

DESENVOLVIMENTO DE BATERIA DE LÍTIO-ÍON PARA SERVIÇOS ANCILARES

Maria de Fátima Negreli Campos Rosolem (CPqD) - mfatima@cpqd.com.br

Raul Fernando Beck (CPqD) - raul@cpqd.com.br

Juliana Cintra Miranda de Souza Aranha (CPqD) - jaranha@cpqd.com.br

Thiago Chiachio do Nascimento (CPqD) - thiagoc@cpqd.com.br

Felipe Lima dos Reis Marques (CPQD) - fmarques@cpqd.com.br

Valentino Corso (CPqD) - valenti@cpqd.com.br

Gustavo Melo Contin (CPqD) - gcontin@cpqd.com.br

Ricardo S. Figueredo (Instituição - a informar) - ricardo@phb.com.br

Henrique B. Morari (Instituição - a informar) - henrique.morari@phb.com.br

Resumo:

. No âmbito da Chamada Estratégica 21 da Aneel, o CPqD, IEE-USP, PHB e Hytron estão participando de um projeto P&D com a ISA CTEEP denominado "Fornecimento de serviços ancilares com sistemas de armazenamento de energia em sistemas elétricos com elevada penetração de geração intermitente". Um dos objetivos deste projeto é projetar, fabricar, instalar e operacionalizar um sistema de armazenamento de energia com baterias de íons de lítio para fornecimento de serviços ancilares, cujos responsáveis são a Fundação CPqD e a PHB. Para este projeto está sendo desenvolvida uma bateria de lítio-íon (LiB) nacional, de 100 kW / 100 kWh. Diferente de outras tecnologias de bateria, para operação segura e confiável a bateria de lítio-íon necessita conter um sistema eletrônico de gestão e controle, conhecido como BMS (Battery Management System) que, além das funções de proteção e segurança, executa algoritmos para realizar as estimativas de estado de carga (SoC), estado de saúde (SoH) e o balanceamento de energia entre as células da bateria. Além disso, o empacotamento mecânico e dissipação de calor são itens fundamentais para seu desempenho e vida útil. Neste desenvolvimento não se busca fabricar a célula de lítio-íon no Brasil, pois ainda não há capacitação profissional e industrial para isso, sendo necessário realizar estudos e ensaios laboratoriais em diferentes modelos/fabricantes de células disponíveis no mercado internacional para definição da célula que será importada para compor a bateria. Uma vez escolhida e adquirida, as células são submetidas a vários ensaios, alguns com duração superior a um ano, visando obter informações para parametrização do BMS que está sendo projetado simultaneamente com a realização desses ensaios, bem como o projeto do empacotamento mecânico e térmico da bateria. Este trabalho apresenta os principais aspectos considerados no desenvolvimento da bateria, assim como os resultados atingidos até o momento.

Palavras-chave: Bateria de lítio-íon, BMS, Serviços Ancilares.

Área temática: Conversão Fotovoltaica

Subárea temática: Tecnologias e ensaios de inversores e outros equipamentos de eletrônica de potência

DESENVOLVIMENTO DE BATERIA DE LÍTIO-ÍON PARA SERVIÇOS ANCILARES

Maria de Fátima N. C. Rosolem – mfatima@cpqd.com.br

Raul F. Beck – raul@cpqd.com.br

Juliana C. M. S. Aranha – jaranha@cpqd.com.br

Thiago C. Nascimento – thiagoc@cpqd.com.br

Felipe Lima R. Marques – fmarques@cpqd.com.br

Valentino Corso – valenti@cpqd.com.br

Gustavo M. Contin – gcontin@cpqd.com.br

Fundação CPqD

Ricardo S. Figueredo – ricardo@phb.com.br

Henrique B. Morari – henrique.morari@phb.com.br

PHB Solar

4. Conversão fotovoltaica. – 4.5. Tecnologias e ensaios de inversores e outros equipamentos de eletrônica de potência.

Resumo. No âmbito da Chamada Estratégica 21 da Aneel, o CPqD, IEE-USP, PHB e Hytron participam de um projeto P&D com a ISA CTEEP denominado "Fornecimento de serviços ancilares com sistemas de armazenamento de energia em sistemas elétricos com elevada penetração de geração intermitente". Um dos objetivos deste projeto é projetar, fabricar, instalar e operacionalizar um sistema de armazenamento de energia com baterias de lítio-íon para fornecimento de serviços ancilares, cujos responsáveis são a Fundação CPqD e a PHB. Neste projeto está sendo desenvolvida uma bateria de alta tensão de lítio-íon (LiB) nacional, de 700 V / 100 kW / 100 kWh. Diferente das tecnologias convencionais de baterias chumbo-ácidas e alcalinas, que são intrinsecamente seguras, para operação segura e confiável a bateria de lítio-íon necessita conter um sistema eletrônico de gestão e controle, conhecido como BMS (Battery Management System) que, além das funções de proteção e segurança, executa algoritmos para realizar as estimativas de Estado de Carga (SoC), Estado de Saúde (SoH) e o balanceamento de energia entre as células da bateria. Além disso, o empacotamento mecânico e térmico são itens fundamentais para seu desempenho e vida útil. Este desenvolvimento não busca fabricar a célula de lítio-íon no Brasil, pois ainda não há capacitação profissional e industrial para isso no País, sendo necessário realizar estudos e ensaios laboratoriais em diversos modelos/fabricantes de células disponíveis no mercado internacional para definição da célula que será utilizada na bateria. Uma vez escolhida e adquirida, as células são submetidas a vários ensaios, alguns com duração superior a um ano, visando obter informações para parametrização do BMS que está sendo projetado simultaneamente com a realização desses ensaios, bem como o projeto do empacotamento mecânico e térmico da bateria. Este trabalho apresenta os principais aspectos considerados no desenvolvimento da bateria e os resultados atingidos até o momento.

Palavras-chave: Bateria de lítio-íon, BMS, Serviços Ancilares.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Deng D. (2015), bateria de lítio-íon (LiB) é uma das mais avançadas tecnologias de baterias recarregáveis e que vêm atraindo muito a atenção nas últimas duas décadas. É a tecnologia dominante nos equipamentos portáteis e nos veículos elétricos, devido suas características de baixo peso e elevada densidade de energia.

As LiBs também estão sendo utilizadas em várias aplicações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como em sistemas de energias renováveis (sistemas fotovoltaicos ou eólicos) para aumentar a confiabilidade e disponibilidade de energia destas fontes alternativas, uma vez que a energia gerada é intermitente, pois depende de forças da natureza, com o sol e o vento. Todas estas aplicações necessitam de LiBs com maior densidade de energia, menor custo e segura, fatores que tem impulsionado mundialmente a pesquisa e desenvolvimento das novas gerações de células de lítio-íon, conforme mostrado por Garita, V. G. (2019).

As células de lítio-íon apresentam vantagens fundamentais sobre outras químicas. O lítio possui elevada eletropositividade, permitindo que as baterias a base de lítio apresentem elevado eletropotencial da célula, sendo o terceiro elemento químico mais leve entre os metais, bem como com menor raio iônico de qualquer íon com carga. Estes fatores permitem que as células de lítio apresentem elevadas capacidades gravimétrica (Wh/kg) e volumétrica (Wh/l) e, conseqüentemente, elevadas densidades de energia, conforme S. Abada *et al.* (2016), apresentado na Figura 1.

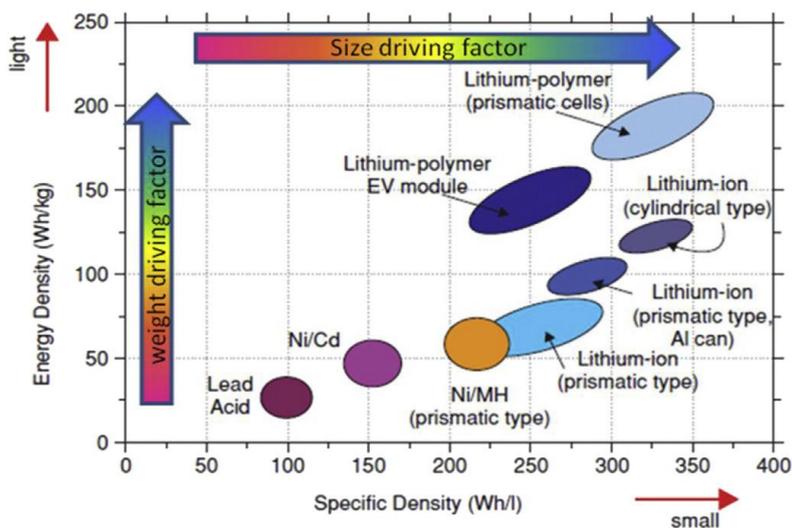


Figura 1 - Densidades de energia gravimétrica e volumétrica de várias tecnologias de bateria

As células de lítio-íon apresentam design flexível, podendo ser construídas em vários formatos e tamanhos, de modo a se ajustar eficientemente nos espaços dos dispositivos eletrônicos. Elas não apresentam o problema de efeito memória, característicos da célula de níquel-cádmio, cuja tensão é cerca de um terço da apresentada pela célula de lítio. Sua elevada tensão reduz o número de células necessárias para formar um módulo (*pack*) de bateria, reduzindo significativamente o peso e volume total da bateria. Sua autodescarga é inferior a 5% ao mês, enquanto que as baterias a base de níquel apresentam valores entre 20 a 30%.

Segundo Scrosati, B. *at al.* (2010), tipicamente uma célula de lítio-íon consiste de um ânodo (eletrodo negativo) e um cátodo (eletrodo positivo), isolados eletricamente entre si por um separador, tipicamente uma membrana polimérica embebida com eletrólito que contém íons de lítio, que permite a passagem dos íons de lítio entre os dois eletrodos.

O eletrodo positivo é constituído por materiais com propriedades de intercalação, onde os íons de lítio podem se difundir para dentro da estrutura cristalina do material, bem como sair desta estrutura. Os materiais mais utilizados nas células comerciais, que formam a “família” de lítio-íon, são óxido de cobalto (LCO), fosfato de ferro (LFP), óxido de níquel manganês e cobalto (NMC), óxido de níquel cobalto e alumínio (NCA) e óxido de manganês (LMO). Geralmente a seleção do material é baseada nos requisitos de desempenho desejado da bateria, tais como densidade de energia, densidade de potência, vida cíclica, segurança e custo, conforme apresentado por Deng, D. (2015).

Segundo Goriparti, S. *at al.* (2014), o carbono e o titanato de lítio são os principais tipos de eletrodos negativos das células de lítio-íon. Novos tipos de ânodos estão em desenvolvimento, incluindo lítio metálico e ligas metálicas, com foco especial para ligas de lítio-silício e materiais de conversão.

O eletrólito é parte fundamental da célula de lítio-íon, pois provê mobilidade iônica para o transporte dos íons de lítio entre os eletrodos e deve ser eletroquimicamente estável na faixa de tensão de operação da célula, sendo usualmente baseados numa mistura de solventes orgânicos (p.ex. carbonatos orgânicos) com dissolução de sais de lítio. Conforme apresentado por Rosolem *at al.* (2018), há duas classes de eletrólitos: líquidos (aquosos e orgânicos) e sólidos (poliméricos, cerâmicos e vítreos).

Segundo Hannan, M. *at al.* (2018), as faixas operacionais estáveis de tensão e temperatura destes eletrólitos são extremamente estreitas. Dessa forma, diferente das convencionais baterias chumbo-ácidas e alcalinas que, por utilizarem eletrólitos aquosos (não inflamáveis), são intrinsecamente seguras, para garantir operação segura da bateria lítio-íon é imprescindível que possua um sistema de gestão e controle (BMS - *Battery Management System*) confiável e parametrizado para a eletroquímica das células utilizadas. O BMS tem como principal funcionalidade a proteção, em nível de células, contra sobretensão, subtensão, temperatura, sobrecarga e limitação de corrente. Ele também tem a responsabilidade de fazer o balanceamento de energia entre as células, além da gestão do estado de carga (SoC) e estado de saúde (SoH) da bateria.

O CPQD, dentro de um projeto da Chamada Estratégica Aneel 21, está desenvolvendo uma bateria de lítio-íon de 700 V / 100 kW / 100 kWh, que envolve a seleção e levantamento laboratorial das características da célula de lítio mais adequada para o projeto, desenvolvimento do BMS (*Battery Management System* - conjunto eletrônico microprocessado e eletrônica de potência) e dos algoritmos embarcados para determinação do Estado de Carga (SoC - *State of Charge*), do Estado de Saúde (SoH - *State of Health*) e balanceamento de energia entre as células, além do projeto do empacotamento mecânico e térmico da bateria.

Este trabalho apresenta os resultados obtidos até o momento, com cada parte da bateria que está sendo desenvolvida, para contribuir com outras empresas, universidades e institutos de pesquisas no desenvolvimento e conhecimento desta tecnologia. Cabe destacar que, apesar da célula de lítio-íon ainda não ser fabricada no Brasil, em algum momento deverá haver investimento no desenvolvimento local desta tecnologia, para evitar ficar dependente como mero importador da solução.

2. ARQUITETURA DA BATERIA

Na fase inicial do desenvolvimento deste projeto de P&D foi definido que a LiB a ser projetada deve apresentar tensão nominal de 700 V e capacidade de 100 kWh no regime de descarga de 1 hora. A tecnologia de bateria selecionada para este projeto foi lítio-íon, devido suas características típicas, apresentadas anteriormente.

Dentre as diferentes tecnologias da “família” de baterias de lítio-íon, considerando as características de operação dos serviços ancilares e da geração intermitente, as células de lítio tipo LFP são as mais adequadas, pois apresentam maior vida cíclica, boa densidade de potência e são mais seguras que as outras células de lítio-íon com outros óxidos metálicos, apesar de apresentarem baixa densidade de energia que, no caso deste projeto, não é item crítico.

Em 1996 pesquisadores da Universidade de Austin (Texas - EUA) descobriram que compostos fosfato podem ser utilizados como materiais do eletrodo positivo das baterias de lítio-íon. Lítio Fosfato de Ferro (LFP) apresenta bom desempenho eletroquímico, baixa resistência ôhmica interna e longa vida útil, além de suportar correntes elevadas de descarga e recarga. O fosfato ajuda a estabilizar o eletrodo contra sobrecarga e sua degradação ocorre em temperaturas mais elevadas que outros óxidos metálicos de lítio, sendo portanto, mais tolerante a operação em temperaturas elevadas. Estas baterias podem operar numa faixa maior de temperatura, entre + 60°C a -30°C, sendo menos propensas a sofrer avalanche térmica. No entanto baterias LFP apresentam maior autodescarga que baterias de lítio-íon com outros óxidos metálicos, podendo apresentar, durante seu envelhecimento, problemas mais pronunciados de desbalanceamento de carga entre as células. Este fato pode ser mitigado por meio de algoritmos embarcados num BMS confiável e projetado para este tipo de célula.

Baseado em estudos, análises de mercado, ensaios e experiências anteriores, bem como nas características técnicas do projeto, a célula de lítio-íon escolhida para o desenvolvimento desta bateria foi o modelo WB-LYP160Ah, da Winston-Thundersky, com capacidade nominal de 160 Ah e tensão nominal de 3,2 V, apresentada na Figura 2.



Figura 2 - Células LFP 160Ah/3,2 V

Para atender os requisitos elétricos, mecânicos e térmicos do projeto, a bateria será constituída por 230 células interligadas em série, divididas em 23 módulos de bateria com 10 células cada. Assim a bateria terá tensão nominal de 736 V e capacidade de 117 kWh. A Figura 3 apresenta a ilustração do agrupamento dos módulos no bastidor da bateria.

Conforme previsto no projeto de P&D, a bateria será instalada no IEE-USP no contêiner mostrado na Figura 4 (BESS - *Battery Energy Storage System*), que contém os demais sistemas de controle e conversão de energia. O container está conectado a 150 kWp de painéis fotovoltaicos do IEE-USP e interligado a rede elétrica comercial.

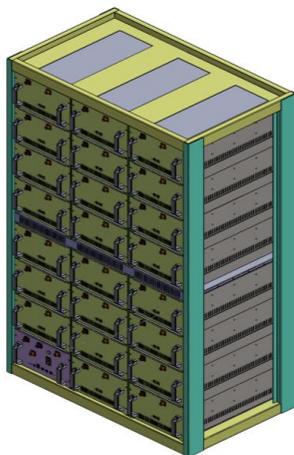


Figura 3 - Ilustração do bastidor e módulos



Figura 4 - Container (BESS) onde a bateria será instalada

A seleção da célula de lítio-íon no desenvolvimento de uma bateria é um item crucial. Além da escolha da química de lítio mais adequada para uma determinada aplicação, a seleção do modelo e fabricante são fatores importantes a considerar. É fundamental realizar ensaios laboratoriais para avaliar se a célula está compatível com as características técnicas descritas no seu manual técnico, tais como: capacidade em vários regimes de descarga, faixa de temperatura de operação, corrente limite de recarga, corrente limite de descarga, autodescarga, ciclos de recarga/descarga, bem como avaliar se atendem os requisitos de desempenho elétrico e de segurança descritos em normas IEC, ABNT, etc.

Inicialmente o CPqD adquiriu 20 amostras da célula WB-LYP160Ah para realizar ensaios laboratoriais e avaliar algumas características de desempenho elétrico e de segurança, bem como extrair parâmetros que serão utilizados na modelagem dos algoritmos de SoC e SoH, bem como alguns testes para avaliar a funcionalidade do BMS. Após esses ensaios foi realizada a aquisição de 230 células para construção do protótipo.

A Figura 5 ilustra os resultados do ensaio de capacidade realizado no regime de descarga de 5 horas, segundo procedimento descrito na IEC 62620:2014, mostrando que todas as amostras apresentaram valores acima do nominal.

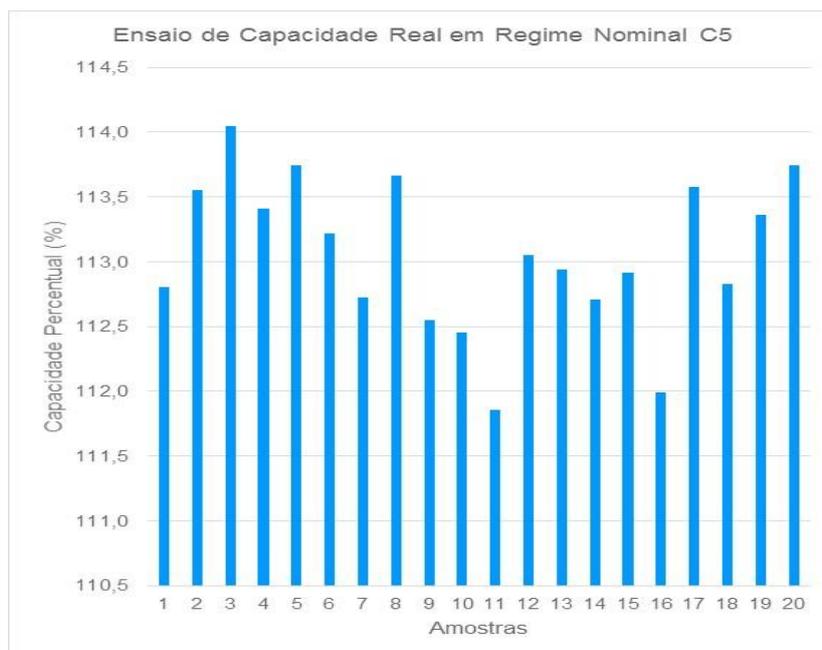


Figura 5 - Resultado do ensaio de capacidade em regime de descarga de 5 horas

3. SISTEMA DE GESTÃO E CONTROLE (BMS)

A temperatura da bateria, principalmente durante a recarga e descarga, é fator crítico no desempenho e vida útil das LiBs. Temperatura elevada, acima de 60-70°C, acarreta acentuada perda de vida útil e pode provocar avalanche térmica na bateria - a avalanche térmica de uma única célula pode levar a uma reação em cadeia com outras células, causando fogo e até explosão da bateria, conforme apresentado por Ma, S. *at al.* (2018).

Para aumentar a vida útil da bateria e solucionar a maioria dos problemas de segurança, todas as LiBs possuem um sistema de gestão (BMS) com função de regular e controlar todos os aspectos funcionais da bateria, incluindo recarga, descarga, equalização das células, monitoramento e controle térmico. Geralmente o BMS possui funcionalidades para proteções de segurança, tais como contra curto-circuito externo, inversão de polaridade, sobrecarga, sobre e subtensão nas células, além da manutenção das condições operacionais ótima de temperatura (30-40°C), do estado de carga (SoC), da profundidade de descarga (DoD - *Deep of Discharge*), determinação do estado de saúde (SoH), número dos ciclos de recarga/descarga e balanceamento das células para aumentar a vida útil e eficiência da bateria.

A faixa operacional de tensão e temperatura de cada LiB depende do tipo de eletrólito e do material usado na construção do ânodo e cátodo das células. A operação da bateria fora de sua faixa ideal de temperatura afeta sua capacidade máxima de carga e reduz a quantidade total de ciclos de recarga e descarga que ela poderá disponibilizar.

Em termos de gestão, o BMS é responsável pelo desempenho e a segurança da bateria, garantindo que o sistema opere dentro dos limites seguros de tensão e temperatura, o que cria uma região adequada de operação. O controle deve garantir que tensões, corrente e temperaturas das células estejam dentro da faixa ideal de operação, criando o primeiro nível de segurança. Qualquer desses parâmetros que saia da faixa segura de operação gera um alarme no sistema, prontamente atendido pelo BMS e informado ao EMS (*Energy Management System* - Sistema de Gestão de Energia do BESS).

Baseado na aquisição dos parâmetros de tensão, corrente e temperatura, algoritmos de balanceamento de carga das células trabalharão de modo a evitar a perda de capacidade da bateria. Os algoritmos de estimação de SoC e SoH fornecem dados ao EMS, através da interface de comunicação, disponibilizando estas informações ao sistema.

Uma das funcionalidades mais importante para o BMS é o balanceamento de carga das células. Em geral o desbalanceamento é causado por dois motivos:

- O primeiro é devido a características intrínsecas das células, que incluem dispersão na quantidade de armazenamento de carga das células (capacidade) durante o processo de manufatura, variações da impedância interna e diferenças da taxa de descarregamento de célula para célula, além de fatores relacionados ao envelhecimento;
- O segundo, que não envolve as características das células, é classificado como fontes externas. Elas decorrem devido a diferenças de temperatura no conjunto do empacotamento das células, levando a taxas de descargas diferentes para cada célula. Porém, o principal motivo é a drenagem de corrente por parte de circuitos integrados (CIs) de monitoramento e proteção das células, parte integral do BMS.

Esses fatores motivaram a pesquisa e o desenvolvimento de diversas topologias e metodologias para realizar o balanceamento de carga em células conectadas em série na bateria. Todas elas são exploradas nas mais diversas características, tais como tempo de equalização, complexidade de controle, simplicidade de implementação, tamanho, custo, capacidade de recarga/descarga e número de elementos passivos e ativos necessários para a implementação.

As técnicas baseadas no método passivo de balanceamento, mais simples e de menor custo e tamanho, usam resistores como elementos principais. Neste método a energia em excesso é removida da(s) célula(s) com maior energia e dissipada nos elementos resistivos até que as cargas sejam igualadas, onde a célula de menor carga, ou um determinado nível pré-escolhido, funciona como referência ao circuito. Os resistores podem trabalhar tanto no modo fixo quanto no modo chaveado (mais eficiente).

Por outro lado, os métodos ativos de balanceamento de carga são baseados em técnicas mais eficientes, porém mais complexos e custosos, onde as células com maior carga transferem a energia excedente para aquelas com menor energia. De acordo com o elemento empregado para a transferência de energia, o método ativo ainda pode ser subcategorizado em: capacitivo, indutivo e baseado em conversores, conforme descrito por Marques *et al.* (2019).

O BMS desenvolvido neste projeto utiliza balanceamento passivo (chaveado) de carga das células, pois o tempo de equalização e capacidade de recarga/descarga não é crítico e se busca solução de baixo custo, numa arquitetura Master/Slave em Daisy-chain, ou seja, um Módulo Mestre protege, monitora e controla, por meio de um barramento isolado de comunicação isoSPI, os 23 Módulos de Bateria, cada um com seus circuitos próprios de monitoramento e controle das células, porém obedecendo aos comandos enviados pelo microcontrolador do Módulo Mestre (Figura 6).

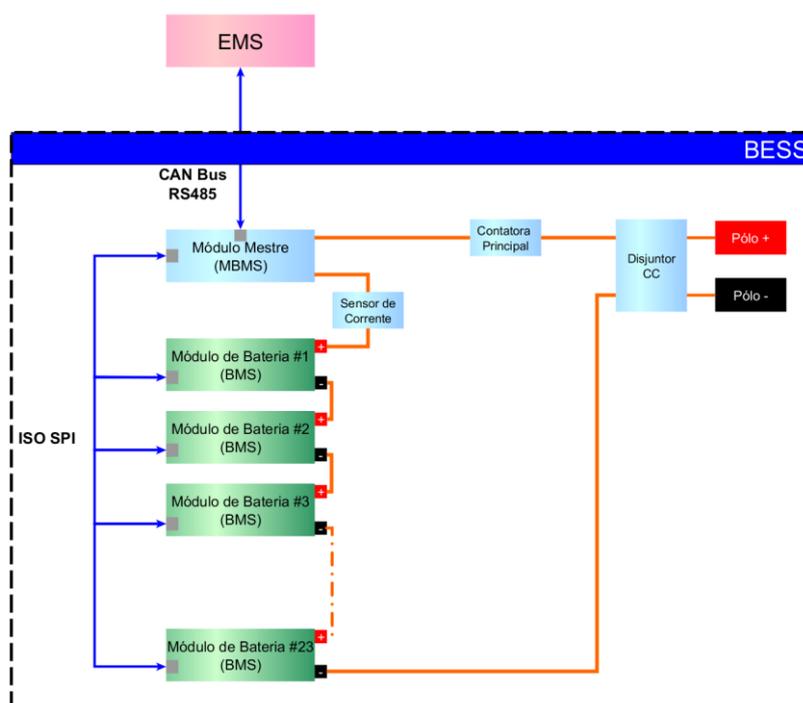


Figura 6 - Arquitetura Master/Slave em Daisy-chain da bateria

A Figura 7 apresenta a placa de circuito impresso (PCB - *Printed Circuit Board*) do BMS dos 23 Módulos de Bateria, com destaque para os resistores de potência utilizados no balanceamento de carga das células, e a Figura 8 apresenta a ilustração da PCB do Módulo Mestre (MBMS). As PCBs dos Módulos de Bateria (BMS) já foram fabricadas, montadas e testadas e, no momento, a PCB MBMS do Módulo Mestre está em fase de fabricação.



Figura 7 - Placa de circuito impresso (PCB) dos Módulos de Bateria (BMS)

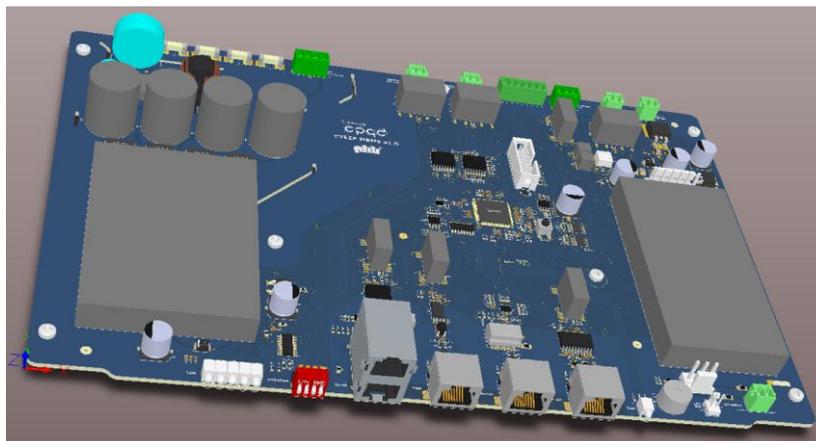


Figura 8 - Ilustração da PCB do Módulo Mestre (MBMS)

4. ALGORITMOS

Dentre as diversas funções do BMS, a principal delas é o balanceamento de carga das células da bateria. Além desta tarefa são realizadas medição das tensões, corrente e temperaturas das células, determinação do SoC e SoH e, baseado nessas variáveis, determinação da Vida Útil Remanescente (RUL - *Remaining Useful Life*) da bateria.

Especificamente, a partir dos dados coletados de cada célula, o sistema deve ser capaz de calcular ou estimar determinados parâmetros relativos ao estado do conjunto das células da bateria, fornecendo dados úteis que permitem certas conveniências ao usuário do sistema, sendo os principais:

- Estado de Carga (SoC)
- Estado de Saúde (SoH)
- Detecção do desbalanceamento entre células

O SoC quantifica a carga disponível a cada instante, fornecendo um indicativo do tempo que a bateria pode ser utilizada (autonomia). É essencial para otimizar o uso inteligente da energia e pode ser usado no balanceamento e na prevenção da sobrecarga e sobredescarga da bateria.

O SoH quantifica a degradação das células, permitindo avaliar se a bateria ainda é capaz de atender às especificações de energia e potência da aplicação. À medida que a bateria envelhece, reações secundárias alteram sua estrutura interna, fazendo com que sua capacidade diminua e a resistência interna aumente.

Tanto o SoC quanto o SoH não podem ser medidos diretamente e devem ser inferidos a partir de grandezas primárias, como corrente e tensão das células. Por isso surge a necessidade de algoritmos que tratem as informações dos sensores do BMS e forneçam estimativas desses estados.

A diferença do nível de carga entre células de uma bateria é chamada de desbalanceamento. Para obter maior tensão e energia na bateria, suas células são conectadas em série - porém, dada as diferenças intrínsecas e de poderem estar sob condições de operação (como temperatura) diferentes entre si, o SoC de uma célula pode apresentar dispersão em relação às outras do mesmo conjunto.

Visto que o sistema deve proteger as células para evitar subtensão e sobretensão, as células mais “fracas”, que atingem as tensões extremas rapidamente, limitam a energia que a bateria é capaz de fornecer. Portanto, é necessário um mecanismo que elimine os desequilíbrios do SoC das células. Esse mecanismo é chamado balanceamento e consiste na transferência de carga de células consideradas desbalanceadas, por meio de elementos do hardware. Os processos de identificação e quantificação do desbalanceamento, e de decisão do modo de atuação do hardware, são responsabilidade do algoritmo de balanceamento do BMS.

4.1 Modelagem das células

A modelagem das células tem por objetivo subsidiar o desenvolvimento dos algoritmos do BMS e garantir sua precisão. Devido a complexidade para modelar todas as reações químicas que ocorrem dentro de uma célula de lítio-íon, a modelagem elétrica é útil ao prever o comportamento elétrico do sistema dentro das condições estabelecidas. A Figura 9 apresenta um circuito elétrico equivalente geral de baterias eletroquímicas.

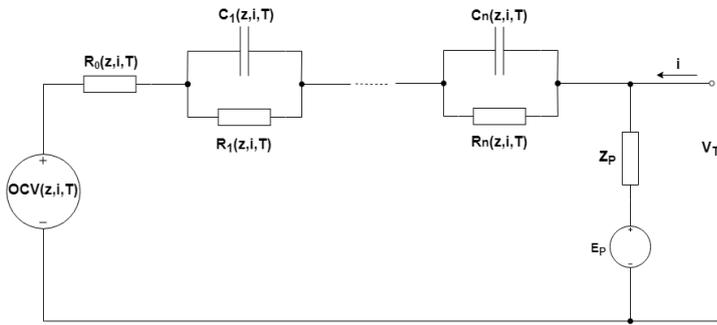


Figura 9 - Circuito elétrico equivalente geral de bateria

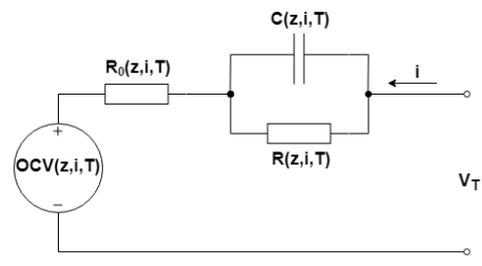


Figura 10 - Modelo elétrico equivalente adotado

Conforme Barillas, J. K. A. *at al.* (2015), a escolha do modelo a ser implementado parte do circuito geral, porém simplificações visam otimizar o compromisso entre precisão e custo computacional. Para aplicação estacionária bastam poucos ramos RC para descrever a dinâmica das células, devido ao baixo C_{rate} e, para lítio-íon, o ramo de impedância parasita pode ser desprezado. O circuito equivalente para modelar as células neste BMS é mostrado na Figura 10.

A entrada é a corrente i e a saída é a tensão de terminal V_T . Os parâmetros que modelam o comportamento da bateria variam com a corrente (i), o estado de carga (z) e a temperatura (T). Estes parâmetros são a tensão de circuito aberto da bateria OCV (*Open Circuit Voltage*), sua resistência interna R_0 , o resistor R e o capacitor C que modelam a dinâmica da bateria.

A corrente e a tensão de terminal podem ser medidas experimentalmente na célula. OCV , R_0 , R e C devem ser inferidos a partir de testes laboratoriais, formando tabelas relacionando os valores de cada parâmetro ao SoC, regime de corrente e temperatura. Em tempo real, os algoritmos embarcados no sistema de gerenciamento da bateria determinam, a partir dessas tabelas (*look-up-tables*), os valores mais adequados dos parâmetros considerando o estado anterior.

4.2 Estimação do Estado de Carga

O algoritmo de estimação do SoC foi desenvolvido usando o método de otimização denominado Filtro de Kalman. O filtro de Kalman (Figura 11) resolve o problema da estimação de estado em sistemas lineares ou linearizados, conforme apresentado por Zhang, C. *at al.* (2018). Nesta aplicação esse método fornece, além da estimativa do estado de carga, uma estimativa de sua incerteza, o que permite a incorporação de toda a informação disponível por sensores através da implementação com álgebra de matrizes.

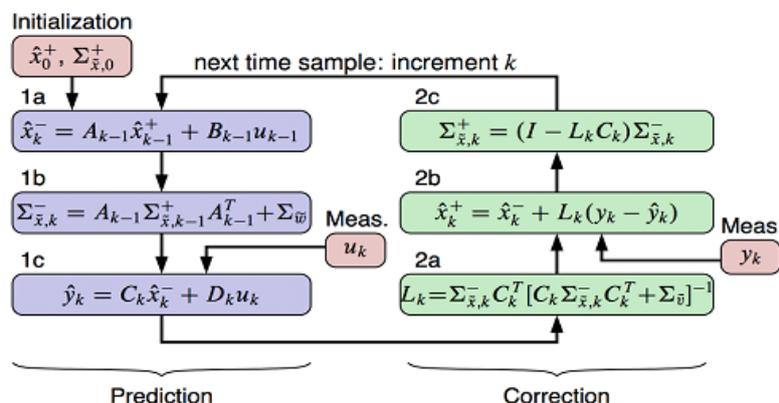


Figura 11 - Algoritmo Filtro de Kalman para estimação do SoC da célula de lítio-íon

Mesmo com um SoC inicial muito impreciso, a técnica garante a convergência. Para sua utilização é necessário o conhecimento sobre o modelo dinâmico do sistema e da relação entre os sensores e o estado. Como saída do observador é obtido o estado e a sua covariância estimada no instante presente, a partir de informações obtidas no instante anterior.

4.3 Estimação do Estado de Saúde

O algoritmo de estimação do SoH das células de lítio-íon foi projetado com base no método de extração de parâmetros por meio de precisos ensaios laboratoriais de envelhecimento da célula. Essa técnica configura-se no estado-da-arte para estimação do SoH de baterias, porém demanda tempo elevado de ensaio e grande capacitação laboratorial de alta precisão, o que gerou a necessidade do CPQd desenvolver e adquirir equipamentos de alta especificidade para ensaios de ciclagem de células de alta capacidade (160 Ah).

Baseia-se na metodologia de teste de vida acelerado na bateria por meio de diferentes temperaturas, profundidade de descargas, níveis de correntes e níveis de SoC para obter, por meio de regressão linear e não-linear, relações matemáticas entre a capacidade, temperatura, resistência interna e ciclos ao longo da vida da bateria conforme apresentado por Xiong, R. *at al.* (2018). As relações paramétricas servem de base para extrair tabelas de dados que incorporarão ao modelo matemático de envelhecimento da célula selecionada para o projeto.

A Figura 12 mostra a relação entre o SoH e os ciclos de recarga/descarga obtidos em teste de vida acelerado de três amostras de células LFP, e a Figura 13 mostra as relações entre OCV (diagrama da esquerda) e Resistência Interna (diagrama da direita) de uma célula LFP em função de seu SoC e ciclos de recarga/descarga em teste de vida acelerado.

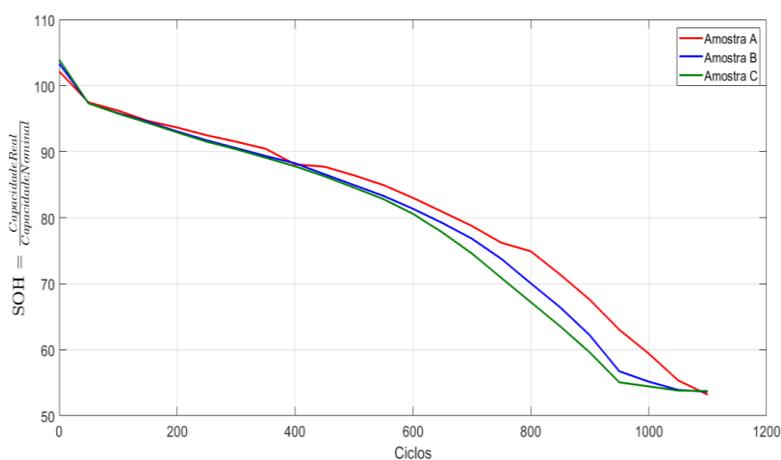


Figura 12 - Relação entre SoH e Ciclos de Recarga/Descarga de três células LFP, extraída de teste de vida acelerado

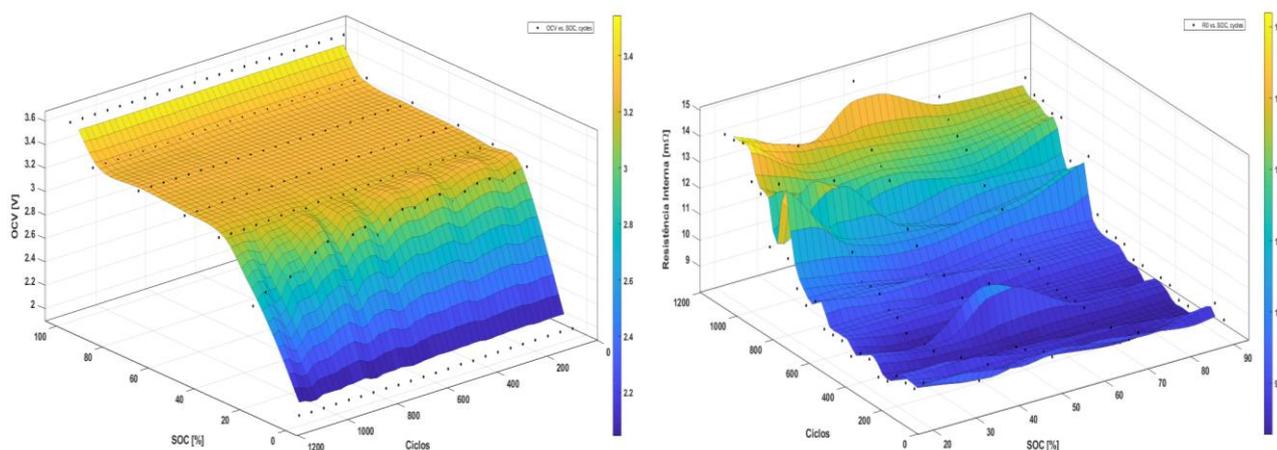


Figura 13 - OCV (esq.) e Resistência interna (dir.) x SoC x Ciclos de Recarga/Descarga de uma célula LFP

4.4 Algoritmo de Balanceamento

Segundo Omariba, Z. B. *at al.* (2017), algoritmo de balanceamento é responsável pela equalização dos níveis de tensão e SoC das células da bateria, garantindo operação homogênea e segura do grupo de células associadas em série. A precisão deste algoritmo maximiza a quantidade de energia que a bateria armazena e disponibiliza para o BESS.

A topologia de balanceamento adotada no projeto é do tipo passiva, ou seja, a diferença de carga entre as células é corrigida através da descarga individual das células com maior carga em resistores *shunt* chaveados. Portanto o objetivo deste algoritmo é controlar o acionamento das chaves MOSFETs que conectam as células aos resistores.

Este algoritmo utiliza a técnica conhecida por *outlier detection*, ramo da área de mineração de dados (*Data Mining*), baseado no aprendizado não supervisionado de Inteligência Artificial (IA). A técnica consiste no reconhecimento das células desbalanceadas criando grupos das células normais e anormais para posterior controle de

balanceamento sobre as células anormais, ou seja, não balanceadas. Para detecção das células anormais é considerada a modelagem da célula de modo que a tensão e o SoC de cada célula são levados em consideração para otimizar a equalização da carga. No momento os algoritmos estão em fase de testes, validações e ajustes.

5. EMPACOTAMENTO MECÂNICO

A solução de empacotamento mecânico dos módulos da bateria (Módulo de Bateria e Módulo Mestre) é um item muito importante no projeto da bateria, pois deve prover soluções que ajude a dissipação térmica e promova a adequada contenção mecânica de todos os componentes (células, BMS, cabos, etc.), suportando eventuais choques mecânicos e vibrações decorrentes do transporte e instalação, além de facilitar eventuais manutenções do sistema.

A Figura 14 apresenta uma vista interna das soluções de empacotamento mecânico dos módulos, resultado de vários estudos e simulações visando obter o melhor compromisso entre robustez, peso e desempenho térmico - cabe lembrar que cada Módulo de Bateria pesa mais de 60 kg. Atualmente estão em fase de prototipagem para avaliação de desempenho no laboratório.

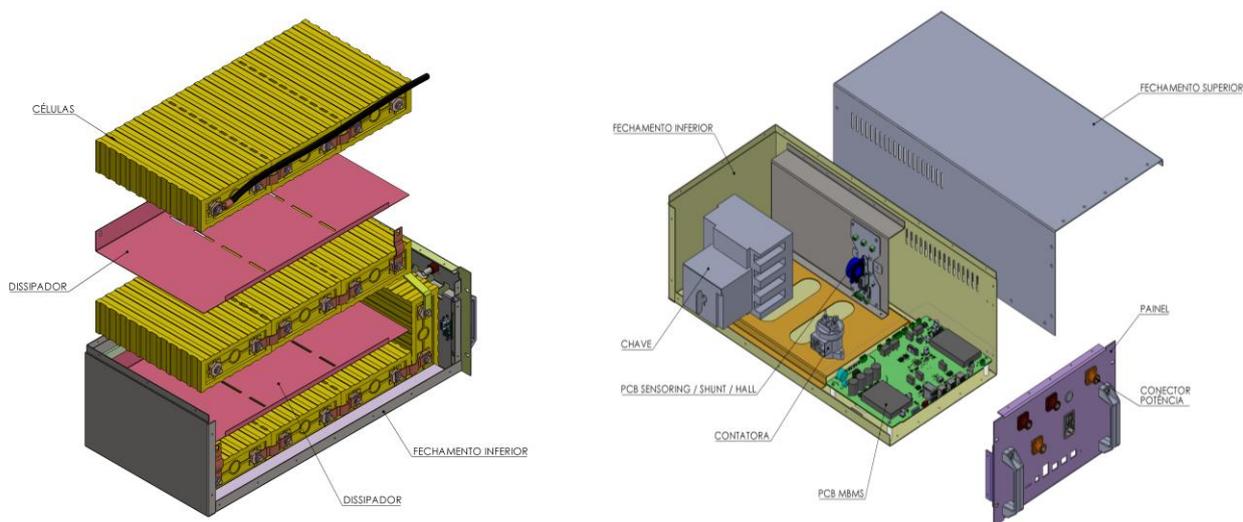


Figura 14 - Vista interna do empacotamento interno do Módulo de Bateria e do Módulo Mestre

No Módulo de Bateria pode ser observada a utilização de chapas metálicas dispostas entre as células para ajudar na estabilização e equalização da temperatura entre elas, além de atuarem na redução da temperatura e eliminação de eventuais "pontos quentes" (*hot spots*) entre as células. A disposição física das células foi projetada visando reduzir o volume do módulo e otimizar as interligações entre as células, com barramentos curtos, para permitir a circulação de correntes de até 160 A com a mínima queda de tensão e elevação de temperatura.

De modo similar foram aplicados os mesmos conceitos no empacotamento mecânico do Módulo Mestre que, apesar de não conter células de lítio-íon, possui componentes volumosos para controle e proteção da bateria, como chave eletromecânica e contatora, *shunt* de corrente e cabeamentos de alta tensão e alta corrente, além dos circuitos do microprocessador e periféricos e circuitos redundantes do controle principal da bateria.

6. CONCLUSÃO

O desenvolvimento da bateria está na fase de construção do protótipo de 100 kW / 117kWh, com instalação para teste de campo no IEE-USP prevista para abril/2020.

Com relação à bateria de lítio-íon cabe destacar que há uma corrida mundial nas pesquisas e desenvolvimentos de materiais dos eletrodos e eletrólitos, visando aumentar a vida útil, autonomia e segurança, e reduzir os custos, impulsionada principalmente pelo desenvolvimento dos veículos elétricos, cujos avanços refletem diretamente em outros mercados, como o de armazenamento de energia para o setor elétrico.

Agradecimentos

Este trabalho faz parte do programa de P&D Aneel cuja proponente é a ISA CTEEP e as executoras o CPqD, Hytron, IEE-USP e PHB, no contexto da Chamada N° 021/2016 - Projeto Estratégico: "Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro". O projeto é intitulado

"Fornecimento de Serviços Ancilares com Sistemas de Armazenamento de Energia em Sistemas Elétricos com Elevada Penetração de Geração Intermitente" N° Aneel: PD-00068-0038/2016.

REFERÊNCIAS

- Abada, S., Marlair, G., Lecocq, A., Petit, M., Sauvant-Moynot, V., Huet, F., 2016. Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review, *Journal of Power Sources* 306, pp. 178-192.
- Barillas, J. K., Li, J., Gunther, C., Danzer, M. A., 2015. A comparative study and validation of state estimation algorithms for Li-ion batteries in battery management systems, *Applied Energy* 155, pp. 455-462.
- Deng, D., 2015. Li-ion batteries: basics, progress, and challenges, 2015. *Energy Science & Engineering* 2015 vol. 3, n. 5, pp. 385-418.
- IEC 62620:2014 - Secondary Cells And Batteries Containing Alkaline or Other Non-Acid Electrolytes – Secondary Lithium Cells And Batteries for Use In Industrial Applications.
- Garita, V. V., Hanif, A., Narayan, N., Elizondo, L. R. and Bauer, P., 2019. Selecting a suitable battery technology for photovoltaic battery integrated module, *Journal of Power Sources* 438, pp. 1-12.
- Goriparti, S., Miele, E., Angelis, F., Fabrizio, E. D., Zaccaria, R. P., Capiglia, C., Review on recent progress of nanostructured anode materials for Li-ion batteries, *Journal of Power Sources* 257, pp. 241-443.
- Hannan, M., Hoque, M., Yosof, Y., Ker, P. J., 2018. State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendation, *IEEE Access, Special Section on Advance Energy Storage Technologies and Their Applications*, vol. 6, pp. 19362-19378.
- Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., Deng, T., 2018. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review, *Process in Natural Science: Materials International* 28, pp. 653-666.
- Marques, F. L. R., Aranha, J. C. M. S., Padela, F. F., Rosolem, M. F. N. C., Beck, R. F., 2019. Balancing Strategy for a Battery Applied in HEV Based on Bi-directional Flyback Converter and Outlier Detection, *Anais do Congresso SAE Brasil 2019, São Paulo, 2019-36-0242, ISSN 0148-7191 SAE International*.
- Omariba, Z. B., Zhang, L., Sun, D., 2017. Review of Battery Cell Balancing Methodologies for Optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicles, *IEEE Access*, vol. XX, pp. 1-18.
- Rosolem, M. F. N. C.; Beck, R. F., 2018. Novas Gerações de Baterias de Lítio para Veículos Elétricos e Híbridos - Progressos e Desafios, *Anais do Congresso SAE Brasil 2018, São Paulo*.
- Scrosati, B., Garche, J., 2010. Lithium batteries: Status, prospects and future, *Journal of Power Sources* 195, pp. 2419-2430.
- Zhang, C., Allafi, W., Dinh, Q., Ascencio, P., Marco, 2018. Online estimation of battery equivalent circuit model parameters and state of charge using decoupled least squares technique, *Energy* 142, pp. 678-688.
- Xiong, R., Li, L., Tian, J., 2018. Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods, *Journal of Power Sources* 406, pp. 18-29.

DEVELOPMENT OF LITHIUM ION BATTERY FOR ANCILLARY SERVICES

Abstract. *As part of the Aneel R&D Program - Strategic Call 21, CPqD, IEE-USP, PHB and Hytron are participating in an R&D project with ISA CTEEP entitled "Providing ancillary services with energy storage systems in electrical systems with high penetration of intermittent generation". One of the objectives of this project is to design, manufacture, install and operationalize a lithium-ion battery energy storage system to provide ancillary services, which is under the responsibility of CPqD Foundation and PHB. In this project, a national high voltage lithium-ion (LiB) battery of 700 V / 100 kW / 100 kWh is being developed. Unlike conventional lead-acid and alkaline battery technologies, which are intrinsically safe, for safe and reliable operation the lithium-ion battery needs an electronic management and control system, known as BMS (Battery Management System) which, in addition to protection and safety functions, executes algorithms to perform the State of Charge (SoC), State of Health (SoH) and energy balance between battery cells. In addition, mechanical and thermal packaging is critical to its performance and service life. This project does not aim to manufacture the lithium-ion cell in Brazil, as there are still no professional and industrial capabilities for this in the country, being necessary to carry out studies and laboratory tests on several models / manufacturers of cells, available on the international market, to define the cell that will be used in the battery. Once chosen and purchased, the cells are subjected to several tests, some lasting more than one year, in order to obtain information for parameterization of the BMS that is being designed simultaneously with these tests, as well as the mechanical and thermal packaging design of the battery. This paper presents the main aspects considered in the development of the battery and the results achieved so far.*

Key words: *Lithium-ion Batteries, Battery Management System, Ancillary Services*