

## SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE CARGA DE BATERIAS PARA BANCADA SOLAR EÓLICA

**Renato Cunha Morais de Freitas** – renato@branati.com.br  
Universidade de Brasília - Departamento de Engenharia Mecânica  
Campus Darcy Ribeiro - Asa Norte  
70.910-900 – Brasília – Distrito Federal

**Rudi Henri van Els** – rudi@unb.br  
Universidade de Brasília - Departamento de Engenharia Mecânica  
Campus Darcy Ribeiro - Asa Norte  
70.910-900 – Brasília – Distrito Federal

### **Resumo:**

*Este artigo apresenta a concepção de uma ferramenta de bancada didática focada na geração de energia através de fontes renováveis. Ela é composta por módulos flexíveis, interconectáveis e de baixo custo, sendo o foco principal na concepção e criação de um módulo, que faz o gerenciamento de carga e balanceamento ativo de um banco de baterias de lítio. Assim, são utilizados alguns modelos de referência de processos de desenvolvimento de produtos mecatrônicos, que são implementados pontuais métodos de projetos informacionais e conceituais para a produção dos pontos necessários para a operação da bancada e construídos a partir de análises das necessidades e requisitos dos clientes. Já no módulo de gerenciamento de carga foram utilizadas referências para a modelagem matemática do circuito analógico de potência, da modularização e da construção do software, que contém controladores proporcionais integrais independentes para o carregamento das células de bateria. Os resultados obtidos conceitualizam módulos para uma bancada didática solar e eólica, padronizados, flexíveis e com componentes disponíveis no mercado. No módulo de gerenciamento de carga constata-se a eficácia no carregamento das células de bateria de forma independente e ativa. Os testes funcionais no protótipo, através da coleta de dados, apresentam um resultado que mostra o carregamento da bateria e a execução do controlador operacional integral sintonizado de forma satisfatória, embora o tratamento de ruídos e transientes no circuito precisem de maior atenção.*

**Palavras-chave:** gerenciador de carga, baterias de lítio, balanceamento ativo, bancada solar e eólica.

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, existe a necessidade de instrumentos para os testes acadêmicos e didáticos com energias renováveis no que se trata do aprofundamento em estudos relacionados a geração e gerenciamento dessa energia. Esses instrumentos acadêmicos disponíveis no mercado, muitas vezes, vêm com tecnologias já existentes, sendo até ultrapassadas e com um alto valor de aquisição.

Essa instrumentação precisa ser também direcionada às novas tecnologias de mercado (NITTA et al., 2015) como as de baterias de lítio, que vem transformando a indústria atual relacionada a armazenamento de energia. Tipos novos de baterias como a de  $\text{LiFePO}_4$  tem crescente utilização, visto que, sua superior capacidade de armazenamento, alta taxa de carga e descarga (KANG; CEDER, 2009) e tempo de vida favorecem a sua utilização.

Uma ferramenta muito utilizada no meio acadêmico, são as bancadas didáticas, pois têm uma funcionalidade muito facilitadora e são móveis onde painéis são fixados propiciando trabalhar em assuntos específicos que está sendo ensinado em sala de aula. Esses painéis são módulos que possuem equipamentos onde podem ser interligados entre si assim possibilitando ensaiar uma situação real. Assim, a criação de um módulo que trabalha com baterias de  $\text{LiFePO}_4$  é o ponto principal, que também precisa ser incluída como um módulo na bancada de instrumentação para pesquisas acadêmicas.

Para a solução desses problemas, se justifica a elaboração de uma especificação técnica para a criação de uma bancada modularizada e padronizada que tenha informações suficientes para a construção dos módulos, pelos alunos na Universidade, atendendo as necessidades acadêmicas de evolução nessa área e a criação de um módulo de controle de bateria de  $\text{LiFePO}_4$  visando também a utilização na bancada. De acordo com (NITTA et al., 2015), é de intenso interesse tanto da indústria quanto de agências de financiamento do governo, e a pesquisa neste campo tem se expandido nos últimos anos existindo assim a necessidade da Universidade de Brasília também aplicar pesquisa no ramo. E essa aplicação necessita de uma ferramenta que viabilize a utilização dessas tecnologias que pode ser feita através de uma bancada didática modularizada e esse trabalho vem a contribuir para a conceitualização de uma bancada didática como uma ferramenta modular e com foco na abordagem do gerenciamento de carga e balanceamento de células dos armazenadores de energia elétrica.

## 2. CONTEXTO DA INVESTIGAÇÃO, METODOLOGIAS, HIPÓTESES E PROCEDIMENTOS

Para a concepção da bancada e do módulo gerenciador de carga de baterias foram utilizados alguns métodos e técnicas das principais referências para o processo de projeto de produto e estão direcionadas para o desenvolvimento de sistemas de produtos mecânicos e enfatizado a esse projeto. Os principais autores utilizados como referência são: (PAHL; BEITZ, 2013) (BACK et al., 2008) e (ROZENFELD et al., 2006) onde são mostradas e utilizadas nesse trabalho algumas de suas técnicas e métodos. Assim no pré-projeto foi identificado o problema delimitando o escopo, definidos o objetivo da bancada e do módulo gerenciador de carga e verificada a concorrência com pesquisas de produtos e patentes semelhantes.

Já no projeto informacional foi feito o levantamento das necessidades através de observação direta, questionário e entrevistas com os clientes permitindo estabelecer os requisitos dos clientes. No projeto conceitual foi feita uma modelagem da estrutura funcional estabelecendo

princípios de solução para as funções levantadas e a criação de um protótipo do gerenciador de carga de baterias.

### 3. RESULTADOS

As informações apresentadas são resultados da aplicação dos métodos mencionados e são compostos por duas partes. A primeira parte é composta pelos resultados conceituais da bancada solar eólica em que, dentre seus módulos, existe um módulo da própria bancada - módulo 12 BMS  $\text{LiFePO}_4$  14.4V 4S1P - que foi desenvolvido. Os resultados da criação desse módulo, que trata da implementação de um gerenciador de carga de baterias de lítio, para a bancada solar eólica.

#### 3.1. Bancada Solar Eólica

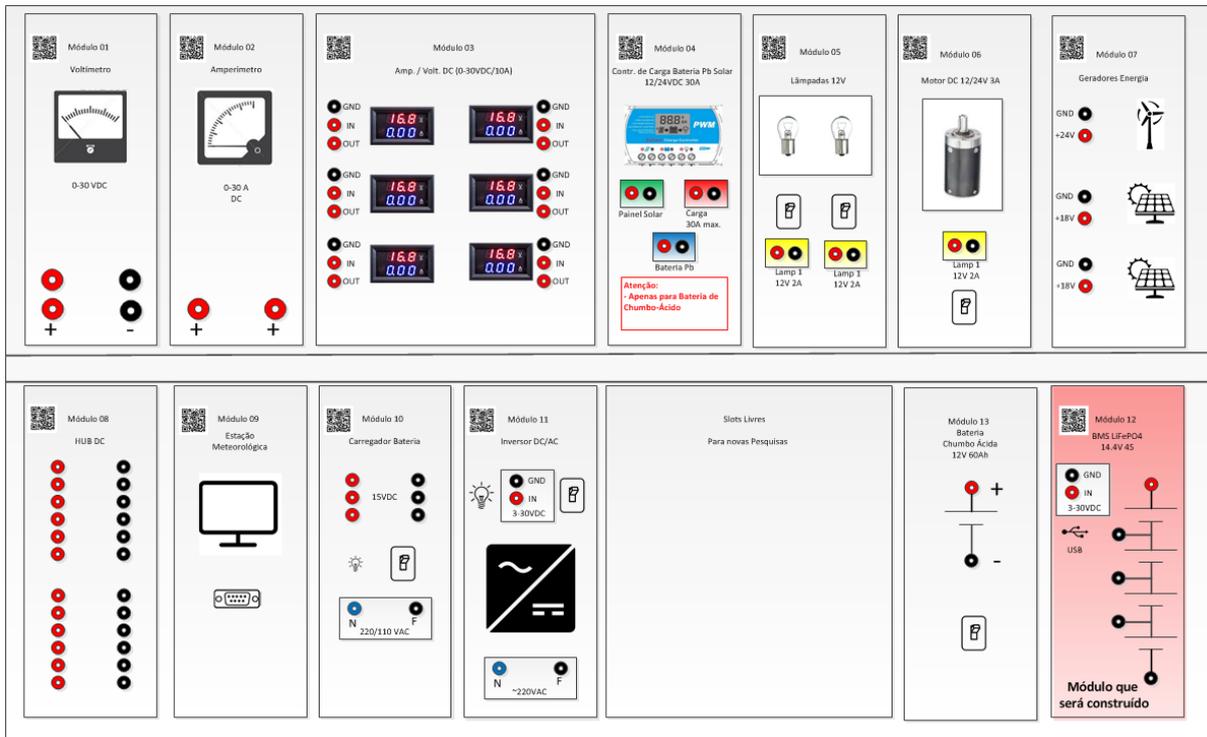
Durante a aplicação dos métodos utilizados, na fase do projeto informacional, foi estabelecido a especificação meta da bancada. As especificações definidas compõem a bancada com cada um de seus módulos assim possibilitando a utilização de componentes de mercado.

Durante a fase do projeto conceitual, foi possível estabelecer as funções da bancada, onde sua função global mostra como entrada os materiais, a energia elétrica, os ensaios pré-definidos. Utiliza os módulos que podem, ou não, serem utilizados para resolver os ensaios e como saída possui a visualização das informações através de instrumentos ou mesmo utilizar a coleta de dados em texto através da conexão em uma porta USB.

Os princípios de soluções existentes na bancada são exatamente os módulos que podem ser utilizados unitariamente ou em conjunto. Esse princípios foram definidos e a utilização resolvem todos os ensaios levantados e ditos como problemas a serem resolvidos no que se tange na utilização da bancada solar eólica. Esses princípios foram mapeados com base nas necessidades dos clientes que foram levantadas através de entrevistas e aplicação das metodologias mencionadas.

Esses princípios de soluções resolvem os problemas chamados de funções, que são nada menos que os ensaios pré-definidos. Utilizando os conceitos dos princípios de solução, foi construído um modelo conceitual da bancada (figura 1), composta por treze módulos que são materializados com o objetivo de concretizar o entendimento da bancada. É importante ressaltar que o módulo 12 ( $\text{BMS LiFePO}_4$ ) foi implementado e será tratado na próxima seção.

Figura 1 – Modelo conceitual da bancada solar eólica



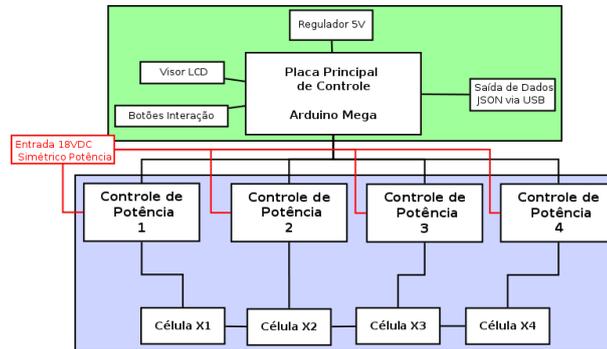
### 3.2. Sistema Gerenciador de Baterias

O módulo 12 da bancada foi implementado e é composto por *hardware* e *software* abertos proporcionando executar os métodos de controle com a leitura dos sensores das células controlando e executando um algoritmo na linguagem C.

O gerenciamento exige que a carga monitorada independentemente, em cada célula de bateria, balanceando-as de forma a atingir a tensão final de carga de especificação. Segundo Figueiro (2015), o problema do balanceamento de uma bateria composta de múltiplas células conectadas em série se resolve equalizando os estados de carga das células, que acontece através da utilização de métodos de algoritmos de controle.

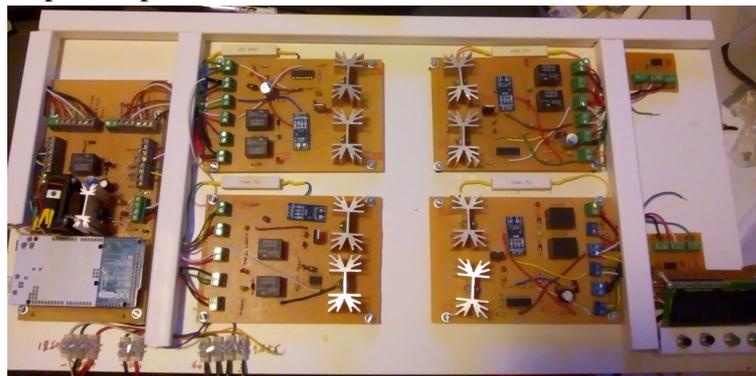
O módulo de carga e gerenciamento de baterias, para se efetuar seu papel, foi dividido em duas partes: Uma parte para a placa principal e outra parte para a placa de potência, conforme exibido no diagrama de blocos macro do sistema na figura 2.

Figura 2 – Diagrama de blocos macro do sistema



A figura 3 mostra o protótipo montado, que representa exatamente o diagrama de blocos macro do sistema. Ao lado esquerdo há a placa principal, as quatro placas de potência e à direita os filtros passa-baixas, o visor LCD e os botões de interface.

Figura 3 – Protótipo completo



Um diferencial desse sistema é a utilização da mesma placa de potência em todas as células de bateria, exceto na primeira célula, em que é possível modularizar e dimensionar o sistema de acordo com a quantidade de células de bateria.

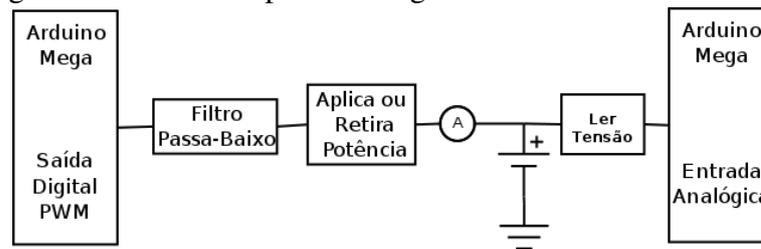
A placa principal é responsável por coletar todos os dados das células, efetuar os cálculos de controle e gerenciar a tensão de carga, que é aplicada em cada bateria. Ela também dispõe de um visor LCD, que mostra as informações do sistema, tão como, efetuar o controle de ligar e desligar a carga do sistema e regular o fator de controle proporcional integral. O microcontrolador ATmega 2560, que é embutido em uma placa de *hardware* aberto (*Open Hardware*), é o cérebro central do sistema, que é executado o software de controle que através de dados de tensão e corrente, ponto onde se estabelece a tensão analógica de saída de carga de cada célula de bateria.

As placas de potência, possuem um circuito analógico, que recebem os sinais de tensão analógica, estabelecem a voltagem de carga de cada célula de bateria e enviam dados de tensão e corrente para a placa principal. Um papel muito importante feito pela placas de potência é a utilização de amplificadores operacionais - OPamps com diferentes tipos de configuração, para que seja possível subtrair e somar tensões. Isso é necessário porque o banco de baterias possui células conectadas entre si e no momento da carga elas continuam conectadas.

Como as placas de potência possuem dois formatos, um para a célula de bateria 1 e outra para as demais baterias, as figuras 4 e 5 tratam da primeira placa enquanto as figuras 6 e 7 exibem informações das placas das seguintes células de bateria.

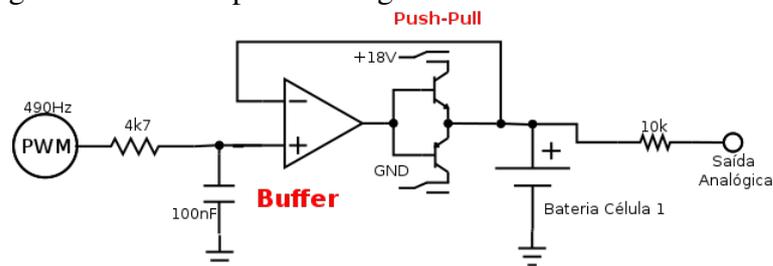
A primeira placa de potência é composta por uma entrada analógica de sinal PWM, emitido pela placa principal, um filtro passa-baixo, que faz a filtragem do sinal enviado pelo ATmega 2560, e em seguida a corrente é aplicada ou retirada passando por um amperímetro, que faz a leitura da corrente que entra ou sai da célula de bateria.

Figura 4 – Diagrama de blocos da placa analógica da célula 1



O amplificador operacional nessa placa é utilizado na configuração de *buffer* ou seguidor de tensão que, conforme (PERTENCE, 1991), opera como amplificador não inversor e de modo que apresenta um impedância de entrada muito alta, tem uma saída muito pequena, conforme mostrado na figura 5. Para aplicação da potência foram utilizados dois transistores, do tipo PNP e NPN e foram utilizados na configuração *push-pull*.

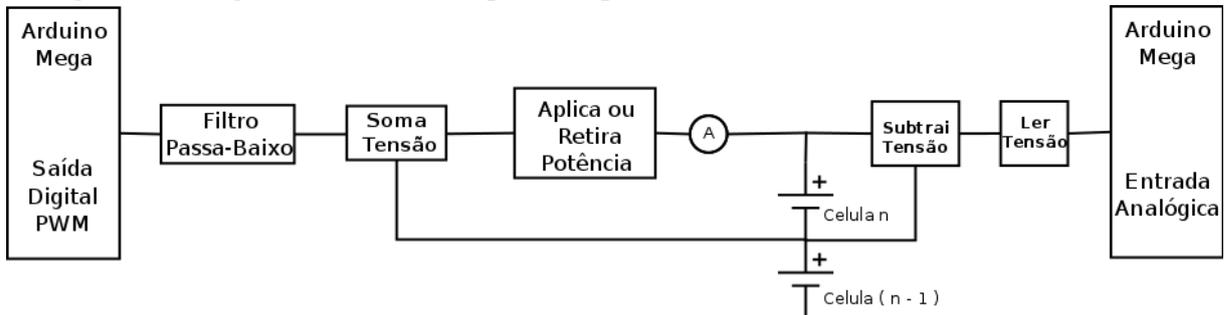
Figura 5 – Diagrama teórico da placa analógica da célula 1



As demais placas de potência são direcionadas a gerenciar a carga e o balanceamento das outras células do banco de baterias porque a tensão medida nas células seguintes são maiores do que 5V, e isso é incompatível com a entrada analógica do microcontrolador. O objetivo de viabilizar a leitura das tensões, foi necessária para utilizar um subtrator de tensão, que foi feito com o uso de um amplificador operacional na configuração subtrator. Esse subtrator pode ser visualizado nas figuras 6 e 7.

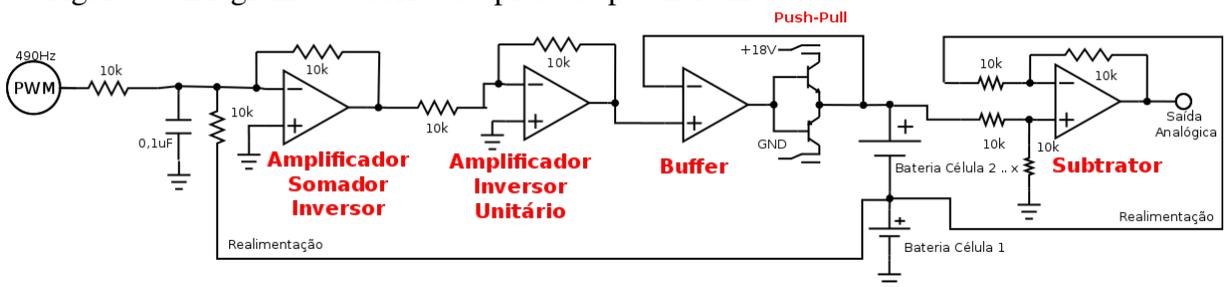
A parte da aplicação da corrente para a carga das células de bateria, foi utilizado o OPamp na configuração amplificador somador inversor, que faz a soma da tensão na célula anterior com a tensão filtrada emitida pela saída digital PWM do microcontrolador ATmega 2560. Portanto, com essa soma, a tensão é aplicada através de transistores, na configuração *push-pull*, semelhante a utilizada na placa de potência anterior, conforme mostrado na figura 6.

Figura 6 – Diagrama de blocos da placa de potência modular



O OPamp utilizado, figura 7, possui uma característica que ao somar a tensão, sua saída possui uma tensão negativa. Para se ter uma tensão positiva, foi utilizado um outro OPamp na configuração amplificador inversor unitário. Através disso, a tensão negativa passa a ser positiva e é enviada a outro OPamp, na configuração *buffer*, que por sua vez, envia a tensão a um arranjo de transistores *push-pull* aplicando potência nas células de bateria.

Figura 7 – Diagrama de teórico do placa de potencia modular



Outro ponto importante a ressaltar, antes dos transistores foram inseridos relés que fazer o comando de aplicação ou não de potência. Isto pode ser visualizado nas figuras 5 e 7. Eles são comandados pelo microcontrolador ATmega 2560 e esse controle se faz necessário para que seja possível medir exatamente a tensão das células de bateria, caso contrário, a leitura seria falsa, capturando a tensão de carga.

No microcontrolador ATmega 2560, local onde é executado o software de controle, um controlador faz os cálculos através de um controlador proporcional integral. A ação da integral corresponde a ter uma taxa de variação no sinal de saída com relação a da entrada, atuando benéficamente na resposta em regime permanente tendendo a eliminar o erro de estado estacionário. Mas pode prejudicar o regime transitório aumentando o tempo de acomodação (ARAÚJO, 2007). Com isso, a atuação de um controlador PI corresponde à soma de uma ação proporcional com uma ação integral pode-se melhorar a resposta transitória com controle proporcional com a integral, corrigindo o erro de estado estacionário, conforme (ARAÚJO, 2007). A equação para o controlador nesse caso, em malha fechada, para sistema de primeiro grau é mostrado na equação 1 com sua laplace na equação 2.

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (1)$$

$$U(s) = \frac{(K_p s + K_i)}{s} E(s) \quad (2)$$

Onde  $K_i = \frac{K_p}{\tau_i}$ , sendo  $\tau_i$  o tempo integrativo ou *reset time*, segundo (ARAÚJO, 2007).

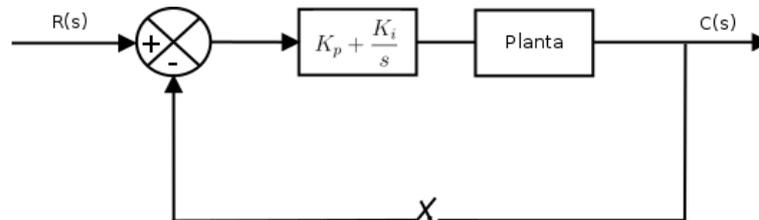


Figura 8 – Diagrama de bloco do controlador PI do BMS

Na figura 8, temos o diagrama de blocos do controlador PI, que será utilizado no BMS, onde na realimentação, haverá um corte periódico na malha fechada. Esse corte é necessário porque a injeção de corrente nas células de bateria, no momento da medição de tensão, alteram a fiel tensão das baterias causando erro no algoritmo de controle. Durante a coleta dos dados de tensão, o microcontrolador automaticamente corta a corrente dos relés e é efetuado uma medição durante 10 segundo perfazendo a média das 5 últimas medições, para evitar erros. Depois é fechado a malha de realimentação e executado o controlador PI, para que este possa fazer seu papel. Após esse tempo, o sistema abre a malha novamente e faz o carregamento das células de bateria, durante aproximadamente 2 minutos e repete o processo.

Durante o carregamento das células de bateria, a tensão inserida em cada uma precisa, necessariamente, ser maior que a tensão existente no momento da carga. Com isso, através de ajuste de sintonia feita pelo usuário, o fator proporcional do controlador  $K_p$  pode ser alterado através da navegação do painel LCD. A fórmula da tensão é proporcional a tensão coletada no sistema, no entanto, é necessário a interrupção da carga, leitura, calculo e em seguida é aplicado a tensão acrescida do fator  $K$  em cada célula de bateria. Essa aplicação é feita em cada célula independentemente. Transformando a fórmula ?? na forma discreta temos:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (3)$$

Tendo  $k$  como instante corrente, temos a fórmula que poderá ser reescrita em um algoritmo feito em C para o Arduino. O instante corrente da integral anterior será somado a integral corrente, por isso temos  $e(k - n)$ ..:

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_i [e(k - 1) + e(k - 2) \dots e(k - n)] \quad (4)$$

Onde  $k$  é o instante corrente,  $K_p$  o fator proporcional,  $e$  o erro e  $K_i$  o fator integral. Foi feita uma coleta de dados através da porta USB, que disponibiliza os dados de corrente e tensão de cada célula, utilizando o formato de dados do tipo JSON durante aproximadamente duas horas e dez minutos. Um ponto importante a ser ressaltado, é a abrupta modificação das tensões, que se alteram simultaneamente com um relevante alteração das tensões. Isso ocorre porque a resolução das leituras, tanto nos sensores analógicos quanto no mapeamento da tabela de

referência do PWM, são de resolução de apenas uma casa decimal (x,0 a x,9). Assim, no momento 1828 segundos, na figura 9 verifica-se que quando a bateria tem sua tensão acima de 4 volts o controlador diminui a tensão de 4.4 volts para 4.3 volts, em vez de ter uma alteração gradativa. Uma melhor resolução pode ser feita, utilizando uma tabela de referência com uma resolução de 100 posições, possibilitando uma alteração amenizada da modificação das tensões, isso é sugerido em trabalhos futuros.

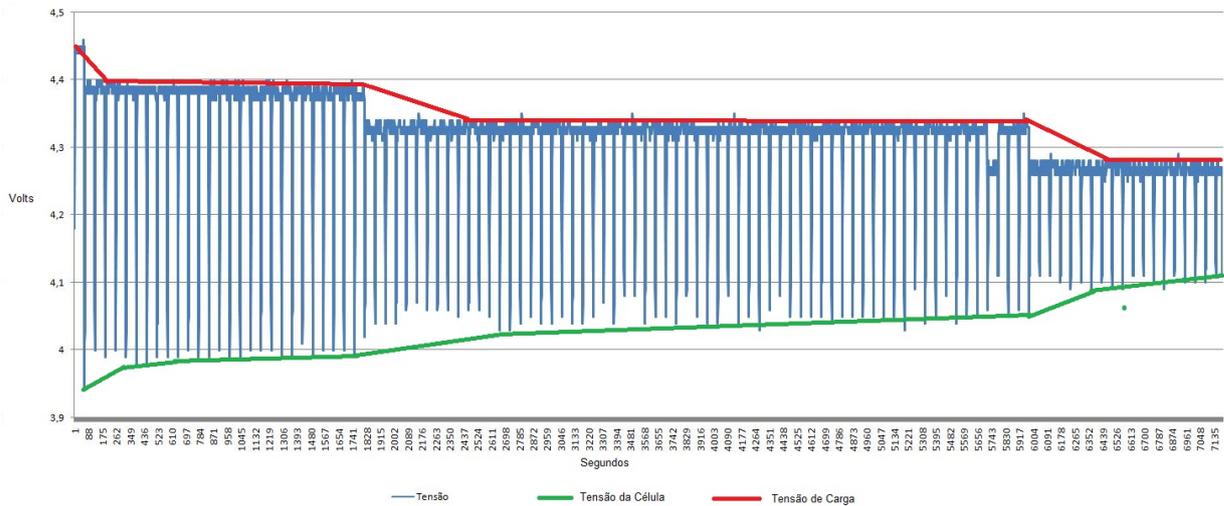


Figura 9 – Teste Completo BMS  $K_p$  2.4 e  $K_i$  0.8

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema mostra que é satisfatório a utilização dos conceitos da bancada solar eólica em que os módulos da bancada podem ser perfeitamente construídos pelos próprios alunos da instituição. O projeto mostrou que o gerenciamento da carga das baterias, utilizando balanceamento ativo com o apoio de um controle proporcional integral, foi satisfatório. Para o carregamento das baterias, também mostrou que o sistema está projetado de forma modularizada permitindo o desenvolvimento de um sistema de acordo com a quantidade de células de bateria. Algumas limitações como a fonte simétrica de alimentação do sistema foi subdimensionado, visto que a quantidade limitada de recursos e da necessidade de uma corrente superior a fornecida pela fonte, viabilizando um carregamento de baterias em menor tempo. Os transistores de potência utilizados possuem uma limitada corrente, mesmo com a utilização de dissipadores de calor, e isso é um limitador da corrente de carga das baterias.

Esse trabalho possui uma abordagem bastante diferenciada no modelo de balanceamento ativo de baterias, tendo controles individuais, que podem permitir um controle unitário compatível com bancos de baterias interconectadas em série. Esse modo de balanceamento, com a utilização de amplificadores operacionais, tem futuros promissores no sentido de modernizar os balanceadores atuais, sem falar na compatibilidade, por meio de poucas modificações, com praticamente todas as baterias que precisam ter suas cargas com um controle individual.

##### 4.1. Agradecimentos

Foi essencial o apoio do orientador e da Universidade de Brasília e familiares, para a construção desse projeto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, F. M. U. d. Sistemas de controle. **Apontamentos. UFRN. Departamento de Engenharia de Computação e Automação. Natal-RN, 2007.**

BACK, N. et al. Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem. **Barueri: Malone**, p. 435–482, 2008.

FIGUEIRO, A. A. **Controle do Balançamento de Bateria, Estimação e Estado de Carga.** [s.n.], 2015. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2015-1/2015122201-2015122201/file>>.

KANG, B.; CEDER, G. Battery materials for ultrafast charging and discharging. **Nature**, v. 458, n. 7235, p. 190–193, mar. 2009. ISSN 0028-0836, 1476-4687. Disponível em: <<http://www.nature.com/doi/10.1038/nature07853>>.

NITTA, N. et al. Li-ion battery materials: present and future. **Materials Today**, v. 18, n. 5, p. 252–264, jun. 2015. ISSN 13697021. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369702114004118>>.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering design: a systematic approach.** [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013.

PERTENCE, A. **Amplificadores Operacionais y Filtros Activos.** [S.l.]: McGraw Hill, 1991.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo.** [S.l.]: Editora Saraiva, 2006. ISBN 978-85-02-05446-2.

## BATTERY LOAD MANAGEMENT SYSTEM FOR WIND SOLAR BENCH

**Resumo:** *This article presents the design of a didactic bench tool focused on the generation of energy through renewable sources. It is made up of flexible, interconnectable and low cost modules, the main focus being the design and creation of a module, which makes load management and active balancing of a bank of lithium batteries. Thus, some reference models of mechatronics product development processes are used, which are implemented on time conceptual and conceptual design methods for the production of the necessary points for the operation of the bench and constructed from analyzes of the needs and requirements of customers. In the load management module, references were used for the mathematical modeling of the analog power circuit, the modularization and the construction of the software, which contains independent proportional integral controllers for charging the battery cells. The obtained results conceptualize modules for a didactic solar bench and wind, standardized, flexible and with components available in the market. In the load management module you can see the effectiveness of charging the battery cells independently and actively. The functional tests in the prototype, through data collection, present a result that shows the battery charging and the execution of the integral operating controller tuned satisfactorily, although the treatment of noises and transients in the circuit need more attention.*

**Palavras-chave:** *load manager, lithium batteries, active balancing, solar and wind bench.*