desenvolvido em plataforma aberta em *hardware e software*.

O protótipo desenvolvido trata-se de um modelo de bancada que tem como objetivo ser uma ferramenta didática para o estudo e desenvolvimento de novos algoritmos aplicados a BMS aliando o baixo custo em relação aos modelos comerciais e ser uma topologia *Open Source*. Permitindo que o desenvolvimento possa contribuir para a disseminação e conhecimento dos BMS, permitindo a criação de bancadas, para estudos de baterias e pesquisas correlatas, com componentes de fácil acesso e consagrados no ambiente acadêmico.

Destaca-se que as estimativas de parâmetros como SOC e SOH abrangem conceitos que necessitam de um desenvolvimento apropriado. Portanto, são melhores apresentados em artigos dedicados a estes temas, conforme será visto na seção de estado da arte. Deste modo, os algoritmos para estimativa de SOC e SOH não foram abordados neste trabalho, cujo foco é obter um sistema embarcado, que ao ser reproduzido pode receber implementações que possam realizar essas estimativas, entre outras funções.

De acordo com a pesquisa realizada, desenvolvimento de BMS para fins didáticos e de pesquisa trata-se de um tema pouco explorado e quando explorado muitas vezes restritos a aplicações móveis, algoritmos de estimativa e a concepção de produtos destinados a clientes finais. Por fim, cabe destacar que o sistema proposto está em contínuo desenvolvimento para aumentar sua capacidade de gerenciamento e complexidade das funções embarcadas.

Para organização deste trabalho, na seção II é apresentada uma breve situação do estado da arte, na seção III são apresentados os desenvolvimentos em *hardware e software* utilizados no BMS proposto. Na seção IV as etapas desenvolvidas em *hardware, software e interface do usuário* são demonstradas durante a operação do protótipo. A seção V finaliza o trabalho com as conclusões obtidas, contendo ao final um link de acesso aos detalhes do sistema com a presença de diagramas elétricos, materiais, especificações, e algoritmos implementados, permitindo assim a reprodução plena do BMS.

II. ESTADO DA ARTE

Uma pesquisa nos artigos publicados na *IEEE Latin America Transaction* revelou apenas 7 publicações a respeito de armazenamento de energia, voltadas aos temas de otimização [6], [14], análises de impactos na implantação no sistema de energia e sua viabilidade [3], [5], [15], e tecnologias de integração a fontes de geração renovável [16], [17]. Destaca-se que não foram observadas publicações sobre sistemas de gerenciamento de baterias, o que, portanto,

demonstra que esse trabalho pode contribuir com o tema na revista.

Realizou-se um amplo levantamento do estado da arte sobre BMS, utilizando um processo sistemático de obtenção de portfólio bibliográfico conhecido por Proknow-C [18]. Aonde, foram mapeadas e consideradas todas as publicações realizadas em até 10 anos nas bases de dados *Scopus e Web of Science*, totalizando um conjunto inicial de 10233 artigos, que após os processos de filtragem resultaram em 88. Nesses artigos estão presentes desenvolvimentos referentes a estimativa do SOC, estado de saúde (SOH), balanceamento, e linhas referentes a desenvolvimento do BMS quanto a *hardware e software*. Alguns dos artigos que apresentam uma visão sobre as funções básicas de um BMS, conceitos, características construtivas e de operação, possuindo assim, relação com este trabalho são apresentadas na Tabela I.

TABELA I
ESTADO DA ARTE SOBRE BMS: DESENVOLVIMENTO E CARACTERÍSTICAS

Artigo	Resumo	Ref
<i>A new BMS architecture based on cell redundancy</i>	Propõe uma arquitetura de BMS para baterias de lítio e aplicação em veículo elétrico de pequeno porte. Utiliza redundância de célula para permitir que uma determinada célula seja desconectada da bateria para balanceamento.	[19]
<i>Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles</i>	São apresentadas as funções e requisitos principais de um BMS nas aplicações móveis em veículos elétricos, e na integração na geração distribuída. Destacando a importância, características, necessidades, arquiteturas e variações de um BMS.	[8]
<i>A Module-Integrated Distributed Battery Energy Storage and Management System</i>	Apresenta uma topologia modular de BMS que não necessita de equalizadores adicionais de bateria. Integra eletrônica de potência às células da bateria como um módulo.	[20]
<i>Advanced Battery Management and Diagnostic System for Smart Grid Infrastructure</i>	Apresenta o projeto e implementação de um BMS com topologia modular para cada bateria. O BMS é responsável por monitorar continuamente a tensão, corrente e energia. Com base no monitoramento é calculado o estado de carga.	[21]
<i>Experimental validation for Li-ion battery modeling using Extended Kalman Filters</i>	Propõe um BMS para as baterias de íons de lítio. A metodologia do filtro Kalman Estendido é empregada neste sistema não linear para determinar o SOC da bateria. Esta metodologia é implementada experimentalmente usando a linguagem C através do microcontrolador.	[22]
<i>The design of smart battery management systems</i>	Projeta um BMS para bateria li-ion de conexão série com base no chip X3100. O sistema pode realizar a medição, gerenciamento e proteção automática para vários parâmetros e realizar a troca de dados com o HOST pelo SMBus.	[23]
<i>Battery management system with dual-balancing mechanism for LiFePO4 battery module</i>	Apresenta um sistema de gerenciamento para a bateria LiFePO ₄ com mecanismo de balanceamento duplo. Parâmetros obtidos da bateria são transmitidos ao microcontrolador, que pode controlar o circuito de balanceamento de acordo com as informações da bateria recebida.	[24]
<i>A Self Adaptive BMS Based on CAN-bus for Power Li-ion Battery</i>	Apresenta o desenvolvimento de um BMS auto adaptável baseado no barramento CAN para a bateria li-ion. Ele é composto de módulos de amostragem, um módulo mestre e alguns dispositivos auxiliares.	[25]
<i>Hardware and software framework for an open battery management system in safety-critical applications</i>	Introduz uma estratégia flexível e extensível para uma estrutura de <i>software e hardware</i> para BMS que foi aplicado no desenvolvimento do foxBMS.	[12]
<i>Open, flexible and extensible battery management system</i>	Apresenta um BMS para baterias de íons de lítio com abordagem flexível na arquitetura de <i>software</i> . A estrutura da plataforma de <i>hardware</i>	[26]

<i>for lithium-ion batteries in mobile and stationary applications</i>	embarcada em configuração modular é apresentada. O design do <i>hardware</i> e o <i>software</i> são de código aberto e utilizados no foxBMS.
<i>Battery Management System Hardware Concepts: An Overview</i>	Apresenta características de <i>hardware</i> de BMS [13] para veículos elétricos e aplicações estacionárias. O objetivo é fornecer uma visão geral dos conceitos existentes nos sistemas de ponta de modo a permitir que o leitor estime o que deve ser considerado ao projetar um BMS para determinada aplicação.

Conforme pode ser visto, alguns trabalhos ainda que apresentem uma visão geral do BMS, estão focados nas funções de estimação de parâmetros e balanceamento, com alguns poucos que apresentam um desenvolvimento detalhado de *hardware* e *software*. Mesmo os artigos que contêm processos de desenvolvimento de um BMS, não possuem um objetivo didático, de estabelecer uma metodologia que possa ser replicada em laboratórios de ensino a um baixo custo.

Além do levantamento bibliográfico, foi realizada uma busca de dispositivos comercializados no mercado. Para isso foram contatadas empresas que dispunham de BMS's e solicitado a cotação dos dispositivos. Das empresas consultadas onde foi possível obter a cotação, as principais características dos dispositivos são apresentadas na Tabela II. A busca esteve restrita a BMS estacionário de nível residencial (baixa tensão).

TABELA II
BMS COMERCIAIS PARA SISTEMAS ESTACIONÁRIOS

Empresa	RoboteQ	Elithion	Fraunhofer IISB	Nuvation	Batrium	Energus
Modelo	1060BT	Vinci-LV	foxBMS LTC6813-1	NUV300-BC-16	WatchMon4	Tiny s516
Tecnologia	Lítio	Lítio e Pb-ácido	Adaptável	Lítio	Lítio	Lítio
Nº. de células	11-15	7-16 (lítio)	Até 18 (lítio)	Até 16	10-15	4-16
Strings	1	2-4 (chumbo)	Múltiplas (master + slaves)	36 (BMS + 1 controlador adicional)		1
Máx. Tensão	60 V	48 V	Até 5V/canal	60 V	65 V	60V
Software	Fechado	Fechado	Aberto	Fechado	Fechado	Fechado
Hardware						
Preço [US\$]	495	1930	2710	557	575	340

Destacam-se que grande parte destes dispositivos são destinados à tecnologia de lítio, com estruturas de *hardware* e *software* restritas a modificações. A faixa de custo levantada é ampla em virtude dos diferentes níveis de complexidade que os dispositivos apresentam, como por exemplo, os BMS's disponibilizados pela Elithion e Fraunhofer possuem alto grau de complexidade e robustez, destinados a aplicações que exigem uma maior autonomia do BMS. Outros dispositivos com menor preço cumprem as funções básicas de monitoramento e controle de células de lítio, com uma configuração simples.

De acordo com a pesquisa realizada tem-se que apenas o foxBMS é caracterizado como *open source*, permitindo implementações por parte do usuário, sendo inclusive

apresentado algumas características do BMS nos trabalhos [12], [26]. Entretanto, seu custo é elevado, e embora destinado também para pesquisas, seu campo atinge desenvolvimentos de alto nível em sistemas de armazenamento, contando com *hardware* e *software* compatíveis para este fim. Deste modo, se pensado como ferramenta didática de ensino na confecção de bancadas experimentais, possui complexidade além do necessário e barreiras financeiras.

Além das opções comercializáveis, existem diversas iniciativas de desenvolvimento de BMS *open source*, realizados por acadêmicos e profissionais na área. Esses projetos apresentam diferentes características construtivas e de operação, e buscam difundir de forma mais comunitária o conhecimento sobre BMS, com constantes melhorias. Algumas dessas opções podem ser encontradas em [27]–[29]. A proposta deste trabalho também busca facilitar o acesso ao desenvolvimento de BMS com menos recursos, fornecendo em língua portuguesa, material voltado para o ensino didático em laboratórios de ensino e pesquisa com abordagens que envolvem prototipação e implementação de algoritmos.

Além das opções comercializáveis, existem diversas iniciativas de desenvolvimento de BMS *open source*, realizados por acadêmicos e profissionais na área. Esses projetos apresentam diferentes características construtivas e de operação, e buscam difundir de forma mais comunitária o conhecimento sobre BMS, com constantes melhorias. Algumas dessas opções podem ser encontradas em [27]–[29]. A proposta deste trabalho também busca facilitar o acesso ao desenvolvimento de BMS com menos recursos, fornecendo em língua portuguesa, material voltado para o ensino didático em laboratórios de ensino e pesquisa com abordagens que envolvem prototipação e implementação de algoritmos.

III. DESENVOLVIMENTO DO BMS: HARDWARE, SOFTWARE E INTERFACE DO USUÁRIO

Para o desenvolvimento do BMS foram consideradas as células com características apresentadas na Tabela III. Em relação à temperatura de operação, a célula de lítio é mantida em ambiente climatizado do laboratório, em torno de 23°C. Na célula Na-NiCl₂ um controlador independente mantém sua temperatura em 270°C.

TABELA III
CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DAS CÉLULAS DE ENSAIO

	Li-ion 18650	Na-NiCl ₂
Tensão máx. de carga	4,2 V	2,67 V
Capacidade nominal	2,574 Ah	38 Ah
Tensão de corte	3,0 V	1,9 V
Corrente de fim de carga	0,026 A	0,3 A
Taxas de descarga	C/5 – 3C/5	C/10 – C/4
Temperatura	20 – 25°C	270°C

Quanto aos equipamentos utilizados para testes e validação do BMS, podem ser resumidos em duas bancadas, montadas de acordo com a célula gerenciada. Para a célula de Na-NiCl₂, utilizou-se da bancada *single-cell* apresentada na Fig. 1. A bancada é composta por uma fonte programável (NL1V10C20) responsável pelos processos de carga e descarga, dispositivos de medição – cDAQ-9178, NI-9205 (sensor de tensão ±10V, 16 bits), NI-9213; dispositivos de

proteção, sistema de aquecimento. A célula fica alocada no interior de uma caixa de madeira com isolamento térmico.

Para a célula de lítio utilizou-se do ciclador FE800GP da Flyever (Fig. 2), que apresenta um canal de medição de corrente, tensão e temperatura. A máxima corrente de carga e descarga equivale a 5A. Apresenta *software* próprio onde é possível estabelecer o modo de operação: corrente constante, tensão constante, corrente cíclico, rampa de corrente, rampa de tensão, ensaio completo.

Diferente das exigências da célula de NaNiCl_2 , para a célula de lítio é possível reproduzir os ensaios sem a necessidade específica de um ciclador, inserindo adaptações na bancada. Para o processo de carregamento da célula poderia ser utilizado uma fonte DC estabilizada com tensão fixa em 4,20V e corrente máxima limitada em C/5, ou então fazendo uso de dispositivos projetados para esse fim, como o CI TP4056. Para o processo de descarga poderiam ser empregados conjuntos de cargas resistivas. Para essas adequações são necessárias medidas de segurança utilizando relés e disjuntores, contando com o controle realizado pelo BMS para coordenar a troca entre os modos de carga e descarga.

O BMS desenvolvido foi conectado em paralelo às bancadas, acompanhando os parâmetros da célula em ciclo de ensaio juntamente com o sistema próprio da bancada que estava sendo utilizada. As informações puderam ser comparadas e assim validar as medidas realizadas pelo dispositivo projetado. O acesso aos dados de operação do BMS foi implementado via interface do usuário fazendo uso das ferramentas Node-RED e IBM Watson para oferecer monitoramento remoto do sistema.

A seguir são apresentados os desenvolvimentos e características em *hardware*, *software* e interface. Detalhes de desenvolvimento, bem como algoritmos implementados podem ser consultados em link disponibilizado ao final da conclusão deste artigo.

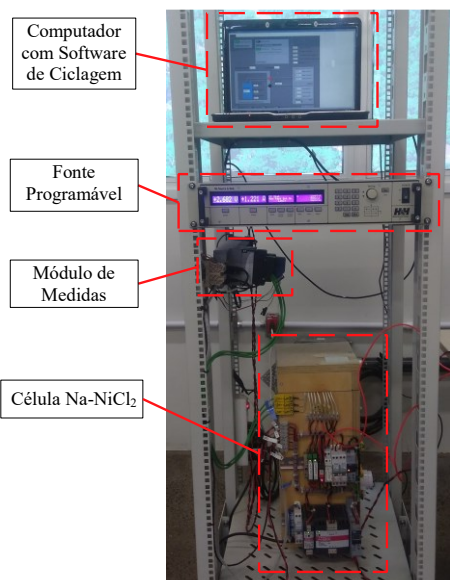


Fig. 1. Bancada experimental célula Na-NiCl_2 .

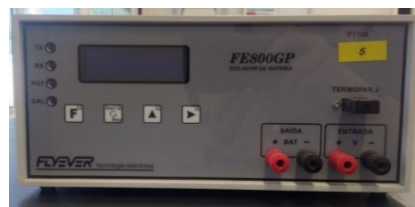


Fig. 2. Ciclador Flyever utilizado na célula de lítio 18650.

A. Hardware

Um esquema geral do *hardware* desenvolvido para o BMS é mostrado na Fig. 3. Conforme indicado, os principais blocos que constituem o sistema são: microcontrolador, aquisição de tensão, sensor de corrente, termopares, gravação de dados, e interface do usuário.

O microcontrolador utilizado como fonte de processamento e comunicação periférica do protótipo é o ATMEL ATmega2560, presente na placa de desenvolvimento Arduino MEGA 2560. O microcontrolador de 8 bits apresenta memória Flash de 256kB, 8kB de RAM, 4kB de EEPROM e *clock* de 16 MHz [30]. A placa de desenvolvimento contém 54 pinos de entrada e saída digitais, 16 entradas analógicas, e 4 portas de comunicação serial. A placa apresenta baixo custo comparada a outros modelos concorrentes, além de protocolos de comunicação comuns a muitos módulos e componentes, sendo alguns dispositivos projetados para serem facilmente integrados. Destaca-se ainda a característica *open source* de *hardware* e *software*, facilitando o acesso aos layouts e diagramas.

Para a aquisição de tensão utilizou-se de circuitos divisores de tensão, totalizando um total de 10 canais de leitura de tensões individuais para células em série. O sistema de aquisição é formado por resistores de precisão de 1%, capacitores de 220nF para estabilidade de medição, multiplexadores (CD4051), amplificador operacional no modo *buffer* (LM358) e conversor analógico digital (ADC). Dois multiplexadores analógicos de 8 canais cada foram utilizados para percorrer os sinais dos divisores de tensão. No modo padrão apenas um multiplexador está habilitado, fornecendo 8 canais de medição. A saída de cada multiplexador passa por um *buffer* para isolar o circuito de potência e garantir o casamento de impedância com o ADC.

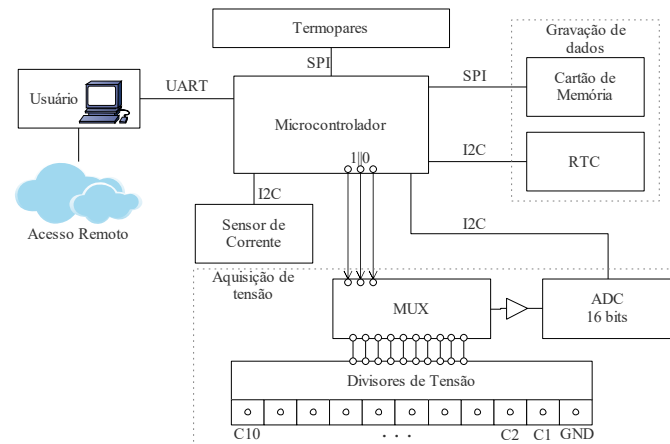


Fig. 3. Esquema geral da topologia de hardware.

O ADC externo corresponde ao módulo ADS1115, com resolução de 16 bits, comunicação I2C, 4 canais e ganho

programável. O ADS1115 teve o objetivo de melhorar a precisão das medidas, tendo em vista que o ADC interno da placa Arduino possui resolução de 10 bits, com degrau de conversão de 4,88mV (1bit), enquanto que o ADS1115 pode ser programado, por exemplo, com degrau de conversão de 0,125mV (1bit). O uso ADS1115 garante uma precisão recomendada pela literatura, onde tradicionalmente a resolução de conversores ADC devem ser na ordem de 12 a 16 bits para uma precisão de 1mV [13].

Para a aquisição de corrente, dois sensores foram utilizados em função da capacidade de medição, um para cada célula: INA219 (lítio 18650), ACS712 (Na-NiCl₂). O sensor INA219 utiliza do método de resistor shunt para medir correntes de até 3,2A (bidirecional), contando com interface I2C, ADC interno de 12 bits e precisão de 0,5%. O sensor ACS712 é baseado no efeito Hall para medição de corrente, fornecendo isolamento galvânico. O modelo utilizado foi o ELCTR-30A-T, com capacidade de medir até 30A (bidirecional) e, saída analógica com sensibilidade de 66mV/A. Na tentativa de leituras mais precisas, utilizou-se ADS1115 para leitura dos sinais, com um arranjo semelhante ao utilizado no condicionamento de sinal na aquisição de tensão.

Para aquisição da temperatura utilizou-se do módulo MAX6675 com conexão para termopar tipo K, interface SPI, faixa de medição entre 0°C e 700°C com erro de +/- 5°C (ADC de 12 bits, 0,25°C de precisão). Foram utilizados 8 módulos MAX6675 para implementar 8 de medição de temperatura. Para seleção do canal utilizou-se do CI CD4051 na função de *demux*, juntamente com resistores *pull-up*.

Para analisar os dados de operação do protótipo, foi utilizado de circuito *datalogger*. Dados operativos foram periodicamente gravados em arquivo de texto (.txt) e armazenados em cartão de memória removível. O módulo cartão SD, com interface SPI, foi utilizado para armazenar fisicamente o cartão de memória e executar a gravação. Para adicionar a data e hora nas medidas gravadas utilizou-se de um relógio em tempo real baseado no CI DS3231, com interface I2C.

A versão de teste em *protoboard* do protótipo é apresentada na Fig. 4, onde são destacados os circuitos mencionados anteriormente. Os testes executados apontaram funcionamento correto dos circuitos, com alguns problemas relacionados a mal contato e ruídos, tipicamente encontrado no uso de *protoboard*. Estes problemas foram resolvidos com a passagem do protótipo para a versão em placa de circuito impresso (PCB), tornando definitiva a estrutura de *hardware* do protótipo.

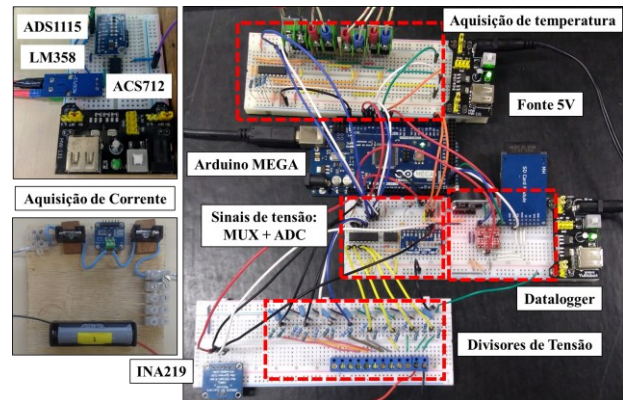


Fig. 4. Protótipo do BMS na fase de testes em protoboard.

O BMS em sua versão final foi composto por duas PCB's: uma contendo a aquisição de tensão, processamento de sinais, e *datalogger* – placa principal; e a segunda responsável apenas por medidas de temperatura – placa de temperatura. O desenvolvimento e projeto das placas foram realizados no *software* KiCad.

A placa principal, é apresentada na Fig. 5. Compreende a uma PCB de dupla camada, com trilhas de sinal com largura de 0,5mm, alimentação principal de 2,54mm, alimentação via Arduino de 0,8mm, isolamento mínimo de trilha de 0,4mm, e dimensões de 125mm x 100mm. Foi confeccionada em FR4 (fibra de vidro e epóxi) com espessura de 1,6mm, acabamento de superfície em HASL (*hot air solder leveling*), e espessura de cobre de 1 oz (0,0347mm). Nesta placa são conectados a maioria dos pinos ao microcontrolador, contendo também pinos extras de alimentação, comunicação I2C e SPI, em caso de modificações e expansão futura, como por exemplo adição de sensores. Os canais não utilizados do ADC ADS1115 (A1 e A2) estão disponíveis para serem conectados por uma nova aplicação, ou substituir o segundo multiplexador e receber os últimos dois canais de aquisição de tensão. A alimentação da placa pode ser baseada na fonte de 5V com entrada para conector USB e P4, com tensão CC de entrada entre 6,5V e 12V; ou então através de outra fonte qualquer em 5V conectada em um dos dois bornes disponíveis.

A placa de temperatura com 8 canais de aquisição é apresentada na Fig. 6, composta por duas camadas, as trilhas de sinais apresentam largura de 0,5mm, enquanto as trilhas de alimentação são de 1,5mm. O isolamento mínimo de trilha foi de 0,5mm. A PCB apresenta dimensões de 99mm x 77mm. As características de confecção são as mesmas da placa principal. Os pinos presentes na placa são para a comunicação SPI (CS, SO, SCLK) e configuração do *demux*. A alimentação segue o mesmo padrão da PCB principal.

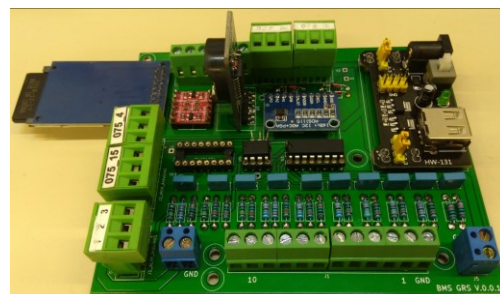


Fig. 5. PCB principal.

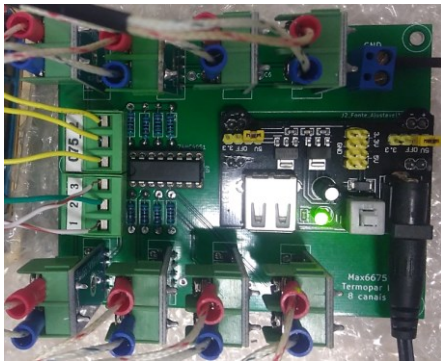


Fig. 6. PCB para aquisição de temperatura.

O custo aproximado para aquisição de componentes para uma unidade de *hardware* do BMS proposto foi de cerca de US\$ 125,00. Com os processos de prototipação para as PCB's principal e de temperatura, considerando importação e as taxas, o custo unitário do BMS de cerca de US\$ 149,00. Embora o sistema projetado seja limitado a aplicações laboratoriais de pesquisa/ensino em bateria, não estando ainda na etapa de uso comercial, seu custo de montagem é consideravelmente menor. Em comparação com os dispositivos comercializados apresentados na Tabela II, representa cerca de 44% do valor do BMS Tiny s516, que apresenta características semelhantes (monitoramento de apenas um arranjo em série), e 5,5% do modelo mais complexo – foxBMS.

Os diagramas elétricos dos sistemas de aquisição de dados de tensão, corrente e temperatura que compõem as placas principal e de temperatura, bem como especificações do *hardware* estão disponíveis para *download* no link apresentado ao final da conclusão deste trabalho.

B. Software

Em síntese o algoritmo base desenvolvido pode ser representado pelo esquema da Fig. 7. Após a inicialização das bibliotecas, variáveis (medições e estimação) e comunicação, são tomadas as medidas da tensão, corrente e temperatura. As medidas passam por laços condicionais para verificação de segurança, caso algum parâmetro esteja em desacordo a desconexão de segurança ocorre. Embora fosse possível estabelecer desconexão utilizando o BMS, as bancadas já forneciam tais condições, portanto, a função de desconexão foi desabilitada durante os ensaios. O sinal da corrente medida define se a célula se encontra em processo de carga ou descarga/repouso (OCV). Em caso de a corrente indicar o processo de carga, o SOC é estimado apenas pela contagem de Coulomb, sempre verificando se condições de bateria totalmente carregada foram alcançadas. Caso a corrente seja nula (circuito aberto) ou positiva (descarga), o SOC é estimado de acordo com o método de filtro de Kalman estendido (EKF) e, contagem de Coulomb. A implementação do EKF foi baseada nos trabalhos de [31]–[35], utilizando um modelo de circuito elétrico equivalente simples e promovendo modificações de acordo com as características das células utilizadas. No bloco de variáveis são atualizados todos os parâmetros calculados e medidos a cada passo de execução do programa. Algumas das variáveis e dados de interesse são então enviadas por comunicação serial ao computador do usuário, e gravados no módulo de cartão de memória. No

computador do usuário, os dados são encaminhados para a interface de monitoramento.

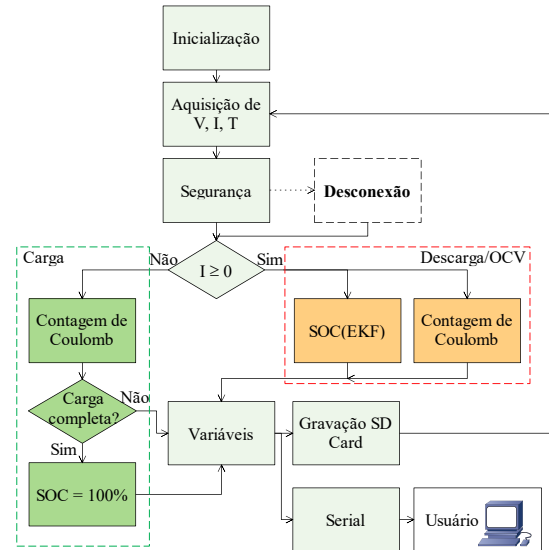


Fig. 7. Esquema do algoritmo desenvolvido para o BMS.

A versão atual do algoritmo foi desenvolvida na IDE Arduino v1.8.5, e possibilita o monitoramento individual de tensão de até 10 células em série, monitoramento de corrente utilizando sensor INA219 ou ACS712, e monitoramento de 8 canais de temperatura. Os dados gravados apresentam informações de tempo (hora e data), parâmetros monitorados e estimados no algoritmo. O algoritmo contém implementação para interface serial que possibilita o monitoramento utilizando *prompt* da IDE (taxa de 115200 bits por segundo), ou então via interface desenvolvida no *software* Node-RED v1.0.6 e plataforma IoT IBM Watson. Com relação à ocupação de memória da placa de desenvolvimento, utilizou-se 47990 bytes (18%) do espaço de armazenamento para programas, e 1871 bytes (22%) de memória dinâmica associadas às variáveis globais.

Um esquema da estrutura desenvolvida no algoritmo é apresentado na Fig. 8. Na base tem-se a declaração das bibliotecas e variáveis, com os blocos seguintes referindo-se as funções padrões na programação do Arduino através da IDE. Na função *setup()* são inicializados protocolos de comunicação e dispositivos periféricos, sincronização de data e hora do RTC, e definição de pinos de entrada, saída, e níveis lógicos. Na função *loop()* está o processo de repetição com as funções de aquisição de dados (medidas em um intervalo de tempo de 2s e posterior cálculo da média intervalar), as funções de estimação do SOC, a possibilidade de edição da data e hora no RTC, a gravação de dados no cartão SD, e a comunicação serial para entrega de dados do BMS até a interface gráfica do usuário.

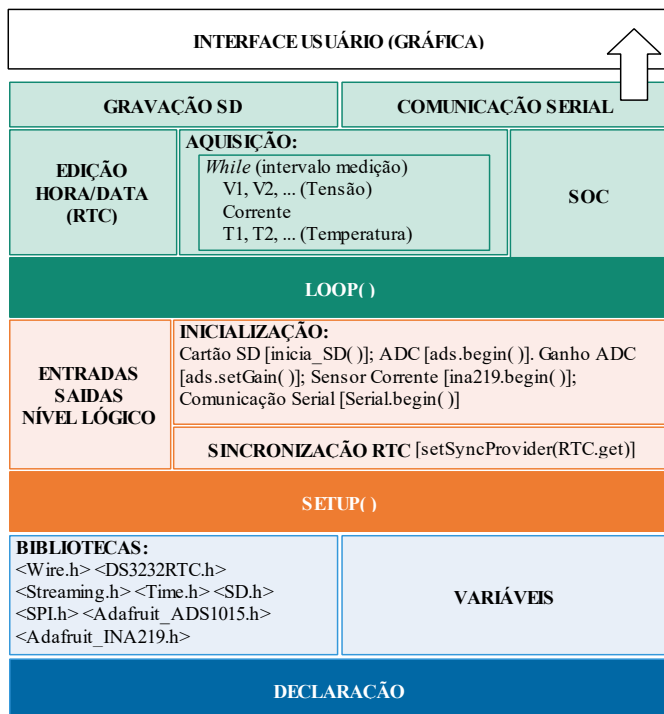


Fig. 8. Estrutura generalizada do algoritmo implementado.

Nos códigos comentados (link apresentado ao final da conclusão) são destacadas as diferentes etapas do algoritmo, finalidade das bibliotecas e os métodos para aquisição de corrente, tensão, temperatura, estimação do SOC. Baseada nesta estrutura outras funções podem ser adicionadas, como uma estimativa do SOH baseado na capacidade de descarga completa em comparação à capacidade nominal, além de sinais para comunicação com relés para processos de chaveamento e segurança.

Com relação a função de estimação do SOH, destaca-se que, embora, possa ser obtida pela capacidade, esse método pode induzir a erros devido a não linearidade do comportamento de uma bateria frente a variações de temperatura, envelhecimento, taxas de carga/descarga, modos de operação. Portanto, optou-se por realizar um estudo a parte como continuidade desta pesquisa usando o BMS laboratorial.

C. Interface do Usuário

A interface do usuário é responsável por fornecer informações de operação do sistema. O monitoramento desenvolvido pode ser sintetizado no esquema da Fig. 9. Conforme a figura, o usuário tem acesso ao sistema monitorado por diferentes meios, com informações que podem ser visualizadas através do acesso à arquivos ou em tempo real por meio de *dashboards*.

Os arquivos que contém os dados de operação compreendem ao sistema de gravação (*SD card*), localizado no próprio BMS, e também a dados gravados em arquivo de texto em um computador conectado ao BMS. Para o monitoramento em tempo real, com os dados do BMS processados via algoritmo desenvolvido no Node-RED, existem duas formas de visualização: (i) local, diretamente do computador do usuário; (ii) remota, utilizando uma conexão com internet para envio dos dados para a plataforma IBM Watson.

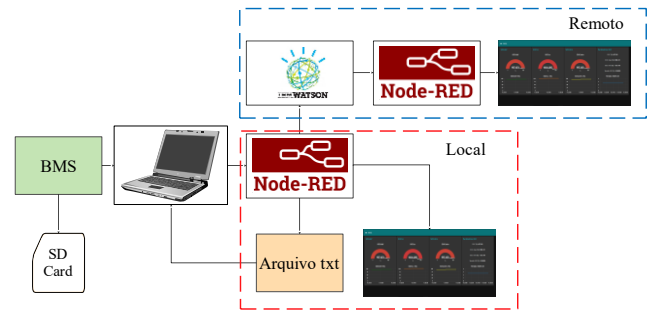


Fig. 9. Visão geral da interface do usuário.

O monitoramento remoto tem a função de possibilitar ao usuário acompanhar o funcionamento do sistema mesmo não estando presente no local, podendo identificar condições de segurança e estado do SAE. O Node-RED é empregado em ambas as interfaces de monitoramento em tempo real (local e remoto), sendo na versão remota instalado em nuvem na plataforma da IBM. É uma ferramenta gratuita de programação, com código aberto, que permite conectar dispositivos de *hardware*, APIs e aplicações online através de uma linguagem gráfica baseada em nós, fluxo e *drag-and-drop* [36].

No monitoramento local, o computador onde é conectado o BMS deve ter instalado o *software Node.js*, e através do *prompt* de comando executar a ferramenta Node-RED. Uma vez executada, o acesso ao editor de programação ocorre no navegador de internet por meio do endereço *localhost:1880*. Utilizando esta interface foi possível receber os dados de operação, processar, e mostrá-los localmente em um *dashboard*. Para facilitar o processamento dos dados do BMS, as informações de operação foram enviadas no formato JSON.

No monitoramento remoto a plataforma Cloud IBM fornece uma estrutura baseada na computação em nuvem, com recursos gratuitos e pagos. Dentro do Cloud IBM, foi utilizado o recurso IBM Watson IoT Platform (banco de dados com comunicação MQTT), e o aplicativo do Cloud Foundry Node-RED (Node-RED em nuvem). A plataforma Watson pode ser assinada de forma gratuita (plano Lite), com limite de 200MB de troca de dados mensais.

No IBM Watson foi criado um dispositivo (BMS001) contendo numeração de identificação e *token* de autenticação, no qual o fluxo do Node-RED local se conecta, enviando os dados JSON na forma de um Evento, nomeado de *Monitor*. Para conectar o IBM Watson ao Node-RED Cloud e permitir a troca de dados do evento recebido, foi necessária a criação de uma API, que também vai apresentar identificação e é registrada no nó de entrada do Node-RED Cloud. No Node-RED em nuvem, os dados disponibilizados pelo IBM Watson são condicionados de forma similar a estrutura de monitoramento local, replicando o *dashboard*, acessível por um link por qualquer dispositivo com acesso à internet.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o protótipo na versão PCB, realizou-se a verificação do sistema de medição (tensão, corrente e temperatura) através da comparação com valores de referência. Para as medidas de tensão e temperatura utilizou-se como valores de referência as medidas do multímetro Yokogawa TY720 (resolução de 0,0001V, precisão de 0,025%), enquanto que a corrente foi

avaliada com as medidas das bancadas de ciclagem das células de íons de lítio (resolução de 0,001A) e Na-NiCl₂ (resolução 0,001A).

Na Tabela IV são apresentadas as medidas de verificação para o Canal 1 de tensão, canal utilizado durante os ensaios de SOC deste trabalho. Em geral o erro de medição está atrelado à terceira casa decimal, com precisão semelhante à exigida nos modelos comerciais que apresentam uma precisão absoluta de 1mV com resolução de ADC na ordem de 12 a 16 bits [13].

TABELA IV
VALIDAÇÃO MEDIDAS DE TENSÃO CANAL 1

Valor Ref. [V]	Valor Medido [V]	Erro Absoluto [V]
4,1995	4,1990	0,0005
3,8023	3,8026	0,0003
3,3811	3,3817	0,0006
3,0198	3,0205	0,0007
2,5879	2,5887	0,0008
2,3738	2,3749	0,0011
2,1949	2,1943	0,0006
1,9853	1,9846	0,0007

Na Tabela V são apresentadas medidas de validação dos demais canais, sem calibração. As medidas dos canais 4 e 5 indicam maior necessidade de ajuste.

TABELA V
VALIDAÇÃO MEDIDAS DE TENSÃO MULTICANAL (SEM CALIBRAÇÃO)

Canal	Valor Ref. [V]	Valor Medido [V]	Erro Absoluto [V]
1	2,3327	2,3323	0,0004
2	2,3327	2,3320	0,0007
3	2,3327	2,3320	0,0007
4	2,3327	2,3248	0,0079
5	2,3327	2,3295	0,0032
6	2,3327	2,3325	0,0002
7	2,3327	2,3315	0,0012
8	2,3327	2,3307	0,0020

As validações das medidas de corrente são apresentadas na

Tabela VI (INA219) e

Tabela VII (ACS712). Destaca-se a melhor precisão das medidas do sensor INA219, necessária em decorrência da capacidade de armazenamento da célula de lítio 18650. Embora o ACS712 apresente erros de maior magnitude, o nível de capacidade da célula de Na-NiCl₂ permite tais ordens de erros. Em ciclo completo de carga e descarga foram obtidos erros inferiores a 1% na contagem de capacidade.

As medidas de verificação dos sensores de temperatura são apresentadas na Tabela VIII. Os erros com relação ao uso do termopar tipo K no multímetro Yokogawa TY720 estão dentro da faixa informada pelo fabricante (+/- 5°C).

TABELA VI
VALIDAÇÃO MEDIDAS DE CORRENTE SENSOR INA219

Valor Ref. [A]	Valor Medido [A]	Erro Absoluto [A]
0,026	0,029	0,003
0,518	0,517	0,001
0,778	0,777	0,001
1,037	1,039	0,002
1,298	1,298	0,000
1,558	1,558	0,000

TABELA VII
VALIDAÇÃO MEDIDAS DE CORRENTE SENSOR ACS712

Valor Ref. [A]	Valor Medido [A]	Erro Absoluto [A]
0,976	0,968	0,008
1,999	1,956	0,043
3,002	2,944	0,058
4,187	4,153	0,034
5,394	5,382	0,012
6,291	6,327	0,036
7,558	7,542	0,016
8,981	8,955	0,026
9,454	9,425	0,029

TABELA VIII
VALIDAÇÃO MEDIDAS DE TEMPERATURA MULTICANAL

Termopar	Valor Ref. [°C]	Valor Medido [°C]	Erro Absoluto [°C]
1	24,0	26,5	2,5
2	24,0	25,5	1,5
3	24,0	26,5	2,5
4	24,0	26,0	2,0
5	24,0	25,7	1,7
6	24,0	25,2	1,2
7	24,0	25,0	1,0
8	24,0	24,7	0,7

Os resultados de monitoramento das células de análise pelo BMS desenvolvido são apresentados na Fig. 10, para célula de lítio, e Fig. 11, para a célula de Na-NiCl₂. Em ambos os ensaios o BMS proposto esteve sob condições de carga, descarga e repouso. No ensaio experimental da Fig. 10 a célula de lítio é monitorada inicialmente em circuito aberto (repouso, corrente nula) com seu SOC inicial desconhecido. Em determinado momento é iniciado um processo de carga (corrente negativa), separado em duas etapas, corrente constante até a tensão terminal de 4,20V, e então um processo de carregamento em tensão constante, com a diminuição gradual da corrente até o corte em 26mA, quando se atinge o carregamento total (SOC = 100%). Em seguida a célula é descarregada totalmente até a tensão de corte (3V) à uma corrente constante (positiva) de 1,56A. Os processos seguintes são de uma carga parcial e posterior repouso. Na Fig. 11 o ensaio inicia com a célula de Na-NiCl₂ totalmente carregada e então é submetido a dois processos de descargas pausadas, onde a primeira descarga ocorre a uma taxa de 7,6A, e a segunda com taxa de 9,5A. Entre as descargas há um período de repouso. A célula é descarregada até uma faixa de cerca de 40% do SOC e então inicia-se processo de carga incompleta, que rapidamente atinge o estágio de tensão constante (2,67V). Por volta do SOC de 55% a célula é colocada em repouso. O intervalo de gravação dos dados em ambos ensaios foi de 2s.

Na Fig. 10 é possível visualizar a correção da estimação do SOC durante o processo de carga completa presente no algoritmo. Como o SOC inicial era desconhecido, a contagem de Coulomb inicia por padrão supondo que a célula está totalmente carregada, entretanto, ao alcançar uma condição de carga completa, seu valor é corrigido, permitindo a correta estimação do SOC no processo de descarga seguinte. Junto com a contagem de Coulomb há também o método de estimação por EKF, que permite correções de estimação através do comportamento da célula em tensão de circuito

aberto e durante etapas de descarga. Na Fig. 11 o algoritmo apresenta a mesma estrutura apresentada no ensaio da célula de lítio, com modificações nos parâmetros devido às características da célula de Na-NiCl₂. É possível perceber a distinção considerável de características entre as duas células analisadas, com o perfil de curva de tensão da célula de Na-NiCl₂ mais plana, com pouca variação.

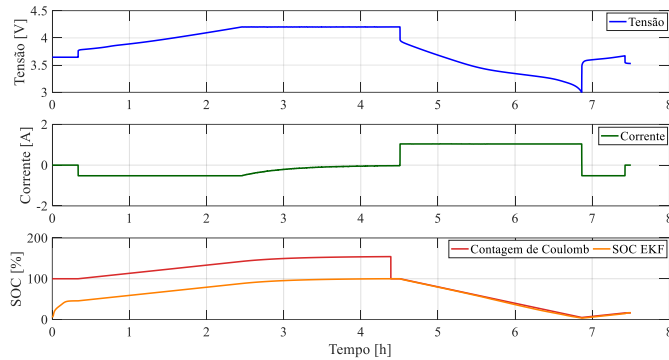


Fig. 10. Operação do BMS em ensaio na célula de íon de lítio 18650.

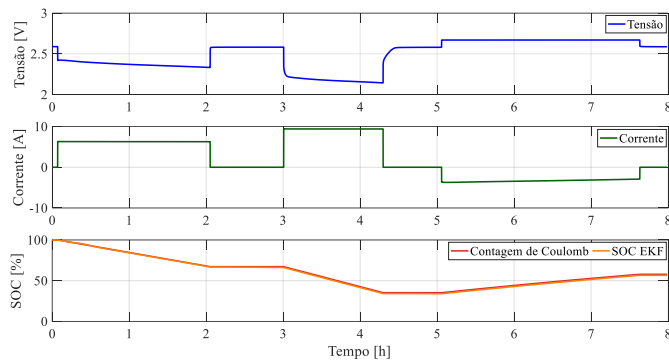


Fig. 11. Operação do BMS em ensaio da célula de Na-NiCl₂.

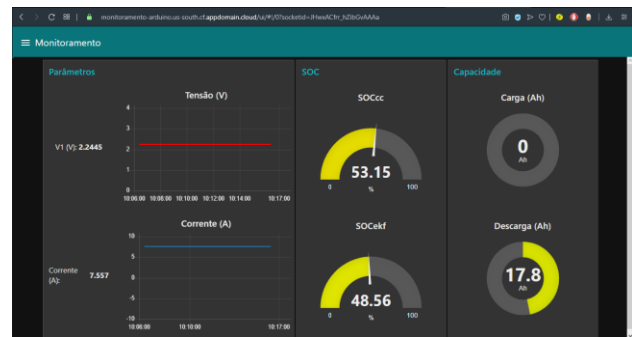
A interface do usuário para monitoramento remoto é apresentada na Fig. 12, onde o BMS estava conectado à célula de Na-NiCl₂. A interface apresenta duas abas padrão para seleção, selecionadas no canto superior esquerdo da tela, “Monitoramento” e “SOC”. Na seleção “Monitoramento” (Fig. 12a) são apresentadas as informações de tensão e corrente atuais, com gráficos que apresentam o histórico de medidas. São apresentadas também as informações do SOC, e as capacidades descarregadas e carregadas em Ah. Na seleção “SOC” (Fig. 12b) apresentam-se as informações mais detalhadas sobre a estimação do SOC, baseado nos métodos utilizados.

Como as temperaturas das duas células estavam controladas, não houve sua medição durante os ensaios de operação, entretanto, caso necessário em uma aplicação, uma terceira aba pode ser habilitada: Multicanal. Nesta aba são apresentados os dados de tensão e temperatura em oito canais do BMS. A Fig. 12c apresenta esta aba opcional, com a célula de Na-NiCl₂ conectada no canal 8 do BMS, e os sensores de temperatura em temperatura ambiente, com exceção dos 4 primeiros sensores, localizados na saída de ar de um computador para fins de distinção de medidas.

A gravação de dados diretamente no computador do usuário via monitoramento local é demonstrada na Fig. 13. Todas as variáveis mostradas na interface de monitoramento são

armazenadas. O usuário também pode consultar esses dados no cartão de memória do BMS, conforme apresenta a Fig. 14

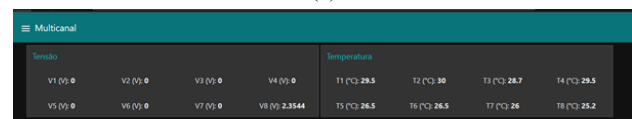
Com relação a capacidade de armazenamento do cartão SD, com intervalos de gravação de 2s, usa-se cerca de 65kB por hora. Em 1 ano de gravação de dados, equivale a 0,57GB, onde considerando uma unidade SD de 32GB, tem-se um tempo considerável até que se obtenha o total preenchimento da memória. Neste período deve ocorrer paradas para manutenção, onde o usuário pode retirar o cartão SD e fazer a limpeza dos dados, ou ainda realizar a substituição da unidade SD, o algoritmo será capaz de criar novamente o arquivo de dados. Em caso de total preenchimento do cartão SD o algoritmo exibe uma mensagem de erro no cartão na comunicação serial



(a)



(b)



(c)

Fig. 12. Dashboard para monitoramento remoto na célula de Na-NiCl₂: a) Aba monitoramento; b) Aba SOC; c) Multicanal (opcional).

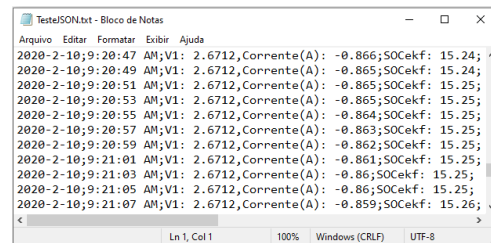


Fig. 13. Dados armazenados em arquivo de texto pelo monitoramento do BMS via Node-RED.

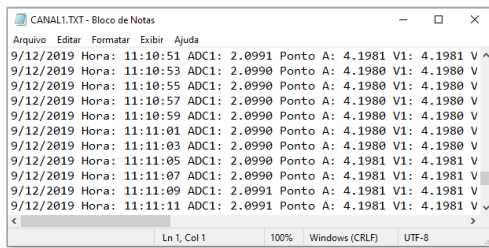


Fig. 14. Dados armazenados em arquivo de texto pelo monitoramento do BMS via sistema RTC e gravação.

V. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do sistema embarcado adaptável de baixo custo para gerenciamento de bateria, se mostrou indicado para atividades de pesquisas acadêmicas em laboratório. A placa de desenvolvimento Arduino MEGA 2560 se mostrou suficiente para embarcar funções de monitoramento e estimação, com uma ocupação de cerca de 20% da capacidade da placa, incluindo algoritmos de estimação em tempo real como o EKF. As placas projetadas (principal e temperatura) caracterizaram o BMS como multicanal para aquisição de tensão e temperatura, com oito canais cada. Para medição de tensão, dois canais ainda podem ser habilitados, totalizando a leitura de até 10 células em série.

A característica adaptável do sistema foi comprovada através da versatilidade em operar com dois tipos diferentes de células: íons de lítio 18650, e Na-NiCl₂. Essa versatilidade do protótipo frente a características distintas, confirma que o sistema proposto pode operar considerando diferentes tecnologias sem necessidades de alterações significativas no *hardware*, apenas alteração no código embarcado. As entradas adicionais para comunicação I2C e SPI presentes na placa principal, implicam também na adaptabilidade proposta pelo BMS, podendo o sensor de corrente ser substituído, necessitando apenas de interface compatível.

Os resultados obtidos para as aquisições de tensão, corrente e temperatura, comprovam o funcionamento correto destas funções. O uso do ADC externo permitiu que a precisão das medidas de tensão fosse equivalente aos BMS's comercializados. A função de gravação de operação por meio do sistema *datalogger* permitiu todas as análises experimentais dos ensaios executados. Os dados de operação em tempo real podem ser visualizados utilizando a interface do usuário desenvolvida, seja pela comunicação serial do BMS com um computador (via *prompt* configurado a taxa de 115200 bits por segundo), ou então fazer uso da interface gráfica projetada no *software* Node-RED.

Todo o *hardware* utilizado na concepção do BMS apresenta a característica aberta, com informações referentes aos componentes eletrônicos e conexões, bem como detalhamento individual do funcionamento do algoritmo. O conjunto de todas essas informações possibilita adaptações do *hardware* para novas versões do BMS. Embora não seja totalmente assertiva uma comparação com os BMS's comercializados, devido a outros custos envolvidos, tais como manutenção, licenças e suporte, o BMS desenvolvido nesse trabalho representa cerca de 5,5% do custo em aquisição do foxBMS. Considerando ser uma plataforma de desenvolvimento aberta, seu uso laboratorial oferece vantagens econômicas e técnicas no desenvolvimento de pesquisa experimental sobre BMS.

Como continuidade desta pesquisa, está sendo realizada ampliação e melhoria da ferramenta desenvolvida, alterando de uma *string* de células em série para um BMS multicanais de comunicação. A configuração pretendida é similar ao *master-slave*, com placa *Master* para o gerenciamento *multistrings* sendo responsável pelo gerenciamento, processamento e tomada de decisão; enquanto que os *slaves* são destinados ao monitoramento e controle dedicado por célula unitária da bateria.

Os autores informam que todos os arquivos referentes ao BMS desenvolvido como: diagramas elétricos, algoritmos, especificações de *hardware/software* estão disponíveis gratuitamente para download no endereço a seguir. Link: <https://portal.unila.edu.br/doutorado/ppgies/produto-tecnologico>

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa conta com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES (Cód. de Financ. 001), do Programa Institucional Agenda Tríplice (Edital PRPPG 137/2018) da Universidade Federal de Integração da América Latina - UNILA e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Nº 307223/2017-5 e Nº 407531/2018-1).

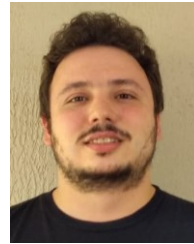
Os autores, em nome do Grupo de Pesquisa em Energia e Sustentabilidade Energética (GPEnSE), agradecem ao Laboratório de Baterias da Fundação Parque Tecnológico Itaipu (PTI) pelo apoio. Este trabalho está contextualizado no âmbito do projeto de pesquisa P&D COPEL 2866-0452/2016.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Malhotra, B. Battke, M. Beuse, A. Stephan, and T. Schmidt, "Use cases for stationary battery technologies: A review of the literature and existing projects," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 705–721, Apr. 2016.
- [2] S. Sabihuddin, A. E. Kiprakis, and M. Mueller, "A numerical and graphical review of energy storage technologies," *Energies*, vol. 8, no. 1, pp. 172–216, 2015.
- [3] M. Samper, D. Flores, and A. Vargas, "Investment Valuation of Energy Storage Systems in Distribution Networks considering Distributed Solar Generation," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 4, pp. 1774–1779, 2016.
- [4] O. H. A. Junior, A. S. Bretas, and R. C. Leborgne, "Methodology for Calculation and Management for Indicators of Power Quality Energy," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 7, pp. 2217–2224, 2015.
- [5] E. F. B. Daza and M. Sperandio, "The Insertion of Energy Storage Systems in Power Systems: A Regulatory and Economic Analysis," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 17, no. 05, pp. 843–850, 2019.
- [6] M. Dester, "Reliability of Electricity Supply Regarding the Integration of Intermittent Sources in Brazil's Power Mix," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 3, pp. 1302–1307, 2016.
- [7] A. N. de E. E. ANEEL, "Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica," 2017. [Online]. Available: http://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d/-/asset_publisher/ahiml6B12kVf/content/temas-para-investimentos-em-p-d/656831?inheritRedirect=false. [Accessed: 27-Oct-2018].
- [8] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti, and M.-Y. Chow, "Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 7, no. 2, pp. 4–16, Jun. 2013.
- [9] V. Pop, H. J. Bergveld, D. Danilov, P. P. L. Regtien, and P. H. L. Notten, *Battery Management Systems: Design by Modelling*, vol. 9. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008.
- [10] B. Diouf and R. Pode, "Potential of lithium-ion batteries in renewable energy," *Renew. Energy*, vol. 76, pp. 375–380, 2015.
- [11] A. A. Akhil, G. Huff, A. B. Currier, B. C. Kaun, D. M. Rastler, S. B. Chen, D. T. Bradshaw, and W. D. Gauntlett, *DOE/EPRI 2013 electricity*

storage handbook in collaboration with NRECA, no. July. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2013.

- [12] M. Akdere, M. Giegerich, M. Wenger, R. Schwarz, S. Koffel, T. Fuhner, S. Waldhor, J. Wachtler, V. R. H. Lorentz, and M. Marz, "Hardware and software framework for an open battery management system in safety-critical applications," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2016, pp. 5507–5512.
- [13] M. Lelie, T. Braun, M. Knips, H. Nordmann, F. Ringbeck, H. Zappen, and D. Sauer, "Battery Management System Hardware Concepts: An Overview," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 4, p. 534, Mar. 2018.
- [14] L. F. Grisales, O. D. Montoya, A. Grajales, R. A. Hincapie, and M. Granada, "Optimal Planning and Operation of Distribution Systems Considering Distributed Energy Resources and Automatic Reclosers," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 1, pp. 126–134, 2018.
- [15] O. D. Montoya, A. Grajales, A. Garces, and C. A. Castro, "Distribution Systems Operation Considering Energy Storage Devices and Distributed Generation," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 5, pp. 890–900, 2017.
- [16] C. Serrano-Canalejo, R. Sarrias-Mena, P. García-Triviño, and L. M. Fernández-Ramírez, "Energy management system design and economic feasibility evaluation for a hybrid wind power/pumped hydroelectric power plant," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 17, no. 10, pp. 1686–1693, 2019.
- [17] A. Wiesner, R. Diez, and G. Perilla, "Energy Storage System from DC Bus with Port for Solar Module," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 5, pp. 1376–1382, 2015.
- [18] L. Ensslin, S. R. Ensslin, and H. de M. Pinto, "Processo de investigação e análise bibliométrica: avaliação da qualidade dos serviços bancários," *Rev. Adm. Contemp.*, vol. 17, no. 3, pp. 325–349, Jun. 2013.
- [19] A. Manenti, A. Abba, A. Merati, S. M. Savaresi, and A. Geraci, "A New BMS Architecture Based on Cell Redundancy," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 9, pp. 4314–4322, Sep. 2011.
- [20] Y. Li and Y. Han, "A Module-Integrated Distributed Battery Energy Storage and Management System," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 12, pp. 8260–8270, 2016.
- [21] A. T. Elsayed, C. R. Lashway, and O. A. Mohammed, "Advanced Battery Management and Diagnostic System for Smart Grid Infrastructure," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 897–905, 2016.
- [22] F. Claude, M. Becherif, and H. S. Ramadan, "Experimental validation for Li-ion battery modeling using Extended Kalman Filters," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 40, pp. 25509–25517, Oct. 2017.
- [23] P. Liu and X. Zhang, "The design of smart battery management systems," *J. Comput.*, vol. 6, no. 11, pp. 2484–2490, 2011.
- [24] Chang-Hua Lin, Hsuan-Yi Chao, Chien-Ming Wang, and Min-Hsuan Hung, "Battery management system with dual-balancing mechanism for LiFePO₄ battery module," in *TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference*, 2011, pp. 863–867.
- [25] M. Wang, J. Q. Wu, and X. H. Zhang, "A Self-Adaptive BMS Based on CAN-Bus for Power Li-Ion Battery," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 130–134, pp. 3553–3556, Oct. 2011.
- [26] M. Giegerich, M. Akdere, C. Freund, T. Fuhner, J. L. Grosch, S. Koffel, R. Schwarz, S. Waldhor, M. Wenger, V. R. H. Lorentz, and M. Marz, "Open, flexible and extensible battery management system for lithium-ion batteries in mobile and stationary applications," in *2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2016, pp. 991–996.
- [27] Teslaflly, "Teslaflly OpenBMS." [Online]. Available: <https://github.com/Teslaflly/OpenBMS>. [Accessed: 15-Jul-2020].
- [28] FransVeldman, "FransVeldman OpenHybridBMS." [Online]. Available: <https://github.com/FransVeldman/OpenHybridBMS>. [Accessed: 15-Mar-2020].
- [29] Ralim, "Ralim Open-BMS." [Online]. Available: <https://github.com/Ralim/Open-BMS>. [Accessed: 15-Jul-2020].
- [30] M. Banzi, "Getting Started with Arduino," p. 180, 2011.
- [31] G. L. Plett, *Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling*, no. v. 1. Artech House, 2015.
- [32] G. L. Plett, *Battery Management Systems, Volume II: Equivalent-Circuit Methods*, no. v. 2. Artech House, 2015.
- [33] G. L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs - Part 1. Background," *J. Power Sources*, vol. 134, no. 2, pp. 252–261, 2004.
- [34] G. L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 2 - Modeling and identification," *J. Power Sources*, vol. 134, no. 2, pp. 262–276, Aug. 2004.
- [35] G. L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs - Part 3. State and parameter estimation," *J. Power Sources*, vol. 134, no. 2, pp. 277–292, 2004.
- [36] A. Javed, *Building Arduino Projects for the Internet of Things*. Berkeley, CA: Apress, 2016.



Giovane Ronei Sylvestrin, Graduated in Energy Engineering (2017) from the Federal University of Latin American Integration – UNILA. Master's Degree in Electrical and Computer Engineering (2020) from the State University of Western Paraná – Unioeste. Currently a Ph.D. student in Energy and Sustainability from the UNILA. He works on the following topics: renewable energy sources, energy storage, energy management, embedded systems, distributed generation systems, energy efficiency.



Helton Fernando Scherer, Graduated in Electrical Engineering (2006) from the Western Paraná State University – UNIOESTE. Received the Master's Degree (2009) and Ph.D (2014) in Automation and Systems Engineering from the Federal University of Santa Catarina – UFSC. His research interests are in modelling and control of energy storage systems, energy management, and distributed model predictive control.



Oswaldo Hideo Ando Junior, Graduated in Electrical Engineering (2006) with a Specialization in Business Administration (2007) from the ULBRA with Master's Degree in Electrical Engineering (2009) from the Federal University of Rio Grande do Sul - UFRGS and Ph.D. in Mining Engineering, Metallurgy, and Materials of the Federal University of Rio Grande do Sul – UFRGS (2014). He has engineering experience working on the following topics: Energy conversion, electrical energy quality, electrical energy systems, residual energy capture, and energy efficiency. Associate Editor IEEE Latin America Magazine. Member of the Review Committee of several journals: Renewable Energy Focus (Elsevier) and IEEE Latin-American Magazine. Ad hoc consultant FAPESC, Advisory Committee Area of the Araucária Foundation (CAA), ad hoc consultant CNPq, ad hoc advisor P&D of the National Power Energy Agency (ANEEL).