

GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO - GDI

NOVAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM SUBSTITUIÇÃO ÀS BATERIAS TRADICIONAIS EM EQUIPAMENTOS DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE

CARLOS ADEMAR PURIM(1); LOURIVAL LIPPMANN JUNIOR(1); JULIANO DE ANDRADE(1); GUSTAVO ORTENZI(2); VICTOR GATI(1); IGOR HENRIQUE TOMIATTI(1); CAMILA MARÇAL GOBI PACHER LACTEC(1); ELEKTRO(2)

RESUMO

Foram pesquisadas novas tecnologias de armazenamento visando substituir as tradicionais baterias com tecnologia de chumbo ácido normalmente utilizadas nos equipamentos eletroeletrônicos que realizam as funções de monitoração, supervisão, controle e automação de sistemas elétricos, tanto na geração, como na transmissão ou distribuição. O objetivo principal foi desenvolver módulos de armazenamento de energia alternativos nas tensões de 12/24 volts que apresentem maior vida útil e com isso permitam a redução no custo operacional de manutenção. As tecnologias avaliadas foram sistemas de armazenamento com baterias de íons de lítio fosfato de ferro (LiFePo₄), banco de supercapacitores de camada dupla, e células de Titanato de Lítio.

PALAVRAS-CHAVE: Baterias, Supercapacitores, LiFePO, Titanato de Lítio.

1.0 INTRODUÇÃO

Os equipamentos eletroeletrônicos utilizados na operação das concessionárias de energia devem operar mesmo em condições adversas de energização. Por isso, geralmente possuem fontes auxiliares de energia. Estas fontes auxiliares, normalmente são oriundas de conjuntos de baterias que devem apresentar a capacidade suficiente para manter os equipamentos em seus estados de operação contínua, até o restabelecimento das fontes de energia primárias que alimentam os equipamentos eletroeletrônicos ou serviços auxiliares. Um grande problema para as empresas de energia elétrica é a manutenção das baterias responsáveis pela alimentação em corrente contínua dos equipamentos, pois as tecnologias empregadas na fabricação das atuais baterias apresentam vida útil de poucos anos em uso, ou o equivalente a relativamente poucos milhares de ciclos de carga e descarga necessitando, portanto, serem substituídas dentro de certos períodos estabelecidos. Em locais distantes ou de difícil acesso, este custo para troca obrigatória das baterias dos equipamentos se torna ainda mais representativo, pois, além do material em si (as próprias baterias), deve-se acrescentar os custos da mão de obra (homens/hora), gastos com veículo, combustível e tempo de deslocamento.

Neste trabalho foram pesquisadas e analisadas 3 tecnologias distintas para armazenamento de energia: supercapacitores, baterias de íons de lítio fosfato de ferro (LiFePo₄) e células de Titanato de Lítio, ver Figura 1. Foram desenvolvidos e montados módulos de armazenamento de 14V/24V incluindo circuitos eletrônicos para carregamento, balanceamento e proteção BMS (Battery Management System). O objetivo foi avaliar estas tecnologias em substituição aos atuais sistemas baseados na tecnologia chumbo ácido.

As principais vantagens na adoção destas novas tecnologias está em: maior confiabilidade nas operações dos equipamentos automatizados; aumento dos índices de sucesso no restabelecimento de energia; diminuição nos indicadores DEC e FEC; prolongamento da vida útil das fontes de armazenamento de energia; diminuição da logística da compra e estocagem das baterias para reposição; redução dos custos na operação de substituição de baterias; diminuição na alocação de recursos humanos e deslocamento de equipes para serviços de manutenção de baterias, liberando-as para outras demandas da empresa.

2.0 DESCRIÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO

Neste item será feita uma breve descrição de cada uma das tecnologias de armazenamento de energia consideradas neste trabalho. Resumo dos princípios de operação, apenas para embasar o entendimento das características técnicas, estas sim, bastante importantes para o trabalho. Lembrando que os sistemas de armazenamento serão utilizados em sistemas estacionários de backup, esse tipo de aplicação embasou a seleção dos dispositivos e também os ensaios de laboratório a que foram submetidos. Ao final deste item serão apresentadas as características técnicas principais dos modelos de supercaps e bateria utilizados, para facilitar a comparação (Figura 1).



Figura 1. Componentes que foram avaliados: Supercapacitores, célula de Titanato de Lítio e bateria LiFePO

2.1 Capacitores de dupla camada eletroquímica

Capacitores são dispositivos que armazenam energia elétrica na forma de campo elétrico. Os tradicionais, eletrostáticos, o fazem entre folhas condutoras separadas por um dielétrico. Nos capacitores eletrolíticos, o material dielétrico é um filme de passivação num eletrólito, e no caso dos capacitores de dupla camada eletroquímica, ou EDLCs (*Electrochemical Double Layer Capacitors*), a energia elétrica é armazenada entre partículas de um material condutor e íons dissolvidos em um eletrólito. Estas diferenças, são ilustradas na Figura 2.

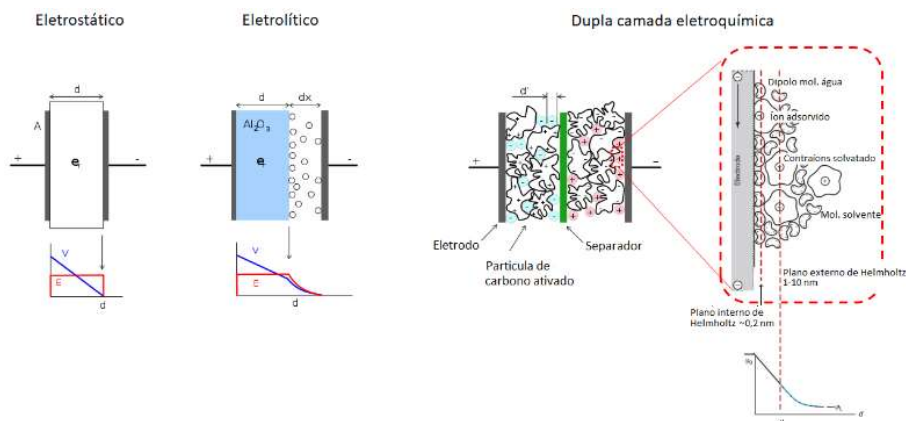


Figura 2 - Representação esquemática dos tipos típicos de capacitores, Eletrostático, Eletrolítico e EDLC, da esquerda para direita. Detalhe da formação da dupla camada eletroquímica nas partículas de um eletrodo do EDLC.

A quantidade de energia armazenada é proporcional à diferença de potencial e à área superficial, mas inversamente proporcional à distância entre os polos. No caso dos EDLCs, são utilizados materiais de alta área específica (da ordem de $1000\text{m}^2/\text{g}$) e a distância característica é da ordem da camada externa de Helmholtz (1-10 nm). Esta é a chamada “dupla camada eletroquímica”, e se forma na interface entre duas fases adjacentes de polaridades opostas, como por exemplo, eletrodo/eletrólito, suspensões coloidais e líquidos orgânicos. No caso dos EDLCs, a camada de Helmholtz funciona como um dielétrico nanométrico entre uma partícula condutora e o eletrólito. Estas características construtivas são responsáveis pela elevada densidade energética destes dispositivos quando comparados com os outros tipos de capacitores, e a importância desta camada que acaba nomeando esta classe de capacitores (1).

Os EDLCs foram originalmente chamados de “supercapacitores” pelo fabricante Nippon Electric Company (NEC), e outras empresas utilizaram outros termos para se referir aos seus produtos – “ultracapacitores”, pela Pinnacle Research Institute e “gold capacitor” pela Panasonic – mas todos estes se baseiam nos mesmos princípios de operação. Neste documento se utilizará o termo “supercapacitor”, para se referir a estes dispositivos, independente do fabricante, metonímia similar ao que acontece com outros produtos/marcas devido ao uso cotidiano.

A tensão máxima típica de operação de supercapacitores é entre 2,5 e 3,0V que podem armazenar em torno de 4,0Wh/kg útil (considerando descarga até metade da tensão máxima), e em torno de 8,0 Wh/kg total (baterias chumbo ácido, por exemplo, podem armazenar em torno de 40Wh/kg)

2.2 Baterias íons de Lítio Fosfato de Ferro (LiFePO₄)

O lítio é o elemento químico com menor potencial de redução, permitindo que suas baterias tenham o maior potencial de célula possível para um determinado cátodo e é o terceiro elemento mais leve, resultando em uma alta capacidade volumétrica e alta densidade de potência. Além disso, o lítio possui um dos menores raios iônicos e, embora os cátions multivalentes permitam maior capacidade de carga para cada íon, a carga adicional reduz significativamente sua mobilidade. A difusão iônica nos eletrodos sólidos é, muitas vezes, o fator limitante do desempenho da bateria (2)

Todas as tecnologias de baterias de íons de lítio funcionam segundo um mesmo princípio denominado de intercalação de íons. Durante a carga, os íons de lítio são forçados a se deslocar pelo eletrólito e se intercalam entre os planos da matriz de grafite do eletrodo negativo (processo que não é espontâneo). Durante a descarga, os íons de lítio percorrem o caminho oposto, eles se deslocam desde o eletrodo negativo até o positivo e se intercalam entre os planos do material deste eletrodo (num processo espontâneo). Desta forma, estas baterias não apresentam reações químicas semelhantes às de outros tipos de baterias (chumbo-ácido, sódio, etc.), ela funciona através do deslocamento e intercalação dos íons de lítio entre os eletrodos positivo e negativo.

Como a grande maioria das baterias íons de lítio comerciais, utilizam grafite como material ativo no eletrodo. O baixo potencial de intercalação do lítio no grafite permite que estas baterias operem em elevados valores de tensão (lembrando que o potencial da bateria é a diferença entre os potenciais dos eletrodos negativo e o positivo). Entre outras coisas, porém, esse baixo potencial facilita a formação de dendritas de lítio metálico, o que limita a corrente máxima de carga destas baterias.

As baterias de íons lítio fosfato de ferro utilizam o LiFePO_4 (com aditivos) como material da placa positiva, que é o grande diferencial da tecnologia. São baterias que utilizam eletrólitos orgânicos então ainda apresentam risco de fogo e explosão em falhas catastróficas, mas são intrinsicamente mais seguras que as outras tecnologias da família íons de lítio tradicionais que levam cobalto. Os valores de tensão de operação normal de células de íons lítio fosfato de ferro são entre 3,6V e 2,5V, com valores de densidade de energia entre 80Wh/kg e 120Wh/kg (já considerando o peso dos circuitos eletrônicos de proteção).

2.3 Baterias de Titanato de Lítio

O princípio de operação destas baterias é o mesmo das do item anterior, de intercalação e de intercalação de íons de lítio entre planos e matrizes sólidas dos eletrodos. A grande diferença para este tipo de bateria é que ela não utiliza grafite como material do eletrodo negativo e sim óxido de lítio e titânio, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO).

O potencial de equilíbrio do eletrodo negativo é mais elevado, o que diminui a tensão da bateria (tensão máxima de 2,5V, contra os 3,65 da LFP, por exemplo), mas permite que sejam utilizadas correntes bem mais elevadas sem risco de formação de dendritas. Além disso, o titanato de lítio sofre uma variação de volume muito pequena durante a intercalação dos íons de lítio (bem menor que no grafite), isso implica em uma degradação muito mais lenta, logo, muito mais ciclos de carga e descarga até o final da vida da bateria.

Esta tecnologia é muito mais recente que as LFP, no entanto. Por este motivo há poucos fornecedores, e sobre os quais, não se dispõe de muita informação. Por este motivo o desenvolvimento do sistema de controle para esta tecnologia é uma contribuição original do projeto, não só no âmbito desta aplicação, mas é um produto raro inclusive em âmbito internacional.

A Tabela 1 apresenta alguns dos valores de parâmetros elétricos e operacionais dos dispositivos de armazenamento de energia que estão sendo trabalhados neste projeto. São dados compilados a partir de informações dos fabricantes.

Tabela 1 - Características operacionais das distintas opções de armazenamento testadas no projeto.

	C (F)	E (V)	Ah	Wh	Wh/kg	kW/kg	nº ciclos 25°C	Calendário ⁽¹⁾ 25°C (anos)	Calendário 45°C (anos)
EDLC	3.400	2,85	2,7	4,0	4,1	6,8	1 x 10 ⁶	10	0,2
LFP	-	24	60	1440	82,3 ⁽²⁾	0,07	3.500	20	~ 6
LTO	-	23	40	920	77	0,23	20.000	20	-
Pb selada		12	13	156	30		300	12	

Notas:

- (1) "Vida útil de calendário". Máximo de vida indicada pelo fabricante do dispositivo mantido numa tensão de flutuação.
- (2) O valor de densidade energética para bateria LFP inclui sistema de gerenciamento, ao contrário dos demais dispositivos.

Também foram incluídos os dados para um modelo de bateria chumbo ácido estacionária selada, já utilizada em sistemas de emergência de religadores, para comparação.

3.0 ENSAIOS DOS COMPONENTES DE ARMAZENAMENTO

Foram realizados ensaios de caracterização de parâmetros elétricos, para embasar o desenvolvimento dos circuitos de controle e também alguns ensaios de envelhecimento acelerado, para confrontar com as informações do fabricante e poder estimar a vida útil dos dispositivos. Nem todos os ensaios de envelhecimento foram finalizados até o momento. Cada tecnologia estudada tem suas peculiaridades, que refletiu nos detalhes dos experimentos, cujos resultados serão apresentados nos próximos subitens.

Como os dispositivos de armazenamento de energia serão instalados em campo, sob condições ambientais não controladas, para que fosse possível realizar uma estimativa mais segura da expectativa de vida, foi monitorado o perfil de temperatura de baterias em bateria instaladas em religadores de cidades da área de concessão da empresa, e considerado a combinação deste perfil em uma aplicação estacionária de backup para cada uma das tecnologias estudadas. Os detalhes deste estudo e os resultados serão apresentados no final deste item.

3.1 Supercapacitores

A Figura 3 mostra os resultados obtidos para os testes nos supercapacitores. O gráfico da esquerda mostra as curvas de tensão (em preto) e também de energia (em verde) ao longo de um ciclo de carga e descarga do supercap. São curvas específicas para o modelo da Maxwell 3400F e 2,85V (3), mas os perfis refletem o comportamento geral da tecnologia. A carga foi realizada em dois estágios CC (267A, até 2,85V) e CV (2,85V por 30 min), mas apenas a porção CC é apresentada na figura, para facilitar a visualização.

E o gráfico da direita mostra a capacitância de supercapacitores submetidos a distintos regimes de envelhecimento em flutuação. Mantidos em 25°C e 45°C e também em 2,85V e 2,5V. Em intervalos regulares de tempo, os supercapacitores eram equilibrados em plena carga e a 25 °C, e então medido seu valor de capacitância utilizando resultados de medidas de descarga, idênticas s da imagem da esquerda.

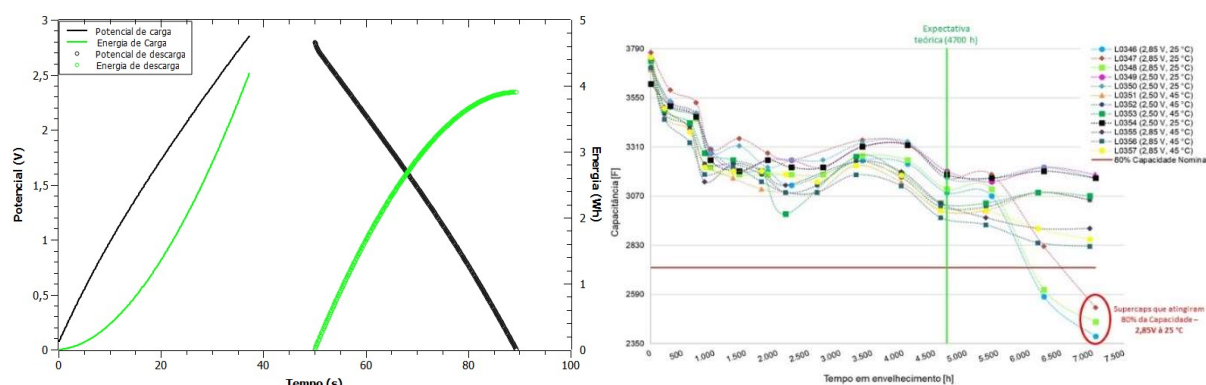


Figura 3 - Resultados para ensaios nos supercapacitores, Esquerda - Curvas de potencial e energia de um supercapacitor de 3500V, 2,85V e 4Wh durante ciclo de carga e descarga. Direita - Capacitância ao longo do envelhecimento em 25°C e 45°C, mantidos em tensões de flutuação de 2,5V e 2,85V.

Primeiro ponto importante e já conhecido é o comportamento praticamente linear da tensão ao longo do tempo, durante a carga e descarga. Outro aspecto a ser considerado é que os 4 Wh nominais são medidos para descarga até 0 V, o que não é prático para o circuito que faz o condicionamento da saída do banco de capacitores.

O término da vida útil de supercapacitores pode ser definido quando a capacitância atinge 80% do valor nominal, ou quando a sua resistência interna dobra de valor. No caso do presente trabalho, onde a aplicação é de backup de energia, sem necessidade de suprir potências elevadas, o critério dos 80% da capacitância nominal é o mais adequado. Este valor (2720F) é indicado por uma linha horizontal no gráfico da Figura 3. Verifica-se que, no caso de temperaturas mais elevadas, há ganho significativo de expectativa de vida caso seja possível trabalhar com tensão abaixo da de plena carga, mas há o inconveniente de se diminuir a autonomia do banco.

Importante também salientar que, para o regime de 2,85V e 25°C, a expectativa de vida calculada com informações do fabricante seria de 4700h e, nestas condições, os supercaps duraram cerca de 6250h

3.2 Baterias íons de Lítio Fosfato de Ferro (LiFePO)

Para o *design* apropriado do circuito de controle das baterias de LiFePO é necessário conhecer a dependência do potencial com o estado de carga da bateria, em ciclos de carga e descarga em distintos regimes. Isso pois, ao contrário dos supercapacitores, a tensão destes dispositivos tem uma dependência mais marcada com a corrente. Na Figura 4, gráfico da esquerda, são vistas as curvas de potencial ao longo do estado de carga para distintos regimes, C1 (descarga em uma hora), C5 (descarga em 5 horas) e C30 (descarga em 30 h, onde praticamente se desconsidera o efeito da resistência interna). E no gráfico da direita desta figura é apresentado o envelhecimento acelerado em ciclagem de baterias LiFePO. Ciclos entre 100% e 0% de estado de carga, em 45°C.

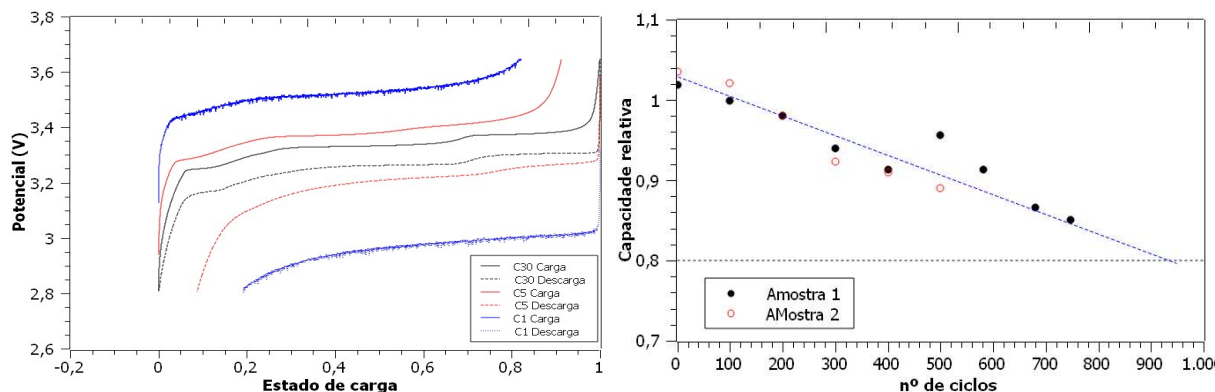


Figura 4 - Resultados dos ensaios para células LiFePO. Esquerda - Curvas de potencial ao longo do estado de carga em distintos regimes de corrente constante. Direita - Envelhecimento acelerado em ciclagem.

Nota-se que as curvas de descarga em C1 e C5 não atingem o 0% de estado de carga. Isso pois, nestes valores de corrente, a tensão da bateria atinge o limite inferior antes de fornecer o valor máximo de capacidade. Na prática isso significa que a capacidade da bateria depende da corrente de descarga, que é um fato conhecido e quantificado pela lei de Peukert. Similarmente, as curvas de recarga nestes regimes são interrompidas antes dos 100%. Isso ocorre, pois a carga é feita em duas etapas CC-CV, e a curva apresenta apenas o trecho de corrente constante das recargas.

No resultado do ensaio de envelhecimento, que é a imagem da direita na Figura 4, a cada 100 ciclos de envelhecimento, a bateria era equilibrada em 25°C e plena carga, e sua capacidade medida em regime nominal. Verifica-se que a estimativa para fim de vida útil destas baterias é em torno de 950 ciclos. De acordo com os dados do fabricante, nestas condições extremas, a vida esperada era de 1800 ciclos. Esta discrepância será considerada para previsão da expectativa de vida destas baterias em operação em campo.

Cabe salientar que o ensaio de envelhecimento em ciclagem tem alguma significância para as baterias, mas não para os supercapacitores, dado que se está desenvolvendo sistemas de armazenamento para aplicação estacionárias, onde se esperam ciclos infrequentes de carga e descarga, e estima-se que os supercapacitores forneçam mais de um milhão de ciclos e há trabalho na literatura que estima que esse valor pode ser até 15x maior (4). O ensaio de envelhecimento em flutuação das baterias LiFePO está em andamento.

3.3 Baterias de Titanato de Lítio

Para o *design* e parametrização do circuito de gerenciamento das baterias LTO também é necessário conhecer a dependência do potencial com o estado de carga, para distintos regimes, em ciclos com corrente constante. O resultado é apresentado na Figura 5.

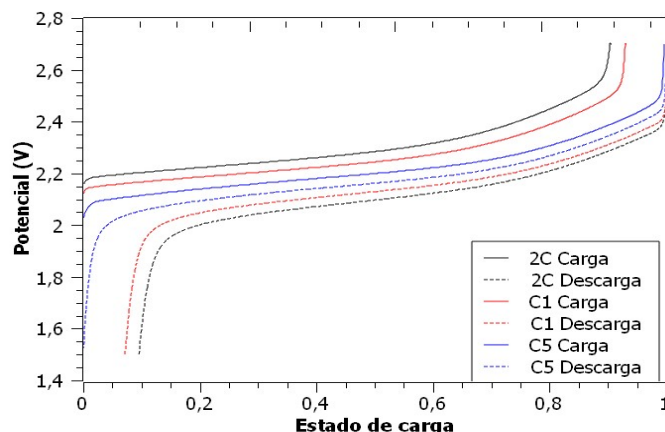


Figura 5 - Curvas de potencial ao longo do estado de carga para baterias LTO em distintos regimes de corrente constante.

Primeira diferença significativa é a janela de potencial na qual operam estas baterias, entre 1,5 V e 2,8 V, ao contrário dos 2,5 V e 3,6 V das LiFePO. Significa que mais células deste tipo de baterias devem ser utilizadas em série para compor um sistema de mesma tensão que aquelas.

Outra observação importante é que no caso da LTO foram testados regimes com correntes mais elevadas (até 2C, descarga completa em meia hora) e o comportamento, em geral foi menos sensível à corrente que no caso da LiFePO.

Não foram obtidos resultados válidos para o caso das baterias LTO. Como comentado no item anterior, esta tecnologia é relativamente recente, com poucos fornecedores e nenhum nacional. No início deste trabalho apenas um fornecedor com pouquíssimas credenciais foi capaz de atender o cronograma do projeto. As baterias deste fornecedor apresentaram resultado de envelhecimento muito aquém do esperado para tecnologia e também muito abaixo do informado. Ao longo do projeto foi possível adquirir estas baterias de um outro fornecedor, mais bem conhecido no mercado. Não foi possível realizar o ensaio de envelhecimento acelerado, mas os resultados de caracterização inicial, apresentados na Figura 5, foram muito melhores, além de experiência prévia já na montagem dos dispositivos e células deste fornecedor estão sendo utilizadas nos desenvolvimentos deste projeto.

3.4 Expectativa de vida útil dos sistemas de armazenamento em campo

Para fazer uma estimativa da vida útil inicial dos sistemas de armazenamento em campo é necessário conhecer o perfil de carga e também de temperatura ao qual estarão submetidos os distintos sistemas. Para o perfil de carga, como se trata de uma aplicação de fornecimento de energia de emergência, com ciclos esporádicos, fez-se uma consideração de que as baterias/supercapacitores iriam trabalhar exclusivamente em flutuação. Ou, em outras palavras, que os ciclos terão impacto desprezível na degradação total dos sistemas. E para se estimar os valores de temperatura, foram instalados registradores de temperatura em baterias de religadores em 6 cidades da área de concessão da Neoenergia, obtendo-se o perfil médio de temperatura ao longo de 2 meses.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta um resumo dos valores mínimos, médios e máximos de temperatura nas 6 cidades, bem como a previsão de expectativa de vida de cada um dos dispositivos de armazenamento de energia nestas condições. Para os supercapacitores foram incluídas previsões com distintos limites de operação de tensão.

Tabela 2 - Previsão de vida útil para sistema de armazenamento de energia de distintas tecnologias, em aplicação estacionária, em distintas cidades da área de concessão da Neoenergia.

	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	T _{média} (°C)	Supercaps (anos)	Supercaps correção Lab 2,8 V (anos)	Supercaps correção Lab 2,5 V (anos)	LFP (anos)	LTO (anos)
Barreiras	41,9	19,5	27,9	3,9	6,0	10,8	8,3	8,3
Bom Jesus da Lapa	40,4	20,4	28,4	3,9	6,0	10,8	8,3	8,3
Petrolina	40,8	21,4	30,8	2,5	3,8	6,9	8,0	8,0
Três Lagoas	44	22,2	31,3	2,3	3,5	6,4	8,2	8,2

Pau dos Ferros	47,4	25,8	35,8	1,3	2,0	3,6	7,3	7,3
Votuporanga	40,5	18,5	27,9	3,9	6,0	10,8	8,3	8,3

Verifica-se que, dependendo do estado de carga máximo do banco de supercapacitores, a sua expectativa de vida pode ser maior ou menor que a dos bancos de baterias.

Estes valores de previsão serão atualizados ao término do projeto, com mais valores de laboratório e de campo, mas foram obtidos utilizando os dados dos fabricantes, então já podem ser considerados para uma comparação inicial entre tecnologias.

4.0 DESENVOLVIMENTO DE CIRCUITOS PARA CARREGAMENTO E PROTEÇÃO

4.1 Circuitos para Balanceamento, Carga e Descarga de Supercapacitores

A grande dificuldade na implementação de fontes de tensão constante baseadas em supercapacitores é que, diferentemente das baterias, os supercapacitores não apresentam tensão linear na descarga, e sim uma reta descendente à medida que são descarregados, portanto inviabilizando seu uso direto na substituição das tradicionais baterias. Outra dificuldade é que os supercapacitores apresentam, tensão típica de 2,7 volts obrigando a combinação de diversos componentes em série para obtenção de uma tensão útil para energização de equipamentos eletrônicos. Por outro lado a interligação de supercapacitores em série acarreta a necessidade de balanceamento da tensão sobre os mesmos, para evitar que tensão limite individual ultrapasse o limite e provoque a perda da vida útil do mesmo.

Adicionalmente, para aproveitar ao máximo a energia armazenada em um supercapacitor, deve-se implementar um circuito “boost”, que é um tipo de circuito eletrônico que tem como objetivo manter uma tensão de saída nominal, mesmo que a tensão sobre os supercapacitores esteja decaindo continuamente. A Figura 6a apresenta o circuito “boost” com os balanceadores e proteções implementadas pelo chip LTC3350. E a Figura 6b apresenta o equipamento completo montado que foi validado na energização de um relógio SEL351 em substituição às baterias de chumbo ácido originais na tensão nominal de 24 volts. Para proteção dos componentes supercapacitores foi utilizado um sistema de balanceamento com maior capacidade Figura 1 com o chip SLG46116V do fabricante Silego Technology (Figura 7).

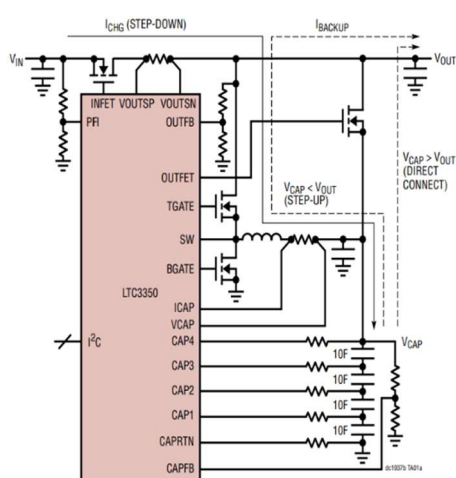


Figura 6 - a) Diagrama do componente LTC3350.

b) protótipo completo montado para avaliação.

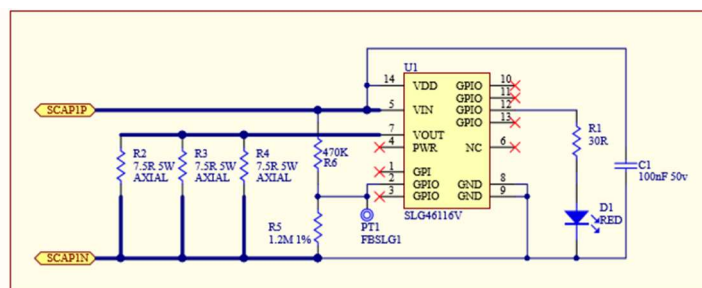


Figura 7 - Diagrama do balanceador de carga dos capacitores com o SLG46116V

4.2 CIRCUITOS PARA BALANCEAMENTO, CARGA E PROTEÇÃO PARA CÉLULAS DE TITANATO DE LÍTIO

As células de titanato de lítio, são boas substituições para as baterias chumbo ácido em questões capacidade de armazenamento, peso e vida útil que tornam a tecnologia como boa opção, porém deve se tomar cuidado com as características operativas e proteção da célula. Para operação normal e segura da bateria é necessário manter o mesmo nível de tensão em cada células que compõem a bateria, para isso é utilizado um BMS que possui a função de reduzir a diferença no carregamento de cada célula e balancear a tensão delas individualmente para manter no nível médio da bateria levando em consideração a quantidade de células. O sistema de balanceamento da tensão na célula é dado pelo chaveamento do *Mosfet* que irá conectar uma malha resistiva em paralelo com cada célula individualmente, para que as células com maior carga consigam-se descarregar independentemente do conjunto da bateria quando necessário e reduzir o desequilíbrio, conforme Figura 8 (5).

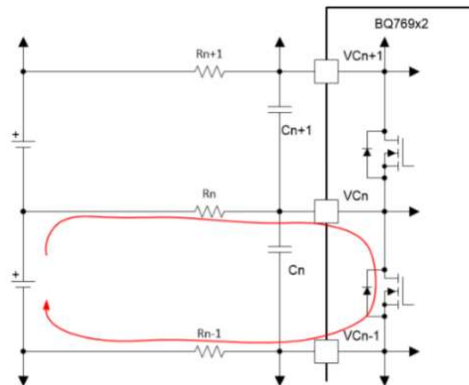


Figura 8 - Balanceamento de célula

O circuito BMS também adotam proteções relacionados com a sobre e sub tensão da célula, detecção de curto-circuito e entre outras características para o bom funcionamento, ele comanda a direção do fluxo de corrente através dos *Mosfet* de entrada e saída do conjunto como podemos observar na Figura 9 (6).

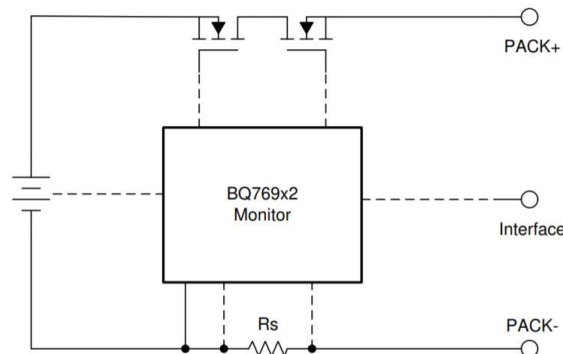


Figura 9 - Mosfet's atuadores da bateria

Quando a leitura dos sensores de temperatura e corrente estiverem abaixo do limite pré-definido, os *Mosfet's* estarão em modo de condução, possibilitando carga e descarga da bateria se as tensões individuais de cada célula estiverem dentro dos limites operacionais. No momento em que a tensão decai abaixo do limite, somente o *Mosfet* de carga é acionado, o outro *Mosfet* possibilita somente o sentido de corrente para carga devido ao diodo intrínseco do mesmo. Por outro lado, quando a tensão está acima do limite, somente o *Mosfet* de descarga é acionado e o *Mosfet* de carga permanece desligado para permitir somente corrente de descarga.

5.0 CONCLUSÃO

Através dos ensaios em laboratório, foi possível levantar e identificar a dependência do potencial com o estado de carga das baterias. Considerando a segurança, evitar sobre carga e sobre descarga é importante para permitir otimizar a vida útil das baterias, evitando permanência em estados de carga elevados, sabidamente deletérios para as baterias da família íons de lítio. No ensaio de degradação acelerada em ciclagem a bateria LiFePO apresentou vida útil abaixo do esperado pelo *datasheet*. Cabe salientar, no entanto, que este regime de operação em ciclagem não é o que se espera da bateria em campo. De qualquer maneira, pode-se compensar a degradação acelerada, devido à temperatura, diminuindo o estado de carga máximo e médio.

Já os supercapacitores apresentaram comportamento de tensão contra estado de carga esperado, mesmo para um alto valor de corrente. Também mostraram um desempenho frente à flutuação acima do sugerido pelo fabricante. E os resultados de previsão da expectativa de vida do sistema de armazenamento em campo, montado com as distintas tecnologias, mostrou que a melhor desempenho esperado para as baterias, mas os supercapacitores podem ter expectativa de vida similar (e até superior), caso seja admissível uma diminuição da autonomia esperada ou seja, operar em tensões máximas abaixo do normalmente estipulado pelos fabricantes.

6.0 REFERÊNCIAS

- (1) CONWAY, B. E. **Electrochemical Supercapacitores - Scientific Fundamentals And Technological Applications**. New York: Plenum Publishers, 1999.
- (2) NITTA, N. et al. Li-Ion Battery Materials: Present And Future. **Materials Today**, v. 18, n. 5, p. 252-264, jun. 2015.
- (3) MAXWELL TECHNOLOGIES. K2 ULTRACAPACITORS - 2.85V/3400F. **Maxwell**. Disponível em: <https://www.maxwell.com/images/documents/K2_2_85V_DS_3000619EN_3_.pdf>. Acesso em: 17 set. 2021.
- (4) MURRAY, D. B.; HAYES, J. G. Cycle Testing of Supercapacitors For Long-Life Robust Applications. **IEEE Transactions On Power Electronics**, 30, n. 5, maio 2015.
- (5) SUNNA, M. Cell Balancing with BQ76952, BQ76942 Battery Monitors. **Texas Instruments**, out. 2020. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/an/sluaa81/sluaa81.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2021.
- (6) MASSOTH, W. Using Low-Side FETs with the BQ76952 Battery Monitor Family. **Texas Instruments**, jan. 2021. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/an/sluaa84/sluaa84.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2021.

DADOS BIOGRÁFICOS



(1) CARLOS ADEMAR PURIM

Professor aposentado do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologias pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - Lactec. Até 2020 foi Gerente da Divisão de Eletrônica do Lactec onde atuou por 18 anos. Na sua trajetória profissional destacam-se ainda o trabalho como Gerente de P&D da Schause S/A e como sócio e Diretor Técnico da empresa Conecta Automação Ltda. Atualmente é Consultor Senior do Lactec.

(2) LOURIVAL LIPPMANN JUNIOR

Engenheiro Eletrônico pelo ITA, Mestre em Automação Industrial pela UTFPR, técnico em Eletrônica pelo CEFET-PR. Experiência de 35 anos na área de P&D para o setor elétrico, ex-professor de engenharia na UTFPR e PUC-PR. É pesquisador no LACTEC, atuando em projetos de P&D para o setor elétrico nos temas: conectividade para Smart grid e Smart city, fontes alternativas de energia, energy harvesting, sistemas de armazenamento e visão computacional.

(3) CAMILA MARÇAL GOBI PACHER

Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Federal do Paraná - PIPE (2017) e Bacharel em Química pela Universidade Federal do Paraná (2014). Atualmente faz parte do quadro de colaboradores do Lactec, atuando no segmento de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, tendo atuado principalmente em temas relacionados com eletroquímica aplicada, com ênfase em baterias e corrosão e com o desenvolvimento de novas tecnologias, com foco no uso de novos materiais.

(4) JULIANO DE ANDRADE

Engenheiro Químico (2003), Doutor em Engenharia de Materiais (2010), na área de eletroquímica de baterias. Pesquisador do grupo de Eletroquímica Aplicada do Lactec. Coordena e desenvolve projetos de pesquisa em temas ligados a Armazenamento de Energia. Experiência em mecanismos de carga e descarga e produção de baterias chumbo ácido. Operação e testes não destrutivos de baterias íons de lítio e supercapacitores eletroquímicos. Modelos de operação de previsão de vida útil de dispositivos de armazenamento eletroquímico.

Também é professor do Mestrado Profissional em Desenvolvimento de Tecnologia- Lactec, onde ministra disciplinas de Engenharia de Materiais e Sistemas de Armazenamento de Energia.

(5) GUSTAVO ORTENZI

Escolar:- Doutorando em Engenharia Elétrica pela UNICAMP- Mestre em Engenharia Elétrica pela UNICAMP- Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica pela UNIFEI.- BlackBelt Treinado pela Whirlpool Inc
Empresas: Eleketro/Neoenergia: Engenheiro Sênior de Medição e Tecnologia, e Engenheiro Sênior de Automação da Distribuição Itron: Engenheiro de Gerenciamento de Projetos, e Engenheiro Sênior de Desenvolvimento de Hardware Elsys: Engenheiro Sênior de Desenvolvimento Whirlpool: Engenheiro de Desenvolvimento, Líder Técnico de Microondas, Líder Técnico Laboratório de Desenvolvimento e Testes EMC/EMI

(6) VICTOR GATI

Victor Gati, nascido em 26/03/1990 em São Jose do Rio Preto, engenheiro eletricitista em 2017 e mestrado em 2019 pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná em Curitiba. Atualmente é pesquisador do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento Lactec. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, geração de energia renovável, filtro ativo de potência, sistemas de controle eletrônicos, armazenamento de energia e carregadores rápido para veículos elétricos.

(7) IGOR HENRIQUE TOMIATTI

Engenheiro Eletrônico pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (2020). É bolsista do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec). Suas áreas de atuação são: desenvolvimento de hardware, programação de microcontroladores e rotina de testes.