UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GABRIEL ALMEIDA DE AGUIAR

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE CÉLULAS DE ION LÍTIO DE BATERIAS DE NOTEBOOK

CUIABÁ – MT
DEZEMBRO, 2022

GABRIEL ALMEIDA DE AGUIAR

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE CÉLULAS DE ION LÍTIO DE BATERIAS DE NOTEBOOK

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fabricio Parra Santilio

CUIABÁ – MT

DEZEMBRO, 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

A282a Aguiar, Gabriel Almeida de.
Análise estatística do processo de recuperação de células de ion-lítico de baterias de notebook [recurso eletrônico] / Gabriel Almeida de Aguiar. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 23 f., il. color., pdf). -- 2022.

Orientador: Fabricio Parra Santilio.
TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2022.
Modo de acesso: World Wide Web: https://bdm.ufmt.br.
Inclui bibliografia.

1. Células de íon lítio, Reutilização de baterias de notebook, Baterias de notebook. I. Santilio, Fabricio Parra, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

DESPACHO

Processo nº 23108.103780/2022-60

Interessado: GABRIEL ALMEIDA DE AGUIAR

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA MONOGRAFIA:

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE CÉLULAS DE ION-LÍTIO DE BATERIAS DE NOTEBOOK.

ALUNO: GABRIEL ALMEIDA DE AGUIAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 14 de dezembro de 2022.

Nota: 9,82

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fabricio Parra Santilio

Orientador

Prof. Dra. Camila dos Anjos Fantin

Examinadora

Eng. Me. Túlio Sérvio José da Silva

Examinador

Documento assinado eletronicamente por **FABRICIO PARRA SANTILIO**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 14/12/2022, às 17:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .

Documento assinado eletronicamente por **CAMILA DOS ANJOS FANTIN**, **Coordenador(a) de Ensino de Graduação em Engenharia Elétrica - FAET/UFMT**, em 14/12/2022, às 17:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **TULIO SERVIO JOSE DA SILVA**, **Técnico Administrativo em Educação da CEG em Eng. Elétrica / FAET - UFMT**, em 14/12/2022, às 17:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5371117** e o código CRC **5B52401F**.

Referência: Processo nº 23108.103780/2022-60 SEI nº 5371117

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me fornecer energia e disciplina para a realização dos meus estudos durante todos esses anos. Agradeço também ao meu pai, Joacir Martinho de Aguiar, por todo apoio a mim entregue durante todo o tempo da minha vida pessoal e acadêmica. Ao meu avô, por sempre me conduzir à escola, pelos conselhos e exemplo de vida, a minha falecida avó, pelos ensinamentos e cuidados e a minha tia, por ajudar na minha formação pessoal desde a infância. A toda minha família, por ajudarem a me formar pessoalmente e contribuírem para que eu tornasse o que sou hoje. Grato pelos meus amigos, pelo apoio durante todo o tempo da graduação. Agradeço também ao meu orientador, por me fornecer toda a ajuda necessária para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

AGUIAR, G.A. de. **Análise estatística do processo de recuperação de células de ion-lítio de baterias de notebook**. 2022. 24f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2022.

Os avanços na tecnologia oferecem enormes vantagens para a humanidade, mas também apresentam muitos desafios ao lidar com a manutenção de ecossistemas saudáveis. Isso ocorre devido aos efeitos nocivos que o descarte inadequado de determinados componentes pode ter na saúde das pessoas e no meio ambiente, portanto, a criação e o aperfeiçoamento de métodos para que esse problema seja, ao menos, dirimido, é essencial. As baterias de íon lítio, por exemplo, são extensamente utilizadas nos mais variados dispositivos, principalmente por apresentarem um longo ciclo de vida, capacidade de carga rápida e alto custo-benefício, porém, ao serem descartadas de maneira inapropriada, podem causar os mais variados danos ao meio biótico. O presente trabalho aborda uma apresentação estatística dos resultados de uma pesquisa realizada por pesquisadores do curso de Engenharia Elétrica da UFMT, ao qual se dispuseram a coletar dados de células usadas de íon lítio presentes em baterias de notebooks. Este trabalho explora os resultados da pesquisa tendo o seu foco no método de reutilização utilizado, visando demonstrar sua capacidade e eficiência na reativação dessas células. Por fim, é possível verificar que o método de reativação obteve um desempenho significativo na recuperação das células de baterias de notebook, com um reaproveitamento de quase cinquenta porcento.

Palavras-chave: Células de íon lítio. Reutilização de baterias de notebook. Baterias de notebook.

ABSTRACT

AGUIAR, G.A. de. **Statistical analysis of the recovery process of lithium-ion cells from notebook batteries**. 2022. 24f. Final Course Work (Graduation in Electrical Engineering) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2022.

Advances in technology offer enormous advantages for mankind, but also present many challenges in dealing with the maintenance of healthy ecosystems. This is due to the harmful effects that improper disposal of certain components can have on people's health and the environment, so creating and improving methods to at least alleviate this problem is essential. Lithium-ion batteries, for example, are widely used in various devices, mainly because they have a long-life cycle, fast charge capacity, and high cost-effectiveness; however, when disposed of inappropriately, they can cause a variety of damages to the biotic environment. This article is a statistical presentation of the results of a research conducted by researchers from the Electrical Engineering course at UFMT, who set out to collect data from used lithium ion cells present in notebook batteries. This paper explores the results of the research with a focus on the reuse method used, aiming to demonstrate its capability and efficiency in reactivating these cells. Ultimately, the reactivation method achieved significant performance in the recovery of notebook battery cells, with almost fifty percent reuse.

Keywords: Lithium-ion cells. Battery reuse. Notebook batteries.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Estudo indicando que a demanda por lítio para baterias deve aumentar significativamente até 2050 [4]. 13
Fig. 2. Baterias de notebook recebidas como doação. 13
Fig. 3. Processo de desmontagem das baterias e extração das células de Íon Lítio. 14
Fig. 4. Células sem danos químicos aparente. 14
Fig. 5. Exemplo de célula com dano químico. 14
Fig. 6. Aferições das tensões iniciais das células. 14
Fig. 7. iMAX B6 da SkyRC 15
Fig. 8. Local de coleta das células danificadas. 15
Fig. 9. Distribuição final das células. 15
Fig. 10. Reaproveitamento relativo médio das células que passaram pelo processo de reativação. 15
Fig. 11. Reaproveitamento relativo médio das células que não passaram pelo processo de reativação. 16
Fig. 12. Distribuição das baterias que apresentaram ao menos uma célula com dano químico. 16
Fig. 13. Distribuição das baterias que apresentaram ao menos uma célula com sobreaquecimento. 16
Fig. 14. Comparação da capacidade relativa de carga entre células do Tipo A e B. 17
Fig. 15. Valores de capacidade de carga obtido pelas células. 17
Fig. 16 Gráfico de dispersão entre o Reaproveitamento Médio Relativo e a Tensão Residual. 17

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

V	Tensão.
NiCd	Níquel Cádmio.
NiMH	Níquel Metal Hidreto.
UFMT	Universidade Federal de Mato Grosso.
PET	Programa de Ensino e Tutorial.

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO 12

II. METODOLOGIA 13

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES 15

IV. CONCLUSÕES 18

V. AGRADECIMENTOS 18

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 18

APÊNDICE 19

ANEXO 20

ANEXO A 21

ANEXO B 22

ANEXO C 23

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE CÉLULAS DE ION LÍTIO DE BATERIAS DE NOTEBOOK

Gabriel Almeida de Aguiar, Samila Pereira, Fabricio Parra Santilio
Universidade Federal de Mato Grosso UFMT. Cuiabá, Mato Grosso
gabriel.almeida.aguiar@gmail.com, samila.pereira2000@gmail.com, fabricio.santilio@ufmt.br

***Resumo* – Os avanços na tecnologia oferecem enormes vantagens para a humanidade, mas também apresentam muitos desafios ao lidar com a manutenção de ecossistemas saudáveis. Isso ocorre devido aos efeitos nocivos que o descarte inadequado de determinados componentes pode ter na saúde das pessoas e no meio ambiente, portanto, a criação e o aperfeiçoamento de métodos para que esse problema seja, ao menos, dirimido, é essencial. As baterias de íon lítio, por exemplo, são extensamente utilizadas nos mais variados dispositivos, principalmente por apresentarem um longo ciclo de vida, capacidade de carga rápida e alto custo-benefício, porém, ao serem descartadas de maneira inapropriada, podem causar os mais variados danos ao meio biótico. O presente artigo aborda uma apresentação estatística dos resultados de uma pesquisa realizada por pesquisadores do curso de Engenharia Elétrica da UFMT, ao qual se dispuseram a coletar dados de células usadas de íon lítio presentes em baterias de notebooks. Este artigo explora os resultados da pesquisa tendo o seu foco no método de reutilização utilizado, visando demonstrar sua capacidade e eficiência na reativação dessas células. Por fim, o método de reativação obteve um desempenho significativo na recuperação das células de baterias de notebook, com um reaproveitamento de quase cinquenta porcento.**

***Palavras-Chave* – Células de íon lítio. Reutilização de baterias. Baterias de Notebook.**

STATISTICAL ANALYSIS OF THE RECOVERY PROCESS OF LITHIUM-ION CELLS FROM NOTEBOOK BATTERIES

***Abstract* - Advances in technology offer enormous advantages for mankind, but also present many challenges in dealing with the maintenance of healthy ecosystems. This is due to the harmful effects that improper disposal of certain components can have on people's health and the environment, so creating and improving methods to at least alleviate this problem is essential. Lithium-ion batteries, for example, are widely used in various devices, mainly because they have a long-life cycle, fast charge capacity, and high cost-effectiveness; however, when disposed of inappropriately, they can cause a variety of damages to the biotic environment. This article is a statistical presentation of the results of a research conducted by researchers from the Electrical Engineering course at UFMT, who set out to collect data from used lithium ion cells present in notebook batteries. This paper explores the results of the research with a focus on the reuse method used, aiming to demonstrate its capability and efficiency in reactivating these cells. Ultimately, the reactivation method achieved significant performance in the recovery of notebook battery cells, with almost fifty percent reuse.**

***Keywords* - Lithium-ion cells. Battery reuse. Notebook batteries.**

NOMENCLATURA

V	Tensão.
NiCd	Níquel Cádmio.
NiMH	Níquel Metal Hidreto.
UFMT	Universidade Federal de Mato Grosso.
PET	Programa de Ensino e Tutorial.

I. INTRODUÇÃO

A utilização de equipamentos eletrônicos na atualidade é costumeira e de grande importância. Através deles, as capacidades de interação entre os seres humanos aumentaram significativamente. Além disso, trouxe, também, um grande aumento de produtividade, além das diversas formas de lazer. Contudo, quando deixam de operar como esperado pelo usuário, muitos desses dispositivos são descartados de maneira inapropriada no meio ambiente. Para se ter uma ideia da magnitude do problema, quase meio milhão de toneladas de lixo eletrônico são descartadas todos os anos só no Brasil [1].

Em geral, tais dispositivos necessitam de uma fonte de carga para que suas funções sejam cumpridas de maneira apropriada e, uma dessas fontes, costumam ser as baterias de íon lítio. As baterias de íon lítio são usadas em diversos dispositivos tecnológicos, como smartphones, tablets e laptops, elas estão entre as mais usadas no mundo, isso devido a sua alta performance e custo benefício. Por exemplo, elas apresentam uma baixa taxa de autodescarga, indo a 2% a 8% ao mês e, em geral, possuem longos ciclos de vida, superando os 1000 ciclos. As células individuais operam normalmente entre 2,5 V e 4,3 V, sendo três vezes maior do que as células de NiCd (Níquel Cádmio) ou NiMH (Níquel Metal Hidreto), sendo, portanto, menos quantidades de células em uma bateria para atingir determinada tensão [2].

Sem dúvidas as células de íon lítio possuem grandes qualidades, todavia, elas possuem compostos químicos danosos aos seres humanos e ao meio ambiente [3], por isso, é necessário se ter uma observância em relação ao destino pós consumo pelo usuário comum. Em geral, a reciclagem é um destino regular às células, atualmente, empresas de reciclagem utilizam métodos específicos praticados em diferentes partes

do mundo para reciclar baterias com segurança. Isso ajuda a manter os componentes protegidos contra efeitos nocivos ao meio ambiente e à saúde pública [4], contudo, esse processo não permite mais a utilização das células. A reutilização, por outro lado, restaura parte da sua capacidade de carga, permitindo que as células sejam novamente utilizadas, além de reduzir a quantidade de células descartadas e preservar os recursos naturais. Ademais, a reutilização de células de íon lítio pode ser um recurso que ajude a suprir ao menos uma parte da demanda por lítio para baterias. Segundo [5], haverá uma alta expressiva em relação à demanda até 2050, como pode ser observado na projeção da Figura 1.

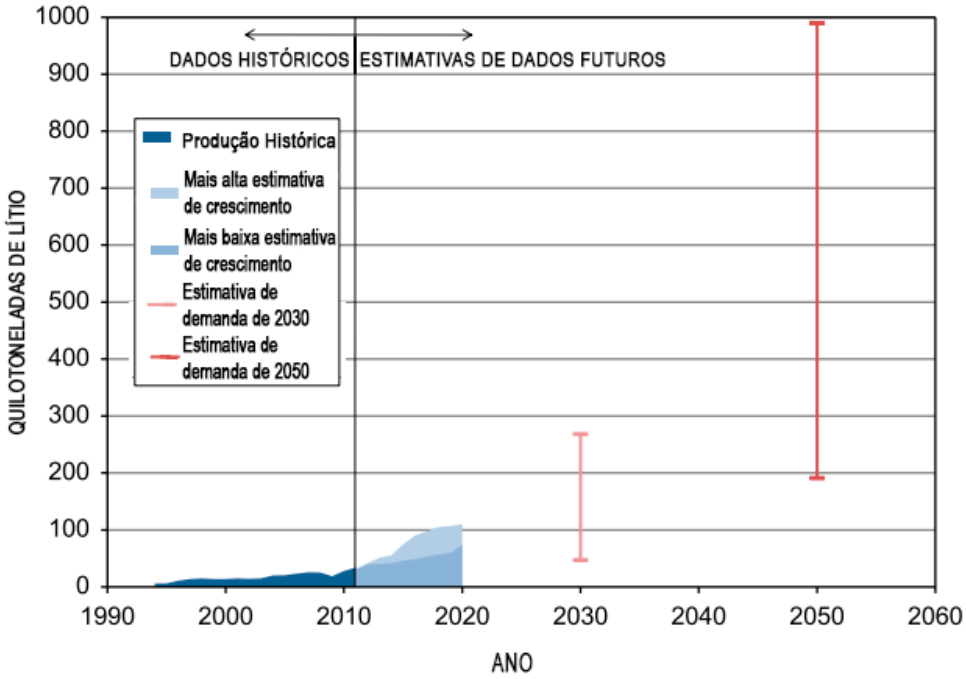


Fig. 1. Estudo indicando que a demanda por lítio para baterias deve aumentar significativamente até 2050 [4].

Para que as células possam continuar suprindo cargas conectadas a elas, é preciso realizar uma série de procedimentos para que se tornem, novamente, capazes de suprir as demandas exigidas. Existem empresas que atuam nessa área de reutilização de células de íon lítio, porém focadas nas baterias de carros elétricos. Contudo, o processo utilizado exige um relativo custo para a finalização do procedimento de reutilização, exigindo uma série de superações de desafios técnicos, além da mão de obra especializada [6].

Com esse plano de fundo, o Programa de Educação Tutorial (PET) — Engenharia Elétrica UFMT realizou uma pesquisa intitulada “Análise do Potencial de Reuso de Células de Íon Lítio de Baterias de Notebook” para analisar o potencial de reutilização das células de íon lítio presentes nas baterias de notebook. Por meio da pesquisa, uma base de dados contendo informações das baterias e células reutilizadas foi criada, conforme apêndice A, e com essas investigações, este artigo se propõe a apresentar os resultados obtidos, com foco no processo de reutilização utilizado, a fim de se demonstrar a capacidade de reativação das células por meio do método aplicado.

II. METODOLOGIA

A primeira ação do projeto consistiu na coleta de baterias de notebook que apresentavam qualquer defeito, impossibilitando o seu uso e se tornando um material inútil ao equipamento. Dessa forma, foi realizada a divulgação com o objetivo da obtenção de doações desse material por parte da população, entretanto, a principal fonte de arrecadação das baterias de notebook ocorreu por meio de doação realizada por empresas privadas locais que trabalham no ramo de reparos de aparelhos eletrônicos e notebooks, de forma que a concessão dessas baterias foi resultado da solicitação formal enviada a essas empresas explicando o objetivo do projeto de pesquisa a ser desenvolvido. A Figura 2 apresenta algumas células recebidas pelo projeto.

Fig. 2. Baterias de notebook recebidas como doação.

Após a obtenção do material de estudo foi dado início a desmontagem das baterias e extração das células de íon lítio conforme apresentado na Figura 3, realizado com o auxílio de ferramentas e Equipamentos de Proteção Individual, tal como luvas e óculos de proteção.

Fig. 3. Processo de desmontagem das baterias e extração das células de Íon Lítio.

Após a remoção das células dos invólucros das baterias, elas passaram por um processo de limpeza e análise superficial, retirando quaisquer resquícios metálico ou cola que estivessem conectados em sua superfície, além disso, nesse momento foi também verificado se o material de estudo possuía algum dano químico, inviabilizando assim sua utilização. As Figuras 4 e 5 ilustram essa etapa do projeto.

Fig. 4. Células sem danos químicos aparente.

Fig. 5. Exemplo de célula com dano químico.

Visando o desenvolvimento de uma identificação (ID) para as células, como uma forma de organização das informações a serem coletadas e anotadas em uma planilha de Excel (disponível no apêndice A), cada célula recebeu uma numeração. A numeração foi constituída de 2 dígitos, o primeiro refere-se a bateria da qual a célula em questão foi extraída e o segundo dígito é referente à numeração da célula dentro do grupo de células que foram extraídas da bateria em questão.

Após o desmonte, limpeza e identificação das células, o próximo passo consistiu no teste de verificação de tensão inicial de cada célula, conforme Figura 6. A partir desse dado foi realizado a primeira classificação das células, as que apresentaram tensão igual ou superior a 3 V foram consideradas “inicialmente boas”, estando prontas para serem carregadas e descarregadas, já as demais foram classificadas como “destinadas à reativação”, com exceção das células que apresentaram dano químico aparente, as quais foram imediatamente removidas do processo e separadas para descarte apropriado.

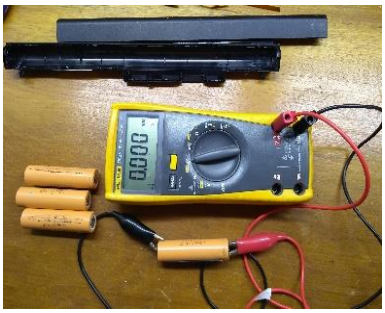


Fig. 6. Aferições das tensões iniciais das células.

O processo de reativação das células consistiu na elaboração de um circuito simples que permitisse a conexão em paralelo de duas ou mais células, de modo que uma célula carregada, com tensão superior ou igual a 4,0 V, era colocada em paralelo com uma célula do grupo das “destinadas ao processo de reativação”, por cerca de 10 minutos, a fim de que a célula carregada exercesse uma tensão nos terminais da célula de baixa tensão, visando obter a “reativação” da célula por meio da circulação forçada de corrente, de forma a haver o equilíbrio de tensão entre as células em paralelo. Após a execução desse procedimento, foi realizada a verificação da tensão da célula reativada, assim como nos dois dias seguintes para verificar se foi mantido o nível de tensão. Portanto, se no último dia a célula apresentasse uma tensão superior a 3 V, ela era considerada apta a passar pelos processos de carga e descarga, caso contrário a célula era descartada.

Na sequência, foram realizados os processos de carga e descarga das baterias classificadas como aptas, conforme ilustrado na Figura 7, para isso foi utilizado o equipamento iMAX B6 da SkyRC para carga e descarga e o equipamento T240 DUO AC/DC da HTRC para o procedimento de descarga das células. As células em funcionamento e revividas eram completamente carregadas, de acordo com a capacidade individual de cada célula, e a tensão dessas células aferidas durante três dias consecutivos. Após isso a célula era descarregada, sendo anotadas sua tensão e capacidade de armazenamento na planilha de dados. Salienta-se que esse processo fora realizado três vezes, sequencialmente, e, além disso, durante o carregamento as células eram constantemente verificadas a fim de notar algum sinal da célula sobreaquecer, caso fosse identificado a célula era removida do procedimento em questão, e a célula era catalogada como “Com sobreaquecimento”. Todas as informações obtidas durante este processo foram registradas na planilha de dados, como: tensão na célula após a recargas e nos dias seguintes, número de recargas, capacidade de armazenamento em cada teste, etc.

Fig. 7. iMAX B6 da SkyRC

Dessa forma, as células com danos químicos, as não revividas ou com sobreaquecimento foram armazenadas de maneira devida e encaminhadas para pontos de coleta desse tipo de material, conforme ilustrado nas Figuras 8(a) e (b). Já as células revividas e em funcionamento foram reutilizadas em diversos projetos criados pelo grupo PET Engenharia Elétrica.

(a) (b)

Fig. 8. Local de coleta das células danificadas.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No decorrer do projeto, 162 células foram submetidas ao processo de reativação, das quais 118 células apresentaram tensão superior a 3 V, portanto a taxa de reativação inicial foi de cerca de 72,84%. No entanto, esses dados por si só não dizem se as células estão em boas condições de operação. Assim, as células passaram por alguns ciclos de carga e descarga a fim de verificar se iriam apresentar alguma das características de mal estado, como superaquecimento.

Portanto, durante o ciclo de carga-descarga, 42 células superaqueceram e foram classificadas como superaquecidas. Não é possível afirmar se tais células apresentavam problemas internos ou se é uma limitação do método utilizado. Quando analisadas apenas as células que não sobreaqueceram, mas que passaram pelo processo de reativação, considerando, portanto, que o sobreaquecimento é decorrente de uma falha interna nas células e que por isso o método de reativação não tem grande relevância, foi verificado que 63,34% das células foram reativadas. Cerca de 12,76% das células chegaram a apresentar nível de tensão acima de 3 V após o carregamento, contudo, não foram capazes de manter seu nível de tensão acima dos 3 V por três dias, sendo, portanto, consideradas impróprias ou "mortas". Ao todo, 27,16% das células não foram suficientes no quesito da manutenção do nível de tensão, logo, sendo consideradas pelos pesquisadores como mortas. Das 162 células testadas, 46,91% das células chegaram ao final do estudo sem apresentar problemas quanto ao seu funcionamento. Sendo assim, 76 unidades não apresentaram problemas quanto à integridade de sua operacionalidade. A relação da distribuição com o estado das células ao final do projeto pode ser verificada na Figura 9.

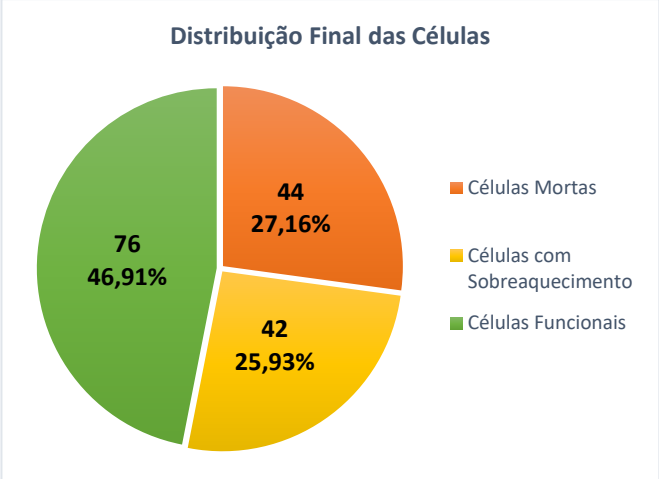


Fig. 9. Distribuição final das células.

Não é possível, até então, determinar se o método de reativação pode evitar o superaquecimento de uma célula, pois o problema pode decorrer de reações entre componentes dentro dela. Para células mortas, é provável que o método de reativação interfira até certo ponto, a menos que os componentes físicos e químicos não tenham mais as margens para uma operação adequada.

Para reutilização adequada das células, além de serem reativadas, elas precisam ter boa capacidade de carga e, além disso, suportar um número maior de ciclos de carga e descarga. Em relação à capacidade de carga alcançada pela bateria em operação, a Figura 10 mostra a taxa média de reutilização em relação à capacidade de carga de fábrica.

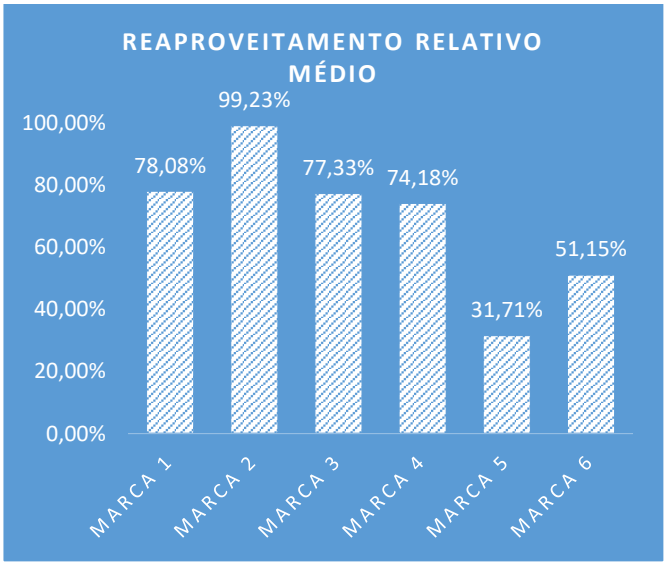


Fig. 10. Reaproveitamento relativo médio das células que passaram pelo processo de reativação.

Com exceção da Marca 5, a taxa média de reutilização relativa de todas as células foi superior a 50%. Embora a Marca 5 tenha um valor inferior, com base apenas nesta amostra, não é possível inferir se as células da Marca 5

apresenta qualidade inferior à das outras. Além disso, em média, o grau de reaproveitamento é de aproximadamente 69% da capacidade de carga original. No mesmo estudo, também foram investigadas células que não passaram pelo processo de reativação por já apresentarem tensões residuais superiores a 3 V. Portanto, também foram registradas as taxas médias relativas de reutilização dessas células, conforme mostra a Figura 11.

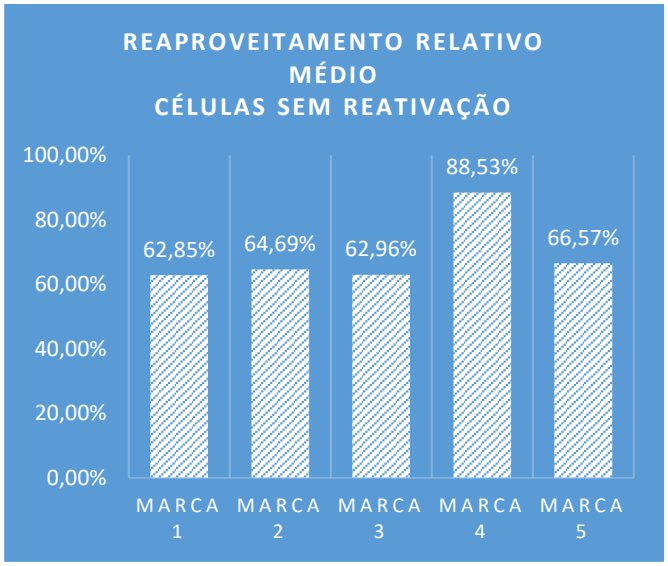


Fig. 11. Reaproveitamento relativo médio das células que não passaram pelo processo de reativação.

Pode-se notar que embora as células da Marca 5 tenham apresentado maiores níveis de reutilização, como mostra a Figura 11, a taxa média de reutilização relativa foi maior para as células que passaram pelo processo de reativação. No geral, verifica-se que o processo de reativação utilizado melhora o estado das células que passam por ele.

Tratando-se de seletividade na hora de se escolher células com maior potencial de reativação para, ao menos, esse método de reativação, os dados demonstraram que nas baterias as quais possuíam ao menos uma célula com Dano Químico, a maioria de suas células apresentaram problemas posteriores durante o estudo. A distribuição em percentual das baterias que apresentaram a maioria de suas células com problemas é exibida na Figura 12.

Isso significa que, quando uma bateria possui célula com dano químico, muito provavelmente, em tempo suficiente de exposição, as outras células presentes na bateria irão apresentar problemas mais adiante. Além disso, é possível visualizar efeitos semelhantes em baterias que possuíam ao menos uma célula com sobreaquecimento. A Figura 13 retrata a distribuição de baterias que apresentaram a maioria das suas células com sobreaquecimento quando haviam ao menos uma célula com sobreaquecimento.

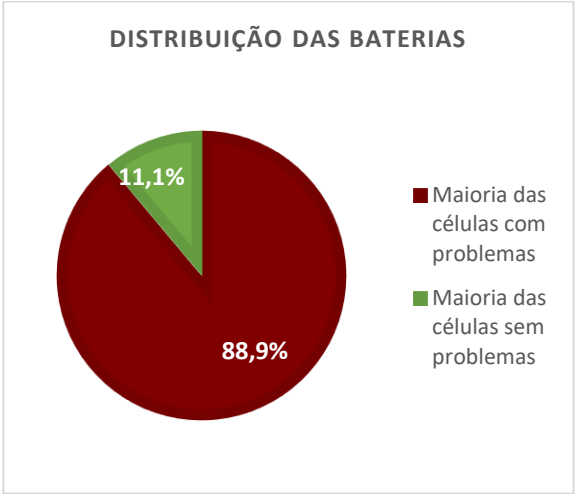


Fig. 12. Distribuição das baterias que apresentaram ao menos uma célula com dano químico.

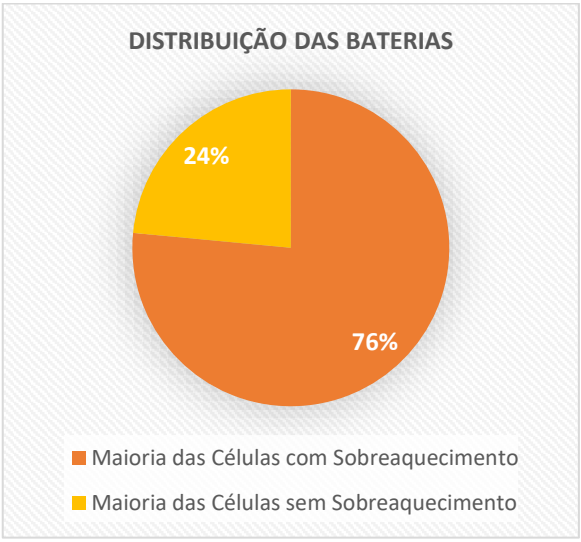


Fig. 13. Distribuição das baterias que apresentaram ao menos uma célula com sobreaquecimento.

Nota-se que, de maneira semelhante, nas baterias que apresentaram ao menos uma célula com sobreaquecimento, a maioria de suas células restante também apresentavam o mesmo problema. Isso pode indicar que essa bateria passou por algum tipo de situação ao qual o estado químico de suas células pode ter sido comprometido. Porém, vale ressaltar um outro dado observado: não necessariamente todas as células presentes em baterias com essa situação, apresentam um resultado inferior. Esse dado é evidenciado na Figura 14.

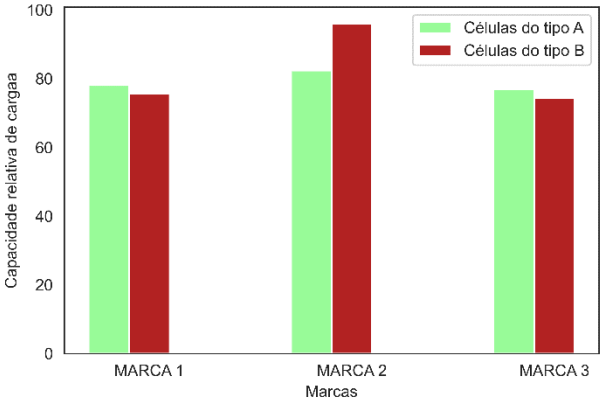
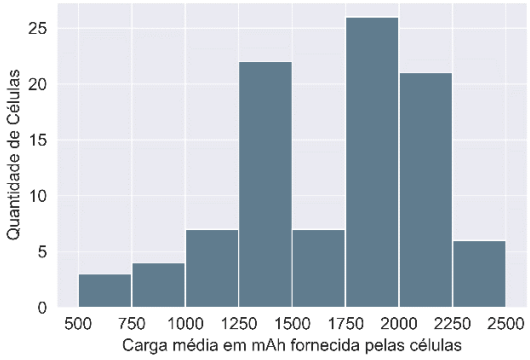


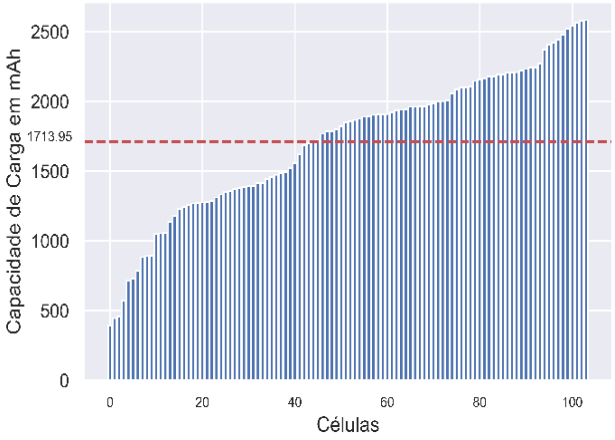
Fig. 14. Comparação da capacidade relativa de carga entre células do Tipo A e B.

Atendendo as condições de análise, somente três marcas apresentaram as devidas qualidades. A Figura 14 é dividida em dois tipos de células: aquelas do tipo A são células que não apresentaram problemas até o fim do estudo e que suas baterias de origem não possuíam células com quaisquer outros tipos de problema, ao passo que as do tipo B também não apresentaram problemas, contudo, eram originárias de baterias que apresentaram ao menos uma célula com sobreaquecimento. Nota-se que, caso as células sejam reativadas com sucesso, ou seja, não apresentem problemas, o nível de reaproveitamento relativo é semelhante à de células as quais suas baterias originais não apresentaram nenhuma outra célula com problemas.

Outra estatística interessante é a porcentagem de baterias que estavam todas operacionais ao final do processo: aproximadamente 26,7% das baterias estudadas estavam com todas as células totalmente operacionais ao final do processo. Esse é um aspecto interessante presente nessas baterias que pode levar a crer que se trata de alguma forma de obsolescência programada. Outra observação é o valor absoluto da capacidade de carga alcançada pela bateria, embora não seja uma medida ideal devido às diferentes capacidades nominais de carga das baterias, ainda é relevante observar esses valores. Os gráficos da Figura 15(a) e (b) mostram os resultados dessas distribuições.



(a)



(b)

Fig. 15. Valores de capacidade de carga obtido pelas células.

Na Figura 15(b), a linha tracejada vermelha indica a capacidade média de carga de todas as células reutilizadas no estudo. Esta linha está localizada a 1713,93 mAh, o que significa que as células podem ser reutilizadas para uma ampla gama de tarefas. Alguns datasheet com as devidas especificações e capacidade de armazenamento das células, podem ser verificados nos anexos.

Ademais, um gráfico de dispersão foi criado para investigar a possível relação entre a tensão residual, medida nas células no início do processo, e o nível de reaproveitamento relativo médio obtido pelas células ao final do processo de reativação. O objetivo era verificar se havia alguma correlação entre essas duas grandezas e, assim, determinar se o nível de reaproveitamento poderia ser inferido com base na tensão residual inicial. No entanto, como mostrado na Figura 16, não foi encontrada correlação entre essas duas variáveis. Isso sugere que o nível de reaproveitamento não pode ser predito com base na tensão residual inicial.

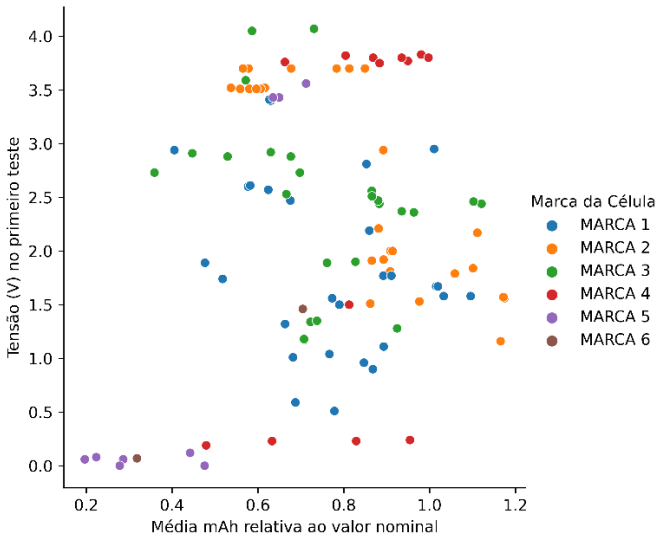


Fig. 16 Gráfico de dispersão entre o Reaproveitamento Médio Relativo e a Tensão Residual.

IV. CONCLUSÕES

O método de reativação utilizado obteve um desempenho significativo no reaproveitamento das células de baterias de notebook, considerando que o superaquecimento não é afetado pelo método de reativação, e que o problema é causado por defeitos internos às células, o método atingiu cerca de 72,84% de eficácia na reativação. Quanto à capacidade relativa de carga, o método demonstrou ser capaz, em alguns casos, de restaurar quase que completamente a capacidade de carga de fábrica. Além disso, para a aplicação do método, a seletividade nas células pode ser relevante, quando se busca otimizar o processo. Quanto às células com dano químico, somente a reciclagem possa ser aplicada. Através dos dados coletados, pode-se demonstrar que células usadas de notebooks podem ser reativadas pelo método utilizado e, em média, recuperam cerca de 69% de sua capacidade de carga de fábrica. Durante a pesquisa, foi constatado também uma possível condição de obsolescência programada, cujas células descartadas não apresentavam qualquer tipo de problema, além de apresentar uma ótima condição de capacidade de armazenamento de carga. Quanto ao sobreaquecimento, e como sugestão de trabalho futuro, as células foram reativadas com um nível de corrente nominal, talvez, devido a desgastes e processos internos, elas não suportem mais esse nível de corrente, por isso, realizar a reativação com uma corrente menor, utilizando-se de uma carga mais lenta, seja o suficiente para evitar o sobreaquecimento das células. Ademais, observou-se que não há uma correlação entre a tensão residual e o nível de reaproveitamento relativo. Algumas células com tensões residuais elevadas apresentaram níveis de reaproveitamento muito baixos, enquanto outras células com tensões residuais baixas tiveram níveis de reaproveitamento mais altos. Isso indica que, de fato, a tensão residual não é um bom indicador do nível de reaproveitamento das células.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao Fundo Nacional de Educação – FNDE e SESu/MEC pelas bolsas do Programa de Educação Tutorial (PET) do grupo PET Engenharia Elétrica do curso de Graduação de Engenharia Elétrica da UFMT e outros apoios financeiros que viabilizaram o projeto.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CATÃO, Marconi Do Ó. “O crescente aumento dos resíduos oriundos de equipamentos eletroeletrônicos: a cidade em busca da gestão socioambiental adequada para o destino final do e-lixo”. Revista de Direito da Cidade, vol. 11, no 3, dezembro de 2019.

[2] REDDY, Thomas. Lindens Handbook of Batteries. [S. l.]: McGraw Hill, 2010.

[3] SUN, Jie; LI, Jigang; ZHOU, Tian; YANG, Kai; WEI, Shouping; TANG, Na; DANG, Nannan; LI, Hong; QIU, Xinping; CHEN, Liquan. Toxicity, a serious concern of thermal runaway from commercial Li-ion battery. Nano Energy, [s. l.], 30 jun. 2016.

[4] ESPINOSA, Denise; TENÓRIO, Jorge. RECICLAGEM DE BATERIAS: ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL NO BRASIL. Reciclagem, [S. l.], p. 14-20, dez. 2015.

[5] SPEIRS, J., Contestabile, M., Houari, Y., & Gross, R. (2014). The future of lithium availability for electric vehicle batteries. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 35, 183–193.

[6] OHTSUKA, RODRIGO. ESTUDO SOBRE OS MÉTODOS DE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE BATERIAS DE LÍTIO DE CARROS ELÉTRICOS. 2022. Trabalho Final de Curso (Bacharel em Engenharia de Materiais) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, [S. l.], 2022.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Base de dados das baterias coletadas.

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1-E-XPrcPs3RN5dD2QrANRDyqvjtP-gVO/edit?usp=share_link&ouid=106445109442529847464&rtpof=true&sd=true

ANEXO

ANEXO A – Datasheet de exemplo de bateria de 2200 mAh.

ANEXO B – Datasheet de exemplo de bateria de 2800 mAh.

ANEXO C – Datasheet de exemplo de bateria de 3070 mAh.

ANEXO A

Spec. No.	ICR18650-22E	Version No.	0.0

1. Scope

This product specification has been prepared to specify the rechargeable lithium-ion cell

2. Description and Model

2.1 Description Cell (lithium-ion rechargeable cell)

2.2 Model ICR18650-22E

3. Nominal Specifications

Item	Specification
3.1 Nominal Capacity	2200mAh (0.2C, 2.75V discharge)
3.2 Minimum Capacity	2150mAh(0.2C, 2.75V discharge)
3.3 Charging Voltage	4.2 ±0.05 V
3.4 Nominal Voltage	3.7V
3.5 Charging Method	CC-CV (constant voltage with limited current)
3.6 Charging Current	Standard charge: 1100mA Rapid charge : 2200mA
3.7 Charging Time	Standard charge : 3hours Rapid charge : 2.5hours
3.8 Max. Charge Current	2200mA(ambient temperature 25℃)
3.9 Max. Discharge Current	4400mA(ambient temperature 25℃)
3.10 Discharge Cut-off Voltage	2.75V
3.11 Cell Weight	48.0g max
3.12 Cell Dimension	Height : 65.00mm max Diameter : 18.25mm max
3.13 Operating Temperature	Charge : 0 to 45℃ Discharge: -20 to 60℃
3.14 Storage Temperature	1 year : -20~25℃(1*) 3 months : -20~45℃(1*) 1 month : -20~60℃(1*)

Note (1): If the cell is kept as ex-factory status(50% of charge),
the capacity recovery rate is more than 80%.

ANEXO B

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary –

Spec. No.	ICR18650-28A	Version No.	1.0

1. Scope

This product specification has been prepared to specify the rechargeable lithium-ion cell ('cell') to be supplied to the customer by Samsung SDI Co., Ltd.

2. Description and Model

2.1 Description Cell (lithium-ion rechargeable cell)

2.2 Model ICR18650-28A

3. Nominal Specifications

Item S	pecification
3.1 Nominal Capacity	2800mAh (0.2C, 2.75V discharge)
3.2 Minimum Capacity	2700mAh(0.2C, 2.75V discharge)
3.3 Charging Voltage	4.3 ±0.03 V
3.4 Nominal Voltage	3.75V
3.5 Charging Method	CC-CV (constant voltage with limited current)
3.6 Standard Charging Current	Standard charge: 1400mA (Reconmendation)
3.7 Standard Charging Time	Standard charge : 3hours
3.8 Max. Charge Current	2800mA(ambient temperature 25℃)
3.9 Max. Discharge Current	5600mA(ambient temperature 25℃)
3.10 Discharge Cut-off Voltage	2.75V
3.11 Cell Weight	48.0g max
3.12 Cell Dimension	Height : 65.00mm max Diameter : 18.40mm max
3.13 Operating Temperature (Ambient)	Charge : 0 to 45℃ Discharge: -20 to 50℃ ※Cell surface temperature when discharging: Max 75℃
3.14 Storage Temperature	1 year : -20~25 ℃(1*) 3 months : -20~45℃(1*) 1 month : -20~50 ℃(1*)

Note (1): If the cell is kept as ex-factory status (50% of charge), the capacity recovery rate is more than 80%.

ANEXO C

Panasonic

Lithium Ion

NCR18650A

Features & Benefits

- High energy density
- Long stable power and long run time
- Ideal for notebook PCs, boosters, portable devices, etc.

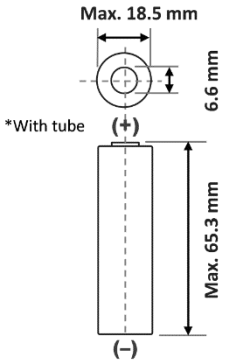
* At temperatures below 10°C, charge at a 0.25C rate.

Specifications

Rated capacity(1)	Min. 2900mAh
Capacity(2)	Min. 2950mAh Typ. 3070mAh
Nominal voltage	3.6V
Charging	CC-CV, Std. 1475mA, 4.20V, 4.0 hrs
Weight (max.)	47.5 g
Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C
Energy density(3)	Volumetric: 620 Wh/l Gravimetric: 225 Wh/kg

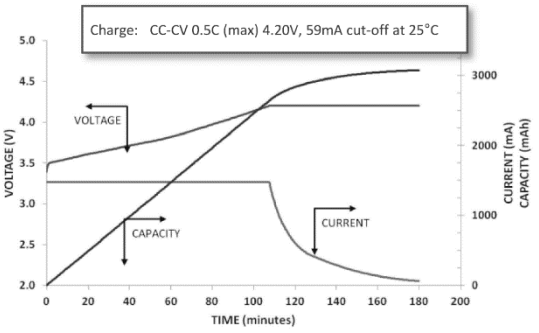
(1) At 20°C (2) At 25°C (3) Energy density based on bare cell dimensions

Dimensions

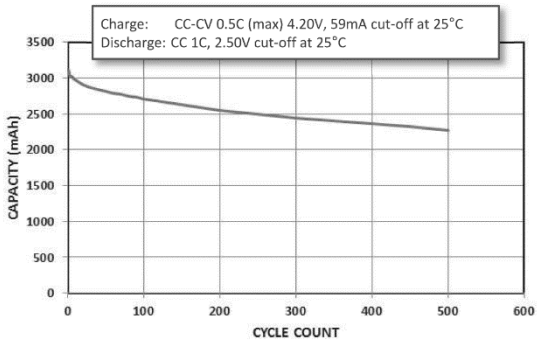


For Reference Only

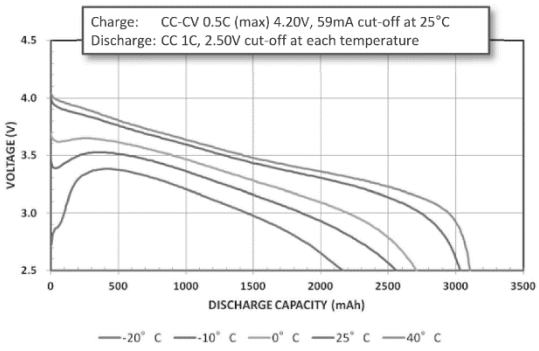
Charge Characteristics



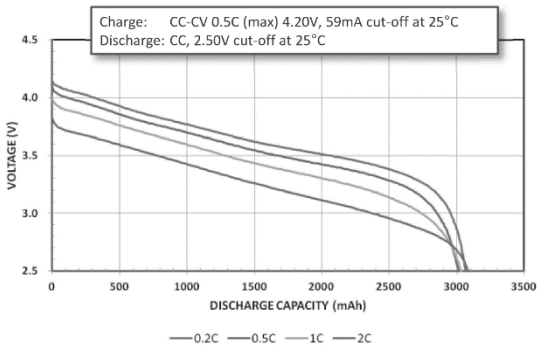
Cycle Life Characteristics



Discharge Characteristics (by temperature)



Discharge Characteristics (by rate of discharge)



The data in this document is for descriptive purposes only and is not intended to make or imply any guarantee or warranty.

VERSION 13.11 R1 | Copyright© 2012 Energy Company. All Rights Reserved.