



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE
E AUTOMAÇÃO**



FELIPE CÉSAR IBRAIM FERREIRA

RISCOS DE INCÊNDIO ASSOCIADO A BATERIAS

OURO PRETO - MG
2017

FELIPE CÉSAR IBRAIM FERREIRA

felipeibram@gmail.com

RISCOS DE INCÊNDIO ASSOCIADO A BATERIAS

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: Prof. MSc. DSc. P-Dr. Antonio Maria Claret de Gouvêia.

**OURO PRETO – MG
2017**

F383r Ferreira, Felipe César Ibraim.
Riscos de incêndio associado a baterias [manuscrito] / Felipe César
Ibraim Ferreira. - 2017.

70f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Maria Claret de Gouvêia.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas
Fundamentais.

1. Incêndios - Prevenção. 2. Baterias - Manipulação inadequada. 3.
Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.) - Baterias. I. Gouvêia, Antonio
Maria Claret de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO E TÉCNICAS FUNDAMENTAIS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Aos 30 dias do mês de março de 2017, às 15h, na sala 01, localizada na Escola de Minas – Campus - UFOP, foi realizada a defesa de Monografia do aluno **Felipe César Ibrahim Ferreira**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof. DSc. Antonio Maria Claret de Gouveia (DECAT), Prof. MSc. Hélder Luis Françoso (DEARQ) e Prof. MSc. Edésio Alves de Sousa (DEARQ). O candidato apresentou o trabalho intitulado: “**Riscos de incêndio associado a baterias**”, elaborado sob orientação do Prof. DSc. Antonio Maria Claret de Gouveia. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo, os presentes consideram o(a) aluno(a) **aprovado** com a nota/conceito 9,7 (nove vírgula sete).

Ouro Preto, 30 de março de 2017.

Prof. DSc. Antonio Maria Claret de Gouveia
Professor Orientador

Prof. MSc. Hélder Luis Françoso
Professor Avaliador

Prof. MSc. Edésio Alves de Sousa
Professor Avaliador

Felipe César Ibrahim Ferreira
Aluno(a)

Dedico esta dissertação aos meus pais que sempre me apoiaram e me deram força para que eu enfrentasse os desafios com muita coragem e persistência.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus por iluminar sempre o meu caminho me dando sabedoria, força e coragem para vencer os desafios. Agradeço também a todos que estiveram comigo durante todos estes anos. Ao meu pai, professor e mestre que é e sempre será meu maior exemplo de vida. A minha mãe por todo cuidado zelo e carinho. As minhas irmãs pelo companheirismo e toda minha família pelo apoio. Aos meus amigos e também é claro, a nossa querida ESCOLA DE MINAS.

*“Se as coisas são inatingíveis... ora!
Não é motivo para não querê-las...
Que triste os caminhos, se não fora
Presença distante das estrelas!”*

Mario Quintana

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Ilustração dos experimentos conduzidos por Luigi Galvani..... | 1 |
| Figura 2: Ilustração da reação da perna de uma rã quando tocada por dois metais diferentes, o cobre e o zinco..... | 2 |
| Figura 3: Reprodução da carta de Alessandro Volta à Joseph Banks em 1800..... | 3 |
| Figura 4: A pilha de Daniell. | 4 |
| Figura 5: A esquerda “Sony Stamina Plus” bateria alcalina e a direita “Boston Power Swing” bateria de íon-lítio..... | 42 |
| Figura 6: Dois exemplos de pilhas íon-lítio “pouch cell”. | 43 |
| Figura 7: Ruptura de uma bateria de íon-lítio “pouch cell”. | 46 |
| Figura 8: Proporção de incidentes em aviões de carga ou passageiros. | 54 |
| Figura 9: Tipos de baterias envolvidas nestes incidentes..... | 54 |
| Figura 10: Coletor de baterias pipe que estão dispostos em shoppings..... | 60 |
| Figura 11: Caixa coletora de baterias grande. | 61 |
| Figura 12: Manipulação das gaiolas com empilhadeiras elétricas. | 62 |
| Figura 13: Classificação do lixo eletrônico. | 63 |
| Figura 14: Material chegando no local para ser classificado e moído..... | 63 |
| Figura 15: Mistura do material. | 64 |
| Figura 16: Material a ser colocado na correia transportadora para ser encaminhado ao processo de moagem..... | 64 |
| Figura 17: Moinho..... | 65 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Composição típica de pilhas e baterias..... | 5 |
| Tabela 2: Principais efeitos dos metais presentes em pilha e baterias à saúde humana. | 6 |
| Tabela 3: Variáveis e indicadores..... | 14 |
| Tabela 4: Características e aplicações das baterias primárias. | 18 |
| Tabela 5: Principais componentes e reações celulares das baterias primárias. | 19 |
| Tabela 6: Principais componentes e reações celulares das baterias de lítio (baterias primárias). | 20 |
| Tabela 7: Características e aplicações das baterias secundárias..... | 21 |
| Tabela 8: Principais componentes e reações oxirredução das baterias secundárias (baterias recarregáveis)..... | 23 |
| Tabela 9: Principais componentes e reações celulares em baterias reserva water-activated.... | 26 |
| Tabela 10: Massa de (concentrado) ácido sulfúrico (H_2SO_4) ou água (H_2O) que é necessária para produzir um certo volume de 4% de gás hidrogênio (H_2 (g)) em condições normais de pressão atmosférica e à temperatura ambiente de ($20^\circ C$)..... | 36 |
| Tabela 11: Teor de agua em algumas baterias..... | 37 |
| Tabela 12: Volume de hidrogênio gasoso puro (H_2 (g)) e hidrogênio gasoso a 4% (H_2 (g)) que pode ser produzido a partir de diferentes valores de carga em condições normais de pressão atmosférica e à temperatura ambiente de ($20^\circ C$)..... | 38 |
| Tabela 13: Volume de hidrogênio gasoso puro ($H_2(g)$) por tempo que pode ser produzido a partir de diferentes intensidades de corrente (i) em condições de pressão atmosférica normal e à temperatura ambiente ($20^\circ C$). | 39 |
| Tabela 14: Primeiro segundo de um teste de curto-circuito realizado uma célula de bateria de lítio-íon. | 46 |
| Tabela 15: Imersão de uma bateria 12V em diferentes tipos de água. | 49 |
| Tabela 16: Incêndios em instalações de reciclagem..... | 53 |

Tabela 17: Resumo de alguns dos principais incidentes na aviação.55

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Formulação do Problema..... | 1 |
| 1.2 | Justificativa..... | 9 |
| 1.3 | Objetivos..... | 9 |
| 1.3.1 | Geral | 9 |
| 1.3.2 | Específicos..... | 9 |
| 1.4 | Estrutura do Trabalho | 10 |
| 2 | METODOLOGIA..... | 11 |
| 2.1 | A pesquisa..... | 11 |
| 2.2 | Tipos de pesquisa: Objetivos, abordagem e procedimentos técnicos..... | 12 |
| 2.3 | Materiais e Métodos | 13 |
| 2.4 | Variáveis e indicadores..... | 14 |
| 2.5 | Instrumento de coleta de dados | 14 |
| 2.6 | Tabulação dos dados..... | 15 |
| 2.7 | Considerações finais do capítulo | 15 |
| 3 | RISCOS DE INCÊNDIO ASSOCIADOS A BATERIAS..... | 16 |
| 3.1 | Tecnologia das baterias | 16 |
| 3.1.1 | Baterias primárias | 17 |
| 3.1.2 | Baterias secundárias | 17 |
| 3.1.3 | Baterias de reserva..... | 25 |
| 3.1.4 | Outras baterias menos comuns | 26 |
| 3.1.5 | Baterias para o futuro | 27 |
| 3.2 | Armazenamento, transporte e manuseio de baterias | 27 |
| 3.2.1 | Armazenamento..... | 28 |
| 3.2.2 | Transporte..... | 29 |
| 3.2.3 | Reciclagem | 31 |
| 3.3 | Riscos de incêndio..... | 31 |
| 3.3.1 | Produção de gás hidrogênio..... | 32 |
| 3.3.2 | Estimativa da quantidade de hidrogênio gasoso que pode ser produzido a partir de uma bateria..... | 35 |
| 3.3.3 | Compostos inflamáveis em baterias de lítio e íon-lítio | 39 |
| 3.3.4 | Fuga térmica | 40 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3.5 | Riscos de Incêndio Elétricos..... | 42 |
| 3.3.6 | Reação do Lítio Metálico | 48 |
| 3.3.7 | Reação do Ácido Sulfúrico..... | 48 |
| 3.3.8 | Riscos de Incêndio Devido ao Contato com a Água | 49 |
| 3.3.9 | Exposição a Temperaturas Extremas..... | 50 |
| 3.3.10 | Ativação Acidental de Pilhas de Reserva | 50 |
| 4 | INCÊNDIOS EM INSTALAÇÕES DE RECICLAGEM..... | 51 |
| 4.1 | Incêndios internacionais | 51 |
| 4.2 | Incêndios em Instalações de Reciclagem de Baterias | 52 |
| 4.3 | Outros Incêndios Causados Por Baterias..... | 52 |
| 4.1 | Incêndios Originário de Lixo..... | 58 |
| 5 | CORRENTE DE RECICLAGEM..... | 60 |
| 5.1 | Coleta de Bateria | 60 |
| 5.2 | Lixo Eletrônico | 61 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 66 |
| 6.1 | Exposição ao tempo..... | 66 |
| 6.2 | Manipulação | 67 |
| 6.3 | Mistura de diferentes tipos de baterias | 67 |
| 6.3.1 | Mistura de baterias de chumbo-ácido com baterias que contem zinco ou outros metais. 68 | |
| 6.3.2 | Misturas de baterias de chumbo-ácido com material orgânico | 68 |
| 6.3.3 | Mistura de baterias de lítio ou íon de lítio com outras baterias..... | 68 |
| 7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 69 |
| 8 | REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA..... | 71 |

RESUMO

O presente trabalho evidencia os riscos de incêndio relacionados às pilhas e baterias. Este estudo trata-se de uma pesquisa bibliográfica e documental baseada no manual *Fire Risks Associated with Batteries* da *Science Partner – Technical Research Institute of Sweden*. Serão abordados os riscos associados as pilhas e baterias que não estão em uso ou que foram submetidas a situações de manipulação inadequada. Será apresentado a influência de situações de exposição ao tempo, abuso mecânico, emissão de gás hidrogênio e misturas de diferentes tipos de baterias na cadeia de reciclagem. Também serão discutidas as novas tecnologias de pilhas e baterias, os dispositivos de segurança e as legislações vigentes referentes a seu transporte, armazenamento e manuseio. Alguns casos práticos foram expostos com a finalidade de se mostrar a importância deste estudo, que trará benefícios não somente quanto ao uso adequado e à manipulação destes equipamentos, como também contribuições para o desenvolvimento de novas tecnologias mais seguras e eficientes.

Palavras-chave: Risco de incêndio, cadeia de reciclagem, manipulação inadequada, legislações vigentes.

ABSTRACT

*This present paperwork evinces the fire risks associated with batteries. This study is a bibliographical-documentary research and was based on the handbook *Fire Risks Associated With Batteries* from the Science Partner - Technical Research Institute of Sweden. Will be approached the risks associated to batteries that are not in use or that have been subjected to situations of improper handling. Will be presented influence of exposure situations to time, mechanical abuse, emission of hydrogen gas and blends of different types of batteries in the recycling chain. It's going to be also discussed new battery technologies, safety devices and current legislation regarding their transport, storage and handling. Some practical cases were exposed with the purpose of showing the importance of this study, which is going to bring benefits in not only the use and manipulation of equipment, but also contributions to the development of new technologies safer and efficient.*

Key-words: *Fire risks, recycling chain, improper handling, legislation regarding.*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

É notado um grande desenvolvimento da tecnologia e expansão de mercado dos aparelhos eletroeletrônicos que são acionados por pilhas ou baterias, tais como: laptops, tablets, celulares, brinquedos, ferramentas de mão, etc. Desta forma, sendo a demanda por energia portátil cada vez maior, estudos e pesquisas são fomentadas em favor do seu aprimoramento a fim de se conseguir baterias mais leves, de melhor desempenho, seguras e com menores teores de elementos e produtos tóxicos.

A história das pilhas tem início no século XVIII, quando o físico Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta (1745-1827) começou a investigar fenômenos relacionados à eletricidade. Ele baseou seus estudos em diversos relatos e experiências de alguns cientistas da época, porém se viu bastante intrigado com a teoria proposta por seu contemporâneo Luigi Galvani (1737 - 1798), físico e filósofo italiano (CHAGAS, 1999).

Luigi Galvani realizou experimentos com pernas de rãs, que são ilustrados pelas Figuras 1 e 2. Segundo a Sciences Physiques (2016) ele percebeu que o tecido da perna de uma rã se contrai quando tocado por dois metais diferentes como o cobre e o zinco ou quando colocado sob influência de uma máquina eletrostática. Suas observações levaram a acreditar que a eletricidade decorria do animal; sua teoria era chamada “eletricidade animal” e foi exposta em 1791.

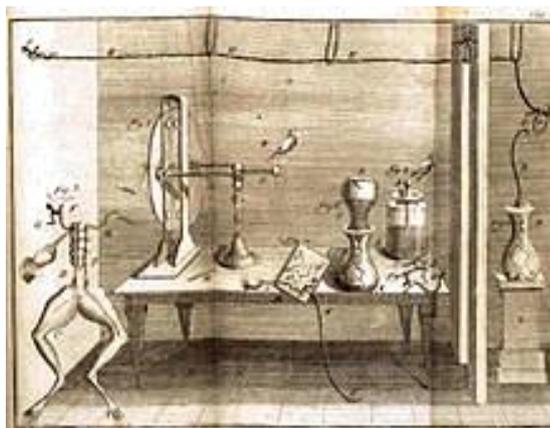


Figura 1: Ilustração dos experimentos conduzidos por Luigi Galvani.
Fonte: Sciences Physiques, Académie Orléans (2016).

Alessandro Volta ficou fascinado com os resultados, porém não acreditava em sua explicação. Repetindo os experimentos ele concluiu que a causa da corrente elétrica não estava nos músculos e nervos da perna da rã, mas nos diferentes metais que eram postos em contato e os fluidos nos tecidos atuavam apenas como condutores. Ele provou que para haver o efeito elétrico seria necessária a interação de dois metais distintos em meio de um líquido condutor. Este fenômeno é conhecido como “efeito voltaico”. Como foi exposto por Boni (2007, p.3) “o físico defendia a teoria de contato que contrapunha a teoria da *eletricidade animal* de Luigi Galvani”.

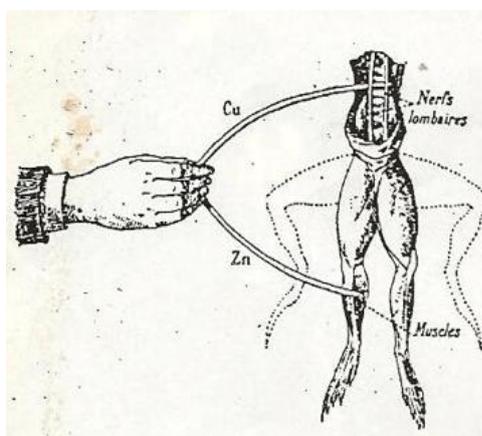


Figura 2: Ilustração da reação da perna de uma rã quando tocada por dois metais diferentes, o cobre e o zinco.

Fonte: Sciences Physiques, Académie Orléans (2016).

Após algumas investigações Alessandro Volta estabeleceu experimentalmente relações entre certos materiais. Observando suas propriedades, ele os classificou como condutores de “primeira classe” e de “segunda classe”. Sua grande invenção surgiu através destas observações, com o propósito de obter eletricidade. O físico empilha discos de dois metais diferentes separados por um papel embebido em solução condutora e seus polos eram ligados a fios condutores (CHAGAS, 1999). Assim nasceu a primeira pilha elétrica de que se tem registro. A nova invenção era composta por “discos de zinco e prata (condutores de primeira classe) intercalados com discos de papeis molhados com água salgada (condutores de segunda classe) formando pares Zinco - Prata - Condutor úmido” (BONI, 2007, p.41).

Algumas modificações ainda foram propostas por Alessandro Volta como a “*Cadeia de Copos*” ou “*Couronné de Tasses*” como ele a denominava, de acordo com Martins (1999, p. 829) “se tratava de outro dispositivo utilizando copos com água salgada, unidas por condutores metálicos”, ver figura 3.

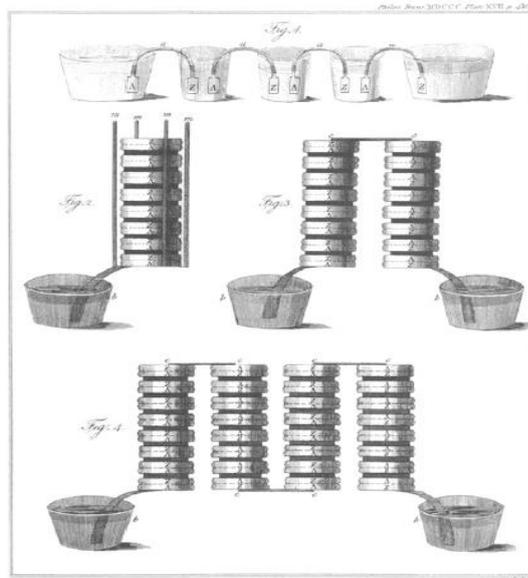


Figura 3: Reprodução da carta de Alessandro Volta à Joseph Banks em 1800.
Fonte: BONI, Renata S. (2007).

A pilha de Alessandro Volta ou “*pilha voltaica*” possibilitou o desenvolvimento da Eletroquímica, porém encontravam-se limitações que comprometiam a sua eficiência. A solução para o problema surgiu em 1830, quando o físico inglês Willian Sturgeon (1783-1850) proporcionou vida maior a pilha através do amalgamento (adicionou mercúrio a placa de zinco) (FONTES *et al.* 2012).

No século XIX, o químico britânico John Frederic Daniell (1790-1845) criou uma “*célula galvânica*” mais eficaz e capaz de manter a corrente elétrica constante em um período de tempo razoavelmente longo. Para Nascimento *et al.* (2014), o fato foi motivado pela necessidade de uma fonte de energia para atender ao sistema de telegrafia que se apresentava em avanço naquela época.

Desde então inúmeros desenvolvimentos foram percebidos. Sob o ponto de vista de Chagas (1999) com estas pesquisas foi possível aperfeiçoar a tecnologia e conhecer a causa dos fenômenos observados.

O autor também destaca que o estudo da pilha foi o fundamento da teoria da ligação química de Berzelius (Teoria Dualística), foi uma das vertentes que levou ao estabelecimento da Primeira Lei da Termodinâmica (conservação da energia) e, mais tarde, foi utilizada para mostrar que a Segunda Lei da Termodinâmica também era válida em sistemas com reação química”. Além disso “com a pilha foi possível decompor substâncias, depositar metais, inclusive novos elementos, estudar o comportamento da corrente elétrica e seus efeitos, inclusive magnéticos, etc. Foi graças as pilhas que se tornou possível o conhecimento do Eletromagnetismo e da tecnologia correspondente (CHAGAS, p.428, 1999).

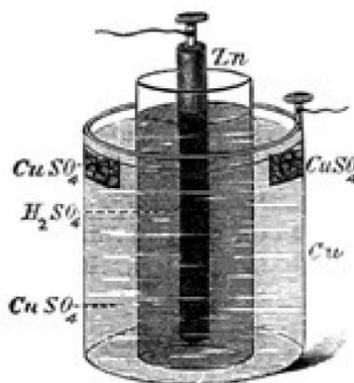


Figura 4: A pilha de Daniell.
Fonte: FONTES, Anderson M. *et al.* (2012).

Atualmente existem várias tecnologias de pilhas e baterias no mercado*, cada uma com suas características e peculiaridades e que são utilizadas em condições específicas. As pilhas são dispositivos compostos por dois eletrodos e um eletrólito arranjados de forma a produzir energia (BOCCHI *et al.* 2000). Elas são classificadas como primárias (não recarregáveis) ou secundárias (recarregáveis). As baterias são um conjunto de pilhas agrupadas em série ou em paralelo dependendo das demandas de potência e corrente.

Com a finalidade de facilitar a compressão do tema abordado todos os dispositivos eletroquímicos mencionados serão chamados de baterias, segundo a *Global Industry Analysts* (2011). O consumo de baterias primárias (não recarregáveis) ainda é maior que o consumo das baterias secundárias (recarregáveis), sendo as baterias primárias alcalinas o maior segmento do mercado. Dentre as pilhas e baterias secundárias, a que mais se destaca é a íon-lítio. O lítio é um metal leve de grande potencial eletroquímico, apresenta bom desempenho em aplicações cíclicas o que viabiliza seu uso em aparelhos portáteis. O consumo das baterias de íon-lítio tem as melhores expectativas de crescimento, no entanto é notado um declínio da

* LINDEN D. *et al.* **Linden's Handbook of Batteries**. 4ª ed. McGraw-Hill, Nova York, 2011.

comercialização das baterias secundárias de níquel-cádmio (NiCd) e níquel metal hidreto (NiMH).

A popularidade crescente das tecnologias movidas por baterias trazem diversos problemas que estão relacionados aos riscos de incêndio devido a seu funcionamento e manipulação. Estão presentes também os riscos ambientais, visto que estes dispositivos apresentam em sua composição metais pesados, elementos tóxicos que, se descartados de forma inadequada, podem ser repassados ao solo, água, à atmosfera e, conseqüentemente, como apresentado por Wolff (2001), através da cadeia trófica, aos usuários deste meio.

As tabelas 1 e 2 apresentam respectivamente a composição química das baterias e os principais efeitos dos metais à saúde humana.

Tabela 1: Composição típica de pilhas e baterias.

| Elemento | Zinco-Carbono ¹ | Alcalina ² | Ni-Cd ² | Ni-MH ² | Lítio ² |
|----------|----------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------------|
| Al | - | - | 0,019 | 0,5-2,0 | 4,6-24 |
| Cd | - | - | 15-20 | - | - |
| Co | - | - | 0,600 | 2,5-4,3 | 12-20 |
| Cu | - | - | - | - | 5-10 |
| Fe | 0,2-1,0 | 0,17 | 29-40 | 20-25 | 4,7-25 |
| K | - | 5,5-7,3 | - | - | - |
| La | - | - | - | 1,4-6,6 | - |
| Li | - | - | - | - | 1,5 ^b – 5,5 ^c |
| Mn | 23-30 | 26-33 | 0,083 | 0,81-3,0 | 10-15 ^d |
| Nd | - | - | - | 0,96-4,1 | - |
| Ni | 0,007 | 0,010 | 15-20 | 25-46 | 12-15 ^e |
| V | - | - | - | - | 15-20 ^c |
| Zn | 5 | 12-21 | 0,060 | 0,092-1,6 | - |

Nota: ¹ Inclui somente o pó preto interno seco; ² Considerando toda a bateria. ^a Lítio-íon (Co); ^b Lítio-íon (Co, Ni, Mn); ^c Lítio-polímero (V); ^d Lítio-íon (Mn); ^e Lítio-íon (Ni).
 Fonte: Adaptado de Veloso *et al. apud* Mantuano D. P. *et al.* (2011).

De acordo com Gaines *apud* Amon *et al.* (2012), tornou-se evidente que o descarte adequado é importante tanto do ponto de vista da gestão ambiental quanto do ponto de vista da recuperação de materiais valiosos. Estes dois fatores podem trabalhar construtivamente para motivar a formação de políticas de reciclagem que trabalham para proteger o meio ambiente e ajudar a diminuir as dependências nacionais de recursos externos.

Tabela 2: Principais efeitos dos metais presentes em pilha e baterias à saúde humana.

| Metais | Principais efeitos à saúde | Cuidados especiais |
|----------|--|--|
| Cádmio | A meia-vida do cádmio em seres humanos é de 20-30 anos, acumula-se principalmente nos rins, fígado e ossos, podendo levar a disfunções renais e osteoporose. Além disso, é comprovadamente um agente cancerígeno e teratogênico, podendo, também, causar danos ao sistema reprodutivo. | O contato com agentes oxidantes fortes, como nitratos e HNO ₃ , provoca incêndio ou explosão. Determinados compostos de cádmio, principalmente clorato e bromato, podem explodir sob a ação do calor, por choque ou por contato com produtos redutores. |
| Chumbo | Quando ingerido, pode provocar prejuízo ao cérebro e ao sistema nervoso central. Também pode causar anemia, disfunção renal, dores abdominais, problemas pulmonares, elevar a pressão arterial, além de ser um agente teratogênico. | A inalação do pó ou dos gases gerados durante o processo para a obtenção do chumbo metálico ou em reações químicas é tóxica. Certos compostos de chumbo, como clorato e bicromato, podem explodir sob a ação do calor, por choque ou por contato com produtos redutores. |
| Cobalto | Causa lesões pulmonares e no sistema respiratório, distúrbios hematológicos, lesões e irritações na pele, distúrbios gastrintestinais e alterações cardíacas. Possível agente carcinogênico em seres humanos. | Metal estável, não há riscos se armazenado e estocado adequadamente. |
| Lítio | Causa disfunções renais e respiratórias, disfunções do sistema neurológico, queimaduras em contato com pele e mucosas, além de ser um agente teratogênico. | Reage violentamente com a água, liberando gás H ₂ , altamente inflamável. |
| Manganês | O excesso acumulado no fígado e no sistema nervoso central provoca alterações no metabolismo central, gerando sintomas como os do Mal de Parkinson. A concentração no sistema respiratório enfraquece o organismo, tornando-o sujeito à incidência de pneumonia. | Apresenta incompatibilidade com água, ácidos fortes, fósforo e agentes oxidantes fortes. |
| Mercúrio | Uma intoxicação aguda pode ter efeitos corrosivos violentos na pele e nas membranas da mucosa, náuseas fortíssimas, vômito, dor abdominal, diarreia com sangue, danos aos rins e morte em um período aproximado de 10 dias. Já uma intoxicação crônica gera sintomas neurológicos como tremores, vertigens, irritabilidade e depressão, associados à salivação. Além disso, provoca estomatite e diarreia, descoordenação motora progressiva, perda de visão e audição e deterioração mental decorrente de uma neuroencefalopatia tóxica. Também é considerado agente teratogênico, mutagênico e possível carcinogênico. | Envenenamento por vapores tóxicos, especialmente quando aquecido. Incompatível com ácidos fortes. |
| Níquel | Causa câncer, lesões no sistema respiratório, distúrbios gastrintestinais, dermatites e alterações no sistema imunológico. Também é considerado agente teratogênico, genotóxico e mutagênico. | O metal pulverizado e os fumos de níquel podem inflamar-se espontaneamente. Incompatível com alumínio, cloreto de alumínio, p-dioxinas, hidrogênio, metanol, não-metais, oxidantes e compostos de enxofre. Reage violenta ou explosivamente com anilina, sulfeto de hidrogênio, solventes inflamáveis, hidrazina e pós metálicos (especialmente zinco, alumínio e magnésio). |
| Zinco | Quando em excesso no organismo, provoca sensações estranhas como paladar adocicado e secura na garganta, tosse, fraqueza, dor generalizada, arrepios, febres, náuseas e vômitos. | O zinco puro é atóxico, mas os gases liberados pelo aquecimento do metal, ou por reações químicas podem irritar as vias respiratórias, se inalados. |

Fonte: Adaptado de Mantuano D. P. *et al.* (2005).

Ao redor do mundo diversas políticas são implantadas para regulamentação da fabricação, coleta, disposição e reciclagem das baterias. De acordo com Mantuano (2011) essa preocupação se iniciou na década de 90, quando legislações foram estabelecidas em diversos países. Inicialmente focavam nas baterias de Ni-Cd e na redução progressiva de mercúrio, cádmio e chumbo em alguns tipos de pilhas e baterias.

No Brasil, este assunto foi inicialmente tratado pela Resolução CONAMA n° 257 que foi revogada pela Resolução CONAMA n°401 publicada no diário oficial da união em 5 de novembro de 2008. A atual Resolução estabelece uma redução mais significativa nos teores de mercúrio, chumbo e cádmio das baterias e pilhas comercializadas em território nacional, assim como os critérios e padrões para o seu gerenciamento ambientalmente adequado, e dá outras providências (CONAMA, 2008). Na visão de Mantuano (2011) pretendeu-se dar mais efetividade à responsabilidade pós-consumo dos fabricantes e importadores de pilhas e baterias.*

Na União Européia, foi implementada em 2003 a Diretiva 2002/96/CE, relativa aos Resíduos de Equipamentos Elétricos Eletrônicos – REEE. A política pública tem por objetivo principal promover estratégias para a redução, reutilização, reciclagem ou outras formas de valorização do material ou energia provida aos Equipamentos Elétricos Eletrônicos - EEE, assegurando a qualidade do ambiente, a saúde humana e buscando melhorar o comportamento ambiental de todos os envolvidos no ciclo de vida destes equipamentos, tais como: produtores, distribuidores, consumidores e os operadores diretamente envolvidos no tratamento de REEE, (DIRETIVA 2002/96/CE, 2003).

Esta medida foi tomada diante da necessidade de uma política eficiente de gestão dos resíduos e a reciclagem dos resíduos, que de acordo com as notícias circulantes na União Européia considera que, até então, não era efetuada a um nível suficiente. O ato legislativo estabelece que para se conseguir uma gestão efetiva, os critérios essenciais deveram ser tomados a nível da Comunidade Europeia, visto que, a existência de diferentes políticas nacionais prejudicam as políticas econômicas e a eficácia das políticas de reciclagem. São apontados deveres e responsabilidades dos Estados-Membros, Produtores e Consumidores.

Em 2006, a Diretiva Europeia das “Baterias” 2006/66/EC foi criada para exigir normas mínimas de recolhimento e reciclagem de acumuladores e de criar um conjunto

* MANTUANO D. P. *et al.* **Pilhas e baterias portáteis:** legislação, processos de reciclagem e perspectivas. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, p.3, 2011.

coerente de definições e métodos de cálculo utilizados em conformidade com os regulamentos. Em conformidade com Shimizu *apud* Amon *et al.* (2012) a diretiva já foi alterada várias vezes e transposta para as legislações nacionais que estão em vigor.* A diretiva inclui metas desafiadoras em termos de taxas de recolhimento de pilhas e eficiência de reciclagem, metas estas, que deverão tornar-se mais rigorosas.

Na América do Norte foi estabelecida em 1995 a *Universal Waste Rule* que controla a manipulação de resíduos perigosos, incluindo as baterias. No ano seguinte, o *Mercury-Containing and Rechargeable Battery Management Act* foi implementado nos EUA para eliminar gradualmente o uso de baterias contendo mercúrio e encorajar as pessoas a usar baterias recarregáveis. No Japão foi aprovada em 1999 a *Law for the Promotion of the Effective Utilization of Resources*.

A tendência geral é desenvolver ou reforçar a legislação que incentiva a reciclagem de baterias, desencorajar acúmulo de pilhas em aterros, incentivar a produção de baterias com os componentes ambientalmente atóxicos ou de menor toxicidade, e transferir a responsabilidade de recolhimento, tratamento e recuperação de resíduos de baterias para os fabricantes (AMON *et al.* 2012).

Além da preocupação com o meio ambiente, as baterias expõem seus usuários ao risco de incêndio que serão relatados mais detalhadamente neste trabalho. Amon *et al.* (2012) menciona que o risco de incêndio causado por baterias é afetado pelos avanços na tecnologia que permitem uma maior quantidade de energia armazenada nestes dispositivos. O autor também argumenta que o aumento do uso de baterias que possuem um ciclo de vida relativamente curto impacta na quantidade de baterias que estão presentes em instalações que processam resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos.

Desta forma, se faz necessário analisar os riscos de incêndio que as baterias representam tanto em seu uso, manipulação, transporte, armazenagem quanto em sua reciclagem, buscando assim soluções e melhorias de suas tecnologias e garantindo a segurança. Diante do contexto geral o seguinte questionamento é feito:

Quais são os riscos de incêndio relacionados às baterias, como eles expõem as instalações que processam resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos?

* DIRETIVA 2008/12/EC; DIRETIVA 2008/103/EC.

1.2 Justificativa

Apesar de numerosos trabalhos e estudos serem desenvolvidos na área de engenharia de incêndio ainda é preciso direcionar grandes esforços a este tema, para que se possa alcançar níveis aceitáveis de segurança contra incêndio em nossa sociedade. Estes esforços devem se concentrar tanto na área de novas tecnologias, como também através de melhorias nas normas e regulamentações nacionais.

Não somente no Brasil, como também ao redor de todo o mundo, é percebido um grande aumento do consumo e descarte de baterias motivado pelo desenvolvimento de tecnologias de equipamentos eletroeletrônicos que necessitam de fontes portáteis de energia elétrica. A *Global Industry Analysts* (2011) prevê que o mercado mundial de baterias de consumo vai ultrapassar US \$ 55 bilhões até 2017.

Este estudo trará benefícios quanto ao uso adequado e à manipulação destes equipamentos, assim como contribuições para o desenvolvimento de novas tecnologias de baterias mais seguras e eficientes.

Serão abordados neste trabalho os riscos relacionados a pilhas e baterias que não estão em uso, ou seja, estão sendo armazenadas, em modo de espera em equipamentos, ou em instalações de reciclagem. Também estão incluídas possíveis situações de manipulação inadequada em tais circunstâncias, tais como exposição à água, exposição a temperaturas extremas, disposição inadequada ou aplicação de esforços mecânicos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Apresentar os riscos de incêndio relacionados às baterias de diversas tecnologias buscando tornar as instalações que processam estes resíduos mais seguras.

1.3.2 Específicos

- Realizar uma fundamentação teórica a respeito das baterias e dos riscos de incêndio que estão relacionados a elas;
- Introduzir uma breve discussão sobre as formas de armazenamento, transporte e manuseio de baterias assim como as legislações vigentes;

- Mostrar como são processados os resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos e quais os riscos a que se expõem as instalações e os operadores;
- Exibir alguns casos práticos relacionados ao tema abordado a fim de facilitar sua compreensão;
- Realizar uma conclusão relacionando os riscos de incêndio em baterias à cadeia de reciclagem.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho apresenta-se dividido em cinco capítulos, dispostos da seguinte maneira:

O primeiro capítulo trata da formulação e apresentação do problema proposto, a justificativa para realização do trabalho e por fim seus objetivos gerais e específicos.

A metodologia aplicada à pesquisa, os materiais e métodos utilizados são apresentados no segundo capítulo.

Os capítulos seguintes apresentarão a fundamentação teórica sobre os riscos de incêndio que estão relacionados às baterias bem como estes riscos expõem as instalações de reciclagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos e de baterias.

Os resultados obtidos através da coleta de informações durante todo o estudo, bem como as discussões, estarão descritos no sexto capítulo.

Por fim, no sétimo capítulo será apresentada as considerações finais do trabalho.

2 METODOLOGIA

2.1 A pesquisa

A pesquisa trata-se de uma investigação científica por meio do emprego de processos, métodos e técnicas específicas. Para CERVO (2007, p.58) entende-se por pesquisa, o trabalho científico que “vise ampliar as fronteiras do conhecimento, busque estabelecer novas relações de causalidade para os fatos e fenômenos conhecidos ou que apresente novas conquistas para o respectivo campo do conhecimento”. Delimita-se ainda a pesquisa sobre dois aspectos: a pesquisa pura e a pesquisa aplicada. Na pesquisa pura o pesquisador tem como meta a busca pelo conhecimento enquanto na pesquisa aplicada o investigador é motivado pela necessidade de contribuir para fins práticos, buscando soluções para problemas concretos.

Marconi (2012, p. 1) define a pesquisa como sendo “um procedimento formal, com método de pensamento reflexivo, que requer um tratamento científico e se constitui no caminho para conhecer a realidade ou verdades parciais”.

Severino (2007, p. 117) afirma ainda que “a ciência se constitui aplicando técnicas, seguindo um método e apoiando-se em fundamentos epistemológicos”. Sob o ponto de vista do autor existem diferenças significativas no modo de se praticar a investigação científica em cada ramo da ciência, em decorrência da diversidade de perspectivas epistemológicas que se podem adotar e de enfoques diferenciados dado aos objetos pesquisados e eventuais aspectos que se queira destacar.

A pesquisa é fundamentada em duas premissas gerais válidas à investigação científica, na objetividade e sistematização de informações fragmentadas, e em princípios particulares: os que são válidos para a pesquisa, em determinado campo do conhecimento, e os que dependem da natureza especial do objeto da ciência em pauta (ABRAMO *apud* MARCONI *et al.* 2012).

O desenvolvimento de um projeto de pesquisa compreende seis passos (MARCONI, 2012, p. 3), são eles:

1. Solução do tópico ou problema para a investigação;
2. Definição e diferenciação do problema;
3. Levantamento de hipóteses do trabalho;
4. Coleta, sistematização e classificação dos dados;

5. Análise e interpretação dos dados;
6. Relatório do resultado da pesquisa.

2.2 Tipos de pesquisa: Objetivos, abordagem e procedimentos técnicos

São várias os tipo de pesquisa que se pode realizar, conforme foi afirmado por Severino (2007, p.118) a escolha “implica na coerência epistemológicas, metodológicas e técnicas, para o seu adequado desenvolvimento”.

Toda e qualquer classificação se faz mediante algum critério (GIL, 2007), sob o ponto de vista de Marconi *et al.* (2012) os critérios para classificação dos tipos de pesquisa variam de acordo com o enfoque dado pelo autor que obedecem a condições, campos, metodologias, objetivos, etc.

A presente pesquisa como abordado por Ander-Egg *apud* Marconi *et al.* (2012) se trata de uma pesquisa aplicada, pois é caracterizada por seu interesse prático, buscando assim resultados que poderão ser aplicados em problemas que ocorrem na realidade. Sob o ponto de vista de Gil (2007 p.41) e com base em seus objetivos gerais ela possui um caráter exploratório em razão que “estas pesquisas têm o objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torna-lo mais explícito ou a construir hipóteses”. Segundo o autor o principal objetivo é o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições. A pesquisa envolve o levantamento bibliográfico e a análise de casos que estimulem e facilite a compreensão e o entendimento do tema proposto.

A forma de abordagem adotada é de natureza qualitativa, pois envolve parâmetros que não podem ser quantificados através do objetivismo matemático, ele se traduz em uma abordagem subjetiva (MINAYO, 2001).

O presente trabalho se fundamenta no relatório “*Fire risks associated with batteries*” da *Science Partner* de Amon F. *et al.* (2012); desta forma foi realizada a pesquisa bibliográfica e documental para o seu desenvolvimento e serão detalhadas no próximo tópico.

Devido ao tratamento e abordagem do objeto pesquisado neste estudo que se trata de uma pesquisa bibliográfica, pois realizou-se através de registros decorrentes de pesquisas documentais realizadas pela *Science Partner*, apresentam-se os dados e teorias desenvolvidas pelos seus autores.

A pesquisa bibliográfica é realizada a partir de referências teóricas publicadas em artigos, livros, teses entre outras e o pesquisador trabalha a partir das contribuições destes autores. Na pesquisa documental, tem-se como fonte documentos “que não receberam ainda um tratamento analítico, ou que ainda podem ser reelaborados de acordo com os objetos da pesquisa” GIL (2009 p.45), jornais, tabelas, relatórios e documentos legais, vídeos, fotos etc.

A pesquisa bibliográfica tem como objetivo encontrar respostas aos problemas formulados, e o recurso para isso é a consulta de documentos bibliográficos (CERVO,2007).

2.3 Materiais e Métodos

“Método (methodo), *s.m.* Ordem que se segue na investigação da verdade, no estudo de uma ciência ou para alcançar um fim determinado; marcha racional da inteligência para chegar ao conhecimento ou a demonstração de uma verdade...” AURELIO (1961 p. 796)

No desenvolvimento deste relatório foram utilizadas referências bibliográficas como apoio para um embasamento teórico a respeito dos riscos de incêndio relacionados a manipulação e uso de baterias, alguns casos práticos foram apresentados para uma melhor compreensão a respeito do tema.

Primeiramente foi definido o tema que seria abordado por este relatório, segundo Marconi *et al.* (2012 p.11) esta escolha deve ser realizada “de acordo com as inclinações, as possibilidades, as aptidões e as tendências de quem se propõe a elaborar um trabalho científico” desta forma o tema foi proposto dada a necessidade e a importância de se realizar esta investigação científica visto que muitas tecnologias desenvolvidas funcionam através das baterias e o risco de incêndio destes dispositivos deve ser abordado e reduzido através da pesquisa.

Logo após realizou-se a formulação do problema, de acordo com Marconi *et al.* (2012) deve haver clareza, concisão e objetividade, pois a colocação clara do problema pode facilitar a construção da hipótese central.

O levantamento de dados foi realizado através da pesquisa documental e bibliográfica, foram explorados alguns materiais científicos que serviram de suporte para investigação, buscou-se sempre apresentar dados embasados.

Por fim foi elaborado o relatório em torno do assunto de forma a dar conhecimento em respeito ao tema e esclarecer e solucionar o problema proposto.

2.4 Variáveis e indicadores

“Uma variável pode ser considerada como uma classificação ou medida; uma quantidade que varia; um processo operacional, que contém ou apresenta valores; aspecto, propriedade ou fator, discernível em um objeto de estudo e passível de mensuração” MARCONI *et al.* (2009 p. 139)

É de grande importância definir as variáveis que serão tratadas na investigação científica assim como os indicadores que as tornam possível. A Tabela 3 mostra as variáveis e os indicadores que constituem o projeto:

Tabela 3: Variáveis e indicadores.

| Variáveis | Indicadores |
|---------------------------------|---|
| Riscos de incêndios em baterias | <ul style="list-style-type: none"> • Produção de gás hidrogênio • Compostos inflamáveis em sua composição • Fuga térmica • Defeitos elétricos • Reação química não esperada • Contato com a água • Abuso mecânico • Temperaturas extremas • Ativação acidental de baterias reserva |

Fonte: Pesquisa direta (2017).

2.5 Instrumento de coleta de dados

Os dados são de grande importância para a compreensão e análise do tema abordado, é um passo na busca da solução do problema proposto. Os dados foram coletados através de pesquisas e organizados por meio de tabelas a fim de facilitar seu discernimento.

2.6 Tabulação dos dados

Os dados apresentados foram tabulados por meio do software *Microsoft Word* permitindo assim uma melhor visualização e compreensão dos problemas apresentados.

2.7 Considerações finais do capítulo

Foram abordados os métodos e as técnicas empregadas para o desenvolvimento da presente pesquisa, no capítulo seguinte será realizada uma fundamentação teórica a respeito do tema, onde se apresenta alguns casos práticos relacionados ao tema proposto.

3 RISCOS DE INCÊNDIO ASSOCIADOS A BATERIAS

3.1 Tecnologia das baterias

De acordo com, CONAMA *apud* Mantuano *et al.* (2011, p.2) as pilhas são definidas como “geradores eletroquímicos que possibilitam a descarga da corrente elétrica, mediante a conversão de energia química” Elas atuam como uma “bomba de elétrons”, movimentando-os do anodo (eletrodo negativo que se oxida) para o catodo (eletrodo positivo que se reduz). O condutor iônico, através do qual se dá a transferência de elétrons, é denominado eletrólito.

As baterias são classificadas frequentemente como primárias ou secundárias. Baterias primárias são aquelas que são utilizadas até o esgotamento de sua carga não podendo ser recarregadas; em contrapartida, as baterias secundárias são recarregáveis. As baterias de reserva são um tipo especial, conforme citado por Amon *et al.* (2012): são dispositivos que apresentam um componente faltante em sua composição durante o período de armazenamento; ele é adicionado à bateria no momento em que a mesma for utilizada a fim de ativar seu funcionamento. Um ponto positivo citado pelo autor é o fato de estas baterias não envelhecerem, podendo ser armazenadas por longos períodos de tempo antes de serem usadas.

Também é apresentado por Bocchi (2000) as baterias térmicas, que são ativadas em altas temperaturas. O eletrólito destas baterias está no estado sólido e inerte entre o anodo e o catodo. Com o calor gerado pela queima de material pirotécnico (termita) o eletrólito é fundido, desencadeando as reações eletroquímicas.

“As baterias de reserva e térmicas são usadas principalmente em artefatos militares, aeroespaciais e operações emergenciais” (BOCCHI, 2000, p.5).

Uma descrição mais detalhada sobre os diversos tipos de baterias pode ser encontrada no manual “*Linden’s handbook of Batteries*” de Linden’s D. *et al.* (2011). As baterias primárias e secundárias são abordadas nos capítulos “*An Introduction to primary batteries*” (p. 8.10; 8.11) e em “*An introduction to secondary batteries*” (p. 15.10; 15.11).

Com todas estas opções de tecnologias, a escolha mais adequada é determinada segundo Wozniak *apud* Amon *et al.* (2012) pelos requisitos do sistema em que é utilizada, por exemplo, tensão, tamanho físico, peso, capacidade de carga, corrente, requisitos de temperatura, vida de prateleira, segurança e confiabilidade, custos e condições ambientais.

3.1.1 Baterias primárias

As baterias primárias possuem grande variedade de aplicação que serão apresentadas na tabela 4, bem como suas características. Elas são bastante empregadas em instrumentos diversos, como em aparelhos portáteis eletrônicos, brinquedos, lanternas, entre outros. Ou até mesmo em outras aplicações médicas e militares. A principal vantagem dessas células está no seu uso simples que requer pouca ou nenhuma manutenção, também possuem boa vida de prateleira, razoável densidade de energia e de potência, confiabilidade e custo aceitável (LINDEN'S *et al.* 2011).

Os principais componentes e reações celulares dos diferentes tipos de pilhas primárias comerciais são apresentadas na tabela 5. As baterias de lítio são bastante comuns e serão apresentadas separadamente na tabela 6.

As células a combustível são uma variedade de baterias primárias que possuem a característica de usar como reagente ativo no cátodo o oxigênio do ar (BOCCHI, 2000, p.5). Um exemplo deste tipo de são as baterias primárias de zinco-ar, alumínio-ar, metanol-ar e hidrogênio-oxigênio.

3.1.2 Baterias secundárias

As baterias secundárias também apresentam grande variedade de aplicação que serão apresentadas na tabela 7, bem como suas características. Elas são bastante empregadas em aparelhos portáteis diversos, também em aplicações industriais de maior porte, como os sistemas de *backup* de energia. Atualmente as baterias secundárias tem um papel de destaque nas tecnologias das *smart grids* (redes elétricas inteligentes) onde micro redes são criadas para abastecer áreas específicas durante a falta de energia elétrica comercial. Os veículos elétricos e híbridos também são bastante dependentes das tecnologias das baterias secundárias, que segundo Rosolem (2015) são o principal gargalo tecnológico do seu desenvolvimento.

Desta forma são fomentados programas de incentivo ao desenvolvimento para melhorar o desempenho dos sistemas de bateria existentes e desenvolver novos sistemas para atender às especificações rigorosas dessas novas aplicações Linden *et al.* (2011).

Os principais componentes e reações celulares nos diferentes tipos de baterias secundárias comerciais são apresentadas resumidamente na tabela 8. Muitas baterias secundárias podem produzir gás de hidrogênio que oferecem um grande risco de incêndio; a possibilidade da produção deste gás esta indicado na tabela 8.

Tabela 4: Características e aplicações das baterias primárias.

| Tipo de bateria | Características | Aplicações |
|--|---|---|
| Zinco – Carbono (Leclanché, Zn/MnO ₂) | São baterias comuns, de baixo custo e estão disponíveis em uma variedade de tamanhos. | Lanternas, rádios portáteis, brinquedos, instrumentos diversos. |
| Magnésio (Mg/MnO ₂) | Bateria primária de alta capacidade, longa vida de prateleira. | Transmissores e receptores militares, transmissores de emergência de aeronaves. |
| Mercúrio (Zn/HgO) | Maior capacidade por volume comparada aos tipos convencionais, descarga plana, longa vida de prateleira. | Dispositivos médicos (marcapasso), aparelhos auditivos, máquinas fotográficas, detectores, equipamentos militares, mas em uso limitado devido ao risco ambiental de mercúrio. |
| Cádmio – Óxido de mercúrio (Cd/HgO) | Longa vida de prateleira, boa performance em alta e baixa temperatura, baixa densidade de temperatura. | Aplicações especiais que requerem operação em condições extremas de temperatura e longa duração. |
| Alcalinas (Zn/alcalina/MnO ₂) | Baterias premium de uso geral mais populares, boa “low-temperature” e alta taxa de performance, custo moderado. | Tipo mais popular de baterias primárias, usadas em uma variedade de equipamentos portáteis operados a bateria. |
| Zinco – Óxido de prata (Zn/AgO ₂) | Maior capacidade por peso comparada aos tipos convencionais, longa vida de prateleira, custo elevado, descarga plana. | Aparelhos auditivos, máquinas fotográficas, relógios elétricos, mísseis, aplicações subaquáticas e espaciais (tamanhos maiores). |
| Zinco – Ar (Zn/O ₂) | Maior densidade de energia, baixo custo, não são independentes das condições ambientais. | Aplicações especiais, aparelhos auditivos, pagers, dispositivos médicos e eletrônicos portáteis. |
| Lítio – Cátodo solúvel | Alta densidade de energia, longa vida de prateleira, bom desempenho em uma ampla faixa de temperatura. | Ampla gama de aplicações incluindo dispositivos que requerem elevada densidade de energia e grande vida útil (capacidade de 1 a 10.000 Ah), por exemplo, medidores de utilidade para aplicações militares de energia. |
| Lítio – Cátodo sólido | Alta densidade de energia, boa “low-temperature” e alta taxa de performance, longa vida de prateleira, custo competitivo. | Substituição para aplicações de botão convencional e aplicações de células cilíndricas. |
| Lítio – Eletrólito sólido | Vida de prateleira extremamente longa, bateria de baixa energia. | Eletrônica médica, circuitos de memória, fusão. |

Fonte: Adaptado de Linden D. *et al.* (2011).

Tabela 5: Principais componentes e reações celulares das baterias primárias.

| Tipo de bateria | Polo positivo | Polo negativo | Eletrólito | Reações celulares |
|-----------------------------|---|------------------|--|--|
| Zinco – Carbono (Leclanché) | Dióxido de manganês (MnO ₂) / Carbono (C) | Zinco (Zn) | Cloreto de amônio (NH ₄ Cl) e/ou Cloreto de zinco (ZnCl ₂) / água | $\text{Zn} + 2\text{MnO}_2 + 2\text{NH}_4\text{Cl} \rightarrow 2\text{MnOOH} + \text{Zn}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2$ (Emissão de leve) $\text{Zn} + 2\text{MnO}_2 + \text{NH}_4\text{Cl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{MnOOH} + \text{NH}_3 + \text{Zn}(\text{OH})\text{Cl}$ (Forte emissão) $\text{Zn} + 6\text{MnOOH} \rightarrow 2\text{Mn}_3\text{O}_4 + \text{ZnO} + 3\text{H}_2\text{O}$ (Emissão prolongada) ou $\text{Zn} + 2\text{MnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{ZnCl}_2 \rightarrow 2\text{MnOOH} + 2\text{Zn}(\text{OH})\text{Cl}$ (Emissão leve ou pesada) ou $4\text{Zn} + 8\text{MnO}_2 + 9\text{H}_2\text{O} + \text{ZnCl}_2 \rightarrow 8\text{MnOOH} + \text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{ZnO} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Emissão leve ou pesada) $\text{Zn} + 6\text{MnOOH} + 2\text{Zn}(\text{OH})\text{Cl} \rightarrow 2\text{Mn}_3\text{O}_4 + \text{ZnCl}_2 \cdot 2\text{ZnO} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Emissão prolongada) |
| Alcalinas | Dióxido de manganês (MnO ₂) | Zinco (Zn) | Hidróxido de potássio (KOH)/água | $2\text{MnO}_2 + \text{Zn} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{MnOOH} + \text{Zn}(\text{OH})_2$ ou $3\text{MnO}_2 + 2\text{Zn} \rightarrow \text{Mn}_3\text{O}_4 + 2\text{ZnO}$ |
| Zinco – Óxido de prata | Óxido de Prata (Ag ₂ O ou AgO) | Zinco (Zn) | Hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH)/água | $\text{Zn} + \text{Ag}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Ag} + \text{ZnO}$ ou $\text{Zn} + \text{AgO} \rightarrow \text{Ag} + \text{ZnO}$ |
| Mercúrio | Óxido de mercúrio (HgO) | Zinco (Zn) | Hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH)/água | $\text{Zn} + \text{HgO} \rightarrow \text{ZnO} + \text{Hg}$ |
| Zinco – Ar | Oxigênio ou Ar (O ₂) | Zinco em pó (Zn) | Hidróxido de potássio (KOH)/água | $2\text{Zn} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{ZnO}$ |
| Lítio | Vários, consultar tabela 2. | Lítio (Li) | Vários, consultar tabela 2. | Vários, consultar tabela 2. |

1. Muitas vezes as baterias de lítio e de íon-lítio não são consideradas um mesmo tipo de baterias.

Fonte: Adaptado de Linden's Handbook of Batteries *apud* AMON Francine *et al.* (2012).

Tabela 6: Principais componentes e reações celulares das baterias de lítio (baterias primárias).

| Tipo de bateria | Polo positivo | Polo negativo | Eletrólito | Reações celulares |
|---------------------------------|---|---------------|--|---|
| Lítio – Dióxido de manganês | Dióxido de manganês (MnO ₂) | Lítio (Li) | Sal de lítio (e.g. perclorato de lítio (LiClO ₄)) em solvente orgânico (e.g. carbonato de propileno e 1,2-dimetoxietano) | $x\text{Li} + \text{Mn(IV)O}_2 \rightarrow \text{Li}_x\text{Mn(III)O}_2$ |
| Lítio – Monofluoreto de carbono | Monofluoreto de policarbono (CF _x) | Lítio (Li) | Sal de lítio (e.g. tetrafluoroborato de lítio (LiBF ₄)) em solvente orgânico | $x\text{Li} + \text{CF}_x \rightarrow x\text{LiF} + x\text{C}$ |
| Lítio – Dissulfeto de ferro | Sulfureto de ferro (FeS ₂) / Carbono (C) | Lítio (Li) | Sal de lítio (iodeto de lítio (LiI)) em solvente orgânico (e.g. mistura de 1,3-dioxolano e 1,2-dimetoxietano) | $4\text{Li} + \text{FeS}_2 \rightarrow \text{Fe} + 2\text{Li}_2\text{S}$ |
| Lítio – Cloreto de tionila | Carbono (C) / Cloreto de tionila (SOCl ₂) | Lítio (Li) | Tetracloroaluminato de lítio (LiAlCl ₄) em cloreto de tionila (SOCl ₂) | $4\text{Li} + 2\text{SOCl}_2 \rightarrow 4\text{LiCl} + \text{S} + \text{SO}_2$ |
| Lítio – Dióxido de enxofre | Carbono (C) | Lítio (Li) | Dióxido de enxofre (SO ₂) em solução de brometo de lítio (LiBr) em acetonitrilo | $2\text{Li} + 2\text{SO}_2 \rightarrow \text{Li}_2\text{S}_2\text{O}_4$ |
| Lítio – Óxido de cobre | Óxido de cobre (CuO) | Lítio (Li) | Perclorato de lítio (LiClO ₄) em solvente orgânico | $2\text{Li} + \text{CuO} \rightarrow \text{Li}_2\text{O} + \text{Cu}$ |

- Existem cerca de mais 10 tipos de baterias de lítio, no entanto são mais raras e não estão incluídas nesta tabela.
- Muitos solventes orgânicos são inflamáveis
- Cloreto de tionila (SOCl₂) reage com muitos compostos, por exemplo a água, nesta reação ocorrerá a produção de cloreto de hidrogênio (HCl) e dióxido de enxofre (SO₂), produtos que não são inflamáveis, de acordo com a seguinte reação: $\text{SOCl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCl} + \text{SO}_2$
- Não está mais disponível comercialmente (LINDEN D. *et al.* 2011)

Fonte: Adaptado de Linden's Handbook of Batteries *apud* AMON Francine *et al.* (2012).

Tabela 7: Características e aplicações das baterias secundárias.

| Tipo de bateria | Características | Aplicações |
|---|---|--|
| Chumbo ácido (Automotiva) | Bateria popular de baixo custo, desempenho moderado de energia específica, alta taxa de fornecimento e boa performance “low-temperature”, designs livres de manutenção. | Uso automotivo SLI, carrinhos de golfe, cortadores de grama, tratores, aeronaves, uso marinho. |
| Chumbo ácido (Tração – Força motriz) | Projetada para descargas profundas (6 – 9h) e trabalho cíclico. | Caminhões, equipamentos de manuseio de materiais, veículos elétricos e híbridos, tipos especiais para energia submarina. |
| Chumbo ácido (Estacionária) | Projetado para serviço de flutuação em espera (standby), longa vida útil, projetos VRLA. | Energia de emergência, utilidades, telefone, módulos UPS, nivelamento de carga, armazenamento de energia, iluminação de emergência. |
| Chumbo ácido (Portátil) | Selado, sem manutenção, baixo custo, boa capacidade de flutuação, ciclo de vida moderado. | Ferramentas portáteis, pequenos aparelhos e dispositivos, TVs e equipamento eletrônico portátil. |
| Níquel – Cádmió (Industrial e FNC) | Alta taxa de fornecimento, capacidade “low-temperature”, tensão plana, excelente ciclo de vida. | Baterias para aeronaves, aplicações industriais e de emergência, equipamento de comunicação. |
| Níquel – Cádmió (Portátil) | Selado, livre de manutenção, alta taxa de fornecimento e boa performance “low-temperature”, excelente ciclo de vida. | Equipamentos ferroviários, eletrônicos de consumo, ferramentas portáteis, pagers, aparelhos, equipamentos fotográficos, energia de reserva (standby), backup de memória. |
| Níquel – Metal Hidreto | Selada, livre de manutenção, maior capacidade que as baterias de Níquel – Cádmió. | Eletrônicos de consumo e outras aplicações portáteis, veículos elétricos e híbridos. |

Fonte: Adaptado de Linden D. *et al.* (2011).

Tabela 7 (Continuação): Características e aplicações das baterias secundárias.

| Tipo de bateria | Características | Aplicações |
|--|---|--|
| Níquel – Ferro | Construção robusta e durável, longa vida, baixa energia específica. | Equipamentos de manuseio de materiais, aplicações estacionárias, vagões de trem. |
| Níquel – Zinco | Alta energia específica, vida útil prolongada e grande capacidade de taxa de fornecimento. | Bicicletas, scooters, motores de barco. |
| Zinco – Prata | Maior energia específica, muito boa capacidade de taxa de fornecimento, vida de ciclo baixa, custo elevado | Eletrônica portátil leve e outros equipamentos, alvos de treinamento, drones, submarinos e outros equipamentos militares, veículos de lançamento e sondas espaciais. |
| Prata – Cádmium | Alta energia específica, boa retenção de carga, ciclo de vida moderado, alto custo. | Equipamentos portáteis que requerem uma bateria leve e de alta capacidade, satélites espaciais. |
| Níquel – Hidrogênio | Longo ciclo de vida sob descarga superficial, vida longa. | Principalmente para aplicações aeroespaciais como satélites LEO e GEO. |
| Bateria recarregável de temperatura ambiente “primária” (Tipos Zn/MnO ₂) | Baixo custo, boa capacidade de retenção, selado e livre de manutenção, ciclo de vida limitado e boa capacidade de taxa de fornecimento. | Aplicações de células cilíndricas, substituição das células recarregáveis de Zinco – Carbono e Alcalinas baterias primárias, eletrônica de consumo (sistemas de temperatura ambiente). |
| Íon Lítio | Alta energia específica e densidade de energia, vida útil longa. | Equipamentos eletrônicos portáteis e de consumo, veículos elétricos e aplicações espaciais. |

Fonte: Adaptado de Linden D. *et al.* (2011).

Tabela 8: Principais componentes e reações oxirredução das baterias secundárias (baterias recarregáveis).

| Tipo de bateria | Polo positivo | Polo negativo | Eletrólito | Reações celulares (descarga →, carga ←) | Possível evolução de hidrogênio |
|---|---|-------------------|--|--|---------------------------------------|
| Chumbo ácido | Dióxido de chumbo (PbO ₂) | Chumbo (Pb) | Ácido Sulfúrico (H ₂ SO ₄) / água | $Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 = 2PbSO_4 + 2H_2O$ | Sim |
| Níquel – Cádmio | Hidróxido de óxido de níquel (NiOOH) | Cádmio (Cd) | Hidróxido de potássio (KOH) / água | $Cd + 2NiOOH + 2H_2O = Cd(OH)_2 + 2Ni(OH)_2$ ou $Cd + 2NiOOH \cdot xKOH \cdot (H_2O) = Cd(OH)_2 + 2Ni(OH)_2 + 2xKOH$ | Sim |
| Níquel – Metal Hidreto (NiMH) | Hidróxido de óxido de níquel (NiOOH) | Diferentes ligas | Hidróxido de potássio (KOH) / água | $MH + NiOOH = M + Ni(OH)_2$ M é uma liga | Sim |
| Íon – Lítio | Diferentes óxidos de metal ou fosfato (e.g. óxido de lítio cobalto (LiCoO ₂), fosfato de ferro e lítio (LiFePO ₄) ou óxido de lítio e manganês (LiMn ₂ O ₄)) | Carbono (Grafite) | Sal de lítio (e.g. hexafluorofosfato de lítio (LiPF ₆)) em misturas de solventes orgânicos | $x/yLi_yC + Li_{1-x}MO_2 = LiMO_2 + x/yC$ | Ver nota no rodapé |
| Íon de polímero (Li-Po) | Diferentes óxidos de metal (e.g. óxido de lítio cobalto (LiCoO ₂) ou óxido de lítio e manganês (LiMn ₂ O ₄)) | Carbono (Grafite) | Sal de lítio (e.g. hexafluorofosfato de lítio (LiPF ₆)) em polímero | $x/yLi_yC + Li_{1-x}MO_2 = LiMO_2 + x/yC$ | Ver nota no rodapé |
| Níquel – Ferro ou Baterias de eletrodo de ferro | Hidróxido de óxido de níquel (NiOOH) | Ferro (Fe) | Hidróxido de potássio (KOH) em conjunto com hidróxido de lítio (LiOH) / água | $3Fe + 8NiOOH + 4H_2O = 8Ni(OH)_2 + Fe_3O_4$ | Sim |
| Níquel – Zinco | Hidróxido de óxido de níquel (NiOOH) | Zinco (Zn) | Hidróxido de potássio (KOH) / água | $Zn + 2NiOOH + 2H_2O = Zn(OH)_2 + 2Ni(OH)_2$ ou $Zn + 2NiOOH + 2OH^- = ZnO_2^{2-} + 2Ni(OH)_2$ ou $Zn + 2NiOOH + H_2O = ZnO + 2Ni(OH)_2$ | Sim |

1. Baterias de chumbo-ácido são freqüentemente divididas em baterias de chumbo-ácido abertas ou de chumbo-ácido de válvula regulada (VRLA). Em baterias de chumbo-ácido o gás de hidrogênio H_2 (g) e o gás oxigênio O_2 (g) pode ser produzido através da eletrólise da água. Em baterias abertas H_2 (g) e O_2 (g) pode ser perdida e, por conseguinte, estas baterias deve ser enchido com água. Em baterias VRLA, gases são recombinados regenerando a água H_2O , estas baterias podem ser divididos em pilhas de gel ou baterias de esteira de vidro absorvente (AGM) dependentes de como o electrólito está imobilizado.
2. Muitas vezes, baixas concentrações de cálcio (Ca) (mais comum), antimônio (Sb), estanho (Sn) ou selênio (Se) podem estar presentes.
3. A concentração de ácido sulfúrico varia durante o ciclo de carga / descarga.
4. Diversas variantes de bateria de níquel cádmio existem incluindo selada e baterias ventiladas.
5. São misturas escritas como BA5, A2B7, ou AB2. A AB5 é constituída de lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr), neodímio (Nd), níquel (Ni), cobalto (Co), manganês (Mn), e de alumínio (Al). A A2B7 é constituída de lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr), neodímio (Nd), magnésio (Mg), níquel (Ni), cobalto (Co), manganês (Mn), alumínio (Al), e zircônio (Zr), ou composto de neodímio (Nd), magnésio (Mg), níquel (Ni), cobalto (Co), alumínio (Al), e zircônio (Zr). A AB2 é constituída de vanádio (V), titânio (Ti), zircônio (Zr), níquel (Ni), crômio (Cr), cobalto (Co) e manganês (Mn), ou vanádio (V), titânio (Ti), zircônio (Zr), níquel (Ni), crômio (Cr), manganês (Mn), e estanho (Sn), ou vanádio (V), titânio (Ti), zircônio (Zr), níquel (Ni), crômio (Cr), cobalto (Co), manganês (Mn), alumínio (Al) e estanho (Sn).
6. Baterias de íon-lítio e baterias de lítio, muitas vezes não são considerados para ser o mesmo tipo de bateria.
7. Baterias de íon-lítio tem vários mecanismos de segurança diferentes construídas nas baterias.
8. Existem vários óxidos de metais diferentes.
9. São também utilizados outros materiais.
10. Existem diferentes eletrólitos em diferentes misturas de solventes orgânicos. Solventes orgânicos comuns são, por exemplo carbonato de etileno (CE), carbonato de propileno (PC), carbonato de dimetilo (DMC), carbonato de etilo de metilo (EMC), carbonato de dietilo (DEC), e éter dimetílico (DME), muitos dos solventes orgânicos são inflamáveis.
11. Estas baterias não contém um eletrólito aquoso, no entanto gás hidrogênio H_2 (g) ainda pode ser liberado quando baterias de lítio-ion ventilam após um abuso mecânico.
12. Existem outros materiais, por exemplo óxido de prata pode ser substituído por hidróxido de óxido de níquel, hidróxido de óxido de níquel no entanto é o material de mais comum.

Fonte: Adaptado de Linden's Handbook of Batteries *apud* AMON, Francine *et al.* (2012).

Juntamente dos componentes principais, as baterias também podem conter materiais adicionais. A composição química é frequentemente diferente de fabricante para fabricante, e entre pilhas de diferentes modelos, no entanto composições típicas de algumas baterias primárias e secundárias comuns podem ser encontradas no documento "*Product information primary and rechargeable batteries*" de The European Portable Battery Association (2007).

Mais detalhes a respeito das principais baterias primárias e secundárias comercializadas no país podem ser encontrados em "Pilhas e baterias: funcionamento e impacto ambiental" de Bocchi *et al.* (2000).

3.1.3 Baterias de reserva

São muito comuns baterias reservas do tipo *water-activated*; este modelo é ativado através da adição de água ou de uma solução aquosa de eletrólito para bateria. A ativação, segundo Amon *et al.* (2012), é realizada por imersão da bateria, por forçar um fluxo ou vertendo uma solução dentro da bateria.

Os componentes principais, e as reações celulares das baterias *water-activated* estão apresentadas na tabela 9.

As baterias ativadas por água são atualmente fabricadas para aplicações específicas, tais como na aviação e marinha, bastante empregados em coletes luminosos salva vidas, equipamentos de emergência de barcos salva vidas, sonobóias, radio e luzes de sinais luminosos, munições subaquáticas e unidades de radiosondagem (LUCERO *et al. apud* AMON *et al.* 2012).

Mais características das baterias de reserva *water-activated* assim como uma descrição de outros tipos de baterias de reserva estão disponíveis nas literaturas '*Reserve magnesium anode and zinc/silver oxide batteries*' (p. 34.1-34.41) de Lucero R. D. *et al.* (2011) e em '*Reserve military batteries*' (p. 35.1-35.31) de Chua, D. L. *et al.* (2011). Disponíveis em '*Linden's Handbook of Batteries*'.

Tabela 9: Principais componentes e reações celulares em baterias reserva water-activated.

| Tipo de bateria | Polo positivo | Polo negativo | Reações celulares |
|--|---|---------------|---|
| Magnésio – Cloreto de prata | Cloreto de prata (AgCl) | Magnésio (Mg) | $Mg + 2AgCl \rightarrow MgCl_2 + 2Ag$ |
| Magnésio – Cloreto de cobre | Cloreto de cobre (CuCl) | Magnésio (Mg) | $Mg + 2CuCl \rightarrow MgCl_2 + 2Cu$ |
| Magnésio – Cloreto de chumbo | Cloreto de chumbo (PbCl ₂) | Magnésio (Mg) | $Mg + PbCl_2 \rightarrow MgCl_2 + Pb$ |
| Magnésio – Iodeto de cobre – Enxofre | Iodeto de cobre (Cu ₂ I ₂) | Magnésio (Mg) | $Mg + Cu_2I_2 \rightarrow MgI_2 + 2Cu$ |
| Magnésio – Tiocianeto de cobre – Enxofre | Tiocianato de cobre (CuSCN) | Magnésio (Mg) | $Mg + 2CuSCN \rightarrow Mg(SCN)_2 + 2Cu$ |
| Magnésio – Dióxido de manganês | Dióxido de manganês (MnO ₂) | Magnésio (Mg) | $Mg + 2MnO_2 + H_2O \rightarrow Mn_2O_3 + Mg(OH)_2$ |

1. Além disso, a seguinte reação tem lugar a $Mg + 2H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + H_2$.

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

3.1.4 Outras baterias menos comuns

Alguns outros modelos de pilhas foram desenvolvidas e são aplicadas em condições bastante especiais como em temperaturas extremas, equipamentos incomuns ou quando altas demandas são exigidas, como por exemplo, alto grau de confiabilidade ou longos períodos de armazenagem.

Tais baterias incluem: baterias de mercúrio-cádmio (primárias), baterias de magnésio-dióxido de manganês (primárias), baterias de níquel-hidrogênio (secundárias), baterias recarregáveis de óxido de prata (secundárias), baterias alcalinas de zinco-dióxido de manganês (secundárias), baterias recarregáveis de metal de lítio (secundárias), baterias reserva de zinco-óxido de prata, baterias reserva de temperatura ambiente de anodo de lítio, baterias de reserva *spin-dependent*, e baterias térmicas (baterias de reserva). Informações sobre essas baterias estão presentes na literatura “*Linden’s handbook of Batteries*” de Linden’s D. *et al.* (2011).

3.1.5 Baterias para o futuro

É apresentado pela *Science Partner* uma visão a respeito das perspectivas de desenvolvimento das tecnologias de baterias comerciais. Como foi exposto por Amon *et al.* (2012), muitas pesquisas e desenvolvimentos de baterias são realizados por universidades, institutos de pesquisa e fabricantes de bateria. Segundo o autor, espera-se que a tecnologia da bateria continuará a desenvolver-se rapidamente, apesar dos vários problemas encontrados. Entretanto é difícil prever o futuro e se os novos tipos de baterias serão comercializados e chegarão ao mercado, porém algumas previsões são apontadas.

A tecnologia de baterias a base de lítio está evoluindo muito rapidamente, elas são amplamente empregadas no mercado de eletrônicos e não é provável que serão substituídas por outras tecnologias em um futuro próximo. Espera-se que elas venham a dominar também o mercado dos automóveis elétricos. Como acredita Scrosati *et al.* (2010), espera-se que estas baterias sejam melhoradas e desenvolvidas no que diz respeito ao poder de vida, confiabilidade e segurança. Muitos esforços estão direcionados para encontrar novos materiais de eletrodos e eletrólitos.

As bateria de lítio-ar possuem elevadas expectativas de uso para o futuro, sua tecnologia assim como seus possíveis melhoramentos são descritos nas obras “*Lithium batteries: Status, prospects and future*” de Scrosati, B. *et al.* (2010); “*Review on Li-air batteries – Opportunities, limitations and perspectives*” de Kraytsberg, A. *et al.* (2011) e “*Metal/air batteries*” de Atwater, T. B. *et al.* (2011).

Micro Fuel Cells descritas em “*Smart fuels cells – Linden’s Handbook of batteries*” (Atwater, T. B. *et al.* 2011). São, por vezes, mencionadas como uma alternativa às baterias tradicionais, no entanto, acredita-se que irá levar vários anos antes que elas estejam prontas para ser introduzidas amplamente como fonte de energia primária, para ser utilizadas por exemplo em computadores e telefones móveis.

3.2 Armazenamento, transporte e manuseio de baterias

A segurança dos procedimentos de transporte, manuseio e armazenamento das baterias são um dos principais objetivos buscados através de regulamentos internacionais, nacionais e regionais, declarações políticas e diretrizes, bem como recomendações dos fabricantes das baterias.

A maioria destes documentos lidam com questões de rotulagem, proteção contra curto-circuitos, contenção de vazamento das baterias, e treinamento de segurança do pessoal responsável. É dada atenção especial às baterias contendo lítio, pois representam um risco potencialmente maior do que outros tipos de baterias (AMON *et al.* 2012).

As companhias de navegação, universidades, organizações governamentais, fabricantes, associações e outros grandes usuários finais de baterias também fornecem orientações sobre a manipulação, armazenagem, embalagem, transporte e as põem à disposição de seus clientes e funcionários. Exemplos destes materiais são “*Proper disposal, storage, care and handling of your batteries*” da Energizer Corporation e “*Procedure for Handling, upkeeping Batteries on Storage – MF Batteries*” de Reem Batteries & Power Appliances Co.

Os fabricantes de baterias são obrigados a fornecer aos consumidores a Ficha de Dados de Segurança do Material (em inglês *Material Safety Data Sheets*, MSDS), estes materiais geralmente estão disponíveis em *websites on-line*; esta ficha deve indicar claramente os riscos associados ao produto.

3.2.1 Armazenamento

Em face da crescente preocupação com a reciclagem e reaproveitamento de materiais, pontos de coleta estão sendo estabelecidos em lojas e outros locais públicos para tornar mais fácil o descarte correto de baterias usadas. O Canadá, o Reino Unido e a Suécia são líderes entre as nações em desenvolvimento de sistemas funcionais que permitam recolher, transportar e reciclar baterias usadas.*

As diretrizes do Exército dos EUA descritas em “*Battery Safety Reference Guide*”, *System Safety Engineering*, sobre o armazenamento são representativas de cuidados usados para armazenamento em massa de baterias e incluem as seguintes orientações úteis:

1. Armazene baterias novas na embalagem original, pois isso ajuda a identificar os danos, tais como inchaço ou vazamento de baterias. O inchaço da carcaça indica uma bateria que tenha sido ventilada;

* *Advisory note on the storage and transport of waste portable batteries*, DEFRA – Department for Environment, Food and Rural Affairs, UK (2009).

2. Não misture pilhas novas e usadas, uma vez que é difícil distingui-las;
3. Não acumule pilhas usadas, elas devem ser dispostas em locais adequados;
4. Alguns tipos de baterias devem ser armazenadas em locais distintos devido a possível interação de materiais perigosos. É fundamental que as baterias de chumbo-ácido sejam mantidas longe de baterias níquel-cádmio ou baterias de níquel-hidreto metálico;
5. Proteja-as de esmagamento, punções, e curto-circuito;
6. Mantenha-as em um local fresco, seco e bem ventilado, abaixo de 54 ° C (130 ° F);
7. Fuga térmica de baterias de níquel-cádmio pode ocorrer se exceder temperatura de 54 ° C (130 ° F);
8. Determinar os locais de armazenamento da bateria em proximidade ao departamento de bombeiros, criar um ambiente de trabalho seguro e com inspeções periódicas conduzidas pelo departamento de bombeiros e pelo departamento de segurança;
9. Proteger o local de armazenamento de baterias com sprinklers;
10. Não fumar ou comer nestes ambientes;
11. Assegurar extintores de incêndio em condições adequadas de uso e disponíveis. Usar um extintor tipo "AB" (H₂O) para combater incêndios que envolvem pequenas quantidades de pilhas. Um extintor tipo "D" seria utilizado para combater um incêndio de lítio por bombeiros profissionais.

3.2.2 Transporte

Existem muitos regulamentos de nível internacional, propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), que se aplicam à classificação de mercadorias e materiais perigosos, que tem um impacto importante sobre o transporte de baterias. Dentre estes estão: UN2794, UN2795, UN2796, UN2797, UN2800, UN3028, UN3090, UN3091, UN3292, UN3480, e UN3481, todos lidam com a classificação e embalagens seguras das baterias para transporte, incluindo a proteção contra curto-circuitos e vazamento.*

* *Transport of Dangerous Goods – Manual of Tests and Criteria, United Nations (New York and Geneva) p. 456 (2009); Review of regulations affecting the transport of waste Batteries, 16^o International Congress for battery Recycling, Ottaviani, M. (2011).*

As exigências da ONU para as baterias de lítio incluem controles de altitude, térmico, vibração, choque, curto-circuito externo, impacto, sobrecarga, e os testes de descarga forçada que garantem que as baterias são seguras para o transporte.

A Organização Internacional de Aviação Civil publica princípios gerais que regem o transporte internacional de mercadorias perigosas (incluindo baterias) por via aérea.*

Também publicam instruções técnicas com base nestes princípios que se tornaram incorporadas à legislação nacional para muitos países. As instruções técnicas são destinadas ao uso por todas as partes envolvidas na cadeia de transporte, por exemplo, carregadores, operadores e autoridades governamentais. Quando baterias são importadas ou exportadas para a Comunidade Europeia ou transportadas para o seu tratamento e reciclagem deve-se cumprir os requisitos ou condições equivalentes a Directiva 2006/66/CE e as evidências devem prever que:

- A tecnologia aplicada é a melhor disponível, ou equivalente;
- As atuais orientações aprovadas sejam cumpridas;
- Não haja riscos à saúde humana ou ao ambiente;
- As exigências mínimas de tratamento sejam atendidas;
- Níveis mínimos de reciclagem sejam cumpridos;
- Condições de saúde, segurança e gestão de resíduos para reciclagem, tratamento, transporte e armazenamento sejam cumpridos.

No Canadá**, o transporte de produtos é regulamentado por normas que promovem a segurança pública, quando mercadorias perigosas são transportadas por via férrea, estrada, mar ou ar. No que diz respeito às baterias, a *Transportation of Dangerous Goods* (TDG) exige que a documentação adequada acompanhe o carregamento, que os pacotes e os veículos estejam devidamente marcados, que a pessoa responsável esteja adequadamente treinada, e que a embalagem seja à prova de derramamento.

* *Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods by Air*. (2011).

***Transportation of Dangerous Goods (TDG) - "Transportation of batteries and battery fluids by road"*, Governo de Alberta, Canadá, p. 13 (2010); "*Safe storage, use and disposal of batteries*", Report No. D112-7; "*Human resources and skills development*", Governo do Canadá (2006).

Nos EUA, o *National Transportation Safety Board* (NTSB) é responsável pela segurança das mercadorias transportadas. Os regulamentos dos EUA são dispostos na norma de materiais perigosos*, que geralmente seguem os requisitos da Organização Internacional de Aviação Civil. Essa legislação inclui disposições relativas à embalagem, comunicação de risco e manuseio das baterias e dispositivos alimentados por baterias. O programa *Call2Recycle* opera tanto no Canadá quanto nos EUA e fornece muitas orientações sobre a segurança do transporte de pilhas de consumo a partir de pontos de recolha para reciclagem.

3.2.3 Reciclagem

O artigo 15º da Diretiva 2006/66/CE “*Study on the calculation of recycling efficiencies and implementation of export*” diz respeito ao armazenamento seguro de baterias antes e durante o processo de reciclagem, também aborda outros tópicos relacionados a este assunto.

Este documento exige que todos os fluidos e ácidos devem ser removidos das baterias antes do armazenamento. Os locais de tratamento e armazenamento também devem ter superfícies impermeáveis à prova de vazamento e serem claramente identificados. Curiosamente, o artigo 15 não menciona proteção externa contra curto-circuito (AMON *et al.* 2012).

3.3 Riscos de incêndio

Vários riscos de incêndio relacionados às baterias são identificados, citam-se:

1. Produção de gás hidrogênio a partir de baterias;
2. Compostos inflamáveis em baterias de lítio e íon-lítio;
3. Fuga térmica;
4. Riscos de incêndios elétricos;
5. Reação do lítio metálico;
6. Reação do ácido sulfúrico;
7. Riscos de incêndio devidos ao contato com a água;
8. Temperaturas extremas;
9. Ativação acidental de baterias reserva.

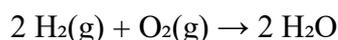
* *Hazardous Materials Regulations (HMR)*; “49 CFR Partes 100 – 185”.

Todos estes riscos apresentados serão descritos e discutidos a seguir.

3.3.1 Produção de gás hidrogênio

Muitos tipos diferentes de baterias podem produzir o gás hidrogênio ($H_2(g)$), que é altamente inflamável.

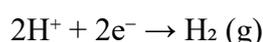
O gás hidrogênio ($H_2(g)$) em contato com o gás oxigênio ($O_2(g)$) ou ar se inflama facilmente e como descrito pela reação abaixo, neste processo ocorre a produção de água.



O gás oxigênio ($O_2(g)$) pode ser produzido por via eletroquímica e está presente no ar ambiente.

O gás hidrogênio é livre de odor e cor, é o mais leve dos gases e por este motivo é rapidamente disperso ou diluído. De acordo com “*Kirk-othmer encyclopedia of chemical technology*” (1995), o gás hidrogênio se inflama facilmente, ao longo de um grande intervalo de concentração, isto é, 4-75% por volume no ar e 4,5-94% em volume de gás oxigênio e propenso a detonação no intervalo de concentração 18-59% em volume de ar e 15-90% por volume de gás oxigênio. A chama do gás hidrogênio é quase invisível e não é facilmente detectada; desta forma, representa um risco significativo.

A evolução de hidrogênio gasoso ocorre quando o hidrogênio no estado de oxidação +1 é reduzido a hidrogênio elementar, segundo a reação:



A produção deste gás em baterias pode ocorrer de diferentes maneiras se as mesmas sofrerem algum tipo de abuso mecânico ou se alguns compostos ou produtos entrarem em contato. Muitas baterias produzem gás de hidrogênio como um subproduto, porém a quantidade de gás é normalmente desprezível em operação normal.

Foram identificados cinco diferentes modos possíveis de produção de gás de hidrogênio (AMON *et al.* 2012):

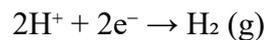
1. Através do ácido sulfúrico e da água;
2. Através da reação entre o ácido sulfúrico e alguns metais;
3. Através do contato entre o lítio metálico e a água;
4. Através do contato de soluções de hidróxido e alguns metais;

5. Em baterias de íon-lítio.

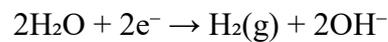
Serão discutidos abaixo todos estes modos de produção do gás hidrogênio.

3.3.1.1 A produção de gás hidrogênio, através do ácido sulfúrico e da água.

A produção do gás de hidrogênio pode ocorrer em uma bateria de duas formas. Através da redução de íons de hidrogênio (H^+), quando o ácido sulfúrico é usado como eletrólito ou através da eletrólise da água nas células da bateria.

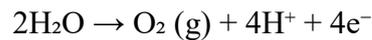


(Em solução ácida)



(Em solução neutra ou básica)

A água H_2O pode ser simultaneamente oxidada e formar o gás oxigênio O_2 (g).



(Em solução básica)

A produção de quantidades significativas de gás hidrogênio e gás oxigênio pode ocorrer durante o carregamento de baterias secundárias que contenham eletrólitos aquosos, como por exemplo em baterias de chumbo-ácido, níquel-metal hidreto e em baterias de níquel-cádmio.

Existem sistemas onde o gás de oxigênio pode ser reduzido novamente à água e ao mesmo tempo evita a formação de gás de hidrogênio durante a carga. No entanto, sobrecarga, deficiências na bateria, ou a ausência de um sistema que permita a recombinação destes gases, pode resultar na sua formação.

As baterias de chumbo-ácido tiveram o desenvolvimento da tecnologia *VRLA* (*Valve Regulated Lead-Acid*), segundo Linden *et al.* (2011) estas baterias trabalham sob o princípio da recombinação do oxigênio. O oxigênio gerado no eletrodo positivo durante a carga poderá se difundir para o eletrodo negativo, onde reagirá, na presença do ácido sulfúrico com o chumbo recém formado.

Para Linden *et al.* (2011) o projeto VRLA reduz a emissão de gases em mais de 95%, dado que a geração de hidrogênio também é suprimido. Porém como foi abordado por

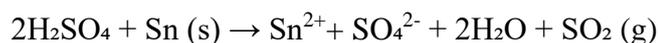
Bullock *et al.* (2011) mesmo durante o funcionamento normal do VRLA, pequenas quantidades de gás de hidrogênio são liberadas das baterias.

3.3.1.2 Produção de gás hidrogênio através da reação entre ácido sulfúrico e alguns metais

O gás hidrogênio (H₂ (g)) também pode ser produzido através da reação entre ácido sulfúrico (H₂SO₄) e diversos metais, tais como o zinco (Zn) ou ferro (Fe). Tomando como exemplo a reação do zinco (Zn), tem-se:



Ácido sulfúrico concentrado e quente (H₂SO₄) também pode produzir o dióxido de enxofre (SO₂) em contato com alguns metais. Usando estanho (Sn) como exemplo, a reação pode ser escrita como:



A produção de gás de hidrogênio e a produção de dióxido de enxofre (SO₂ (g)) pode ocorrer, se as pilhas contendo ácido sulfúrico (H₂SO₄) começarem a vazar ácido, que provavelmente irá entrar em contato com alguns outros metais.

3.3.1.3 Produção de gás hidrogênio através do contato entre o lítio metálico e a água

A produção do gás de hidrogênio também ocorrerá se o lítio metálico (Li) entrar em contacto com a água (H₂O), como apresentado pela reação:

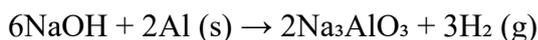


O gás de hidrogênio pode se inflamar facilmente. O metal normalmente não queima espontaneamente com água, a menos que todo o metal tenha reagido. No entanto, o metal de lítio pode inflamar se aquecido.*

3.3.1.4 Produção de gás hidrogênio através do contato de soluções de hidróxido e alguns metais.

A produção de gás hidrogênio também ocorrerá se soluções básicas fortes, soluções de hidróxido, como por exemplo, soluções de hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH), entrar em contato com alguns metais tais como alumínio (Al). Usando o hidróxido de sódio como exemplo, pode-se descrever este fenômeno da seguinte forma:

* *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley & Sons (1995).



Soluções de hidróxido de potássio são usados como eletrólitos em vários tipos de baterias e fugas de tal eletrólito poderia possivelmente resultar na produção de gás de hidrogênio, se o mesmo entrar em contato com alumínio (Al).

Conforme Linden *et al.* (2011) em baterias contendo zinco (Zn) na forma de material de eletrodo e um eletrólito alcalino (por exemplo, pilhas alcalinas e baterias de óxido de prata-zinco), zinco irá oxidar lentamente e produzir gás hidrogênio na bateria, mas a quantidade de gás é normalmente desprezível em operação normal. No entanto, se a bateria está situada num recipiente selado (como compartimentos à prova de água) sem ventilação, o nível de gás de hidrogênio poderá ser tão alto e o gás se inflamar (ENERGIZER HOLDING, INC. 2017).

3.3.1.5 Produção em baterias de íon-lítio

Quando as baterias de íon-lítio respiram após a sua violação, o gás hidrogênio, juntamente com outros gases são liberados.*

É provável que o hidrogênio gasoso é formado nas reações de decomposição do eletrólito (que consiste de um sal de lítio em uma mistura de solventes orgânicos).

3.3.2 Estimativa da quantidade de hidrogênio gasoso que pode ser produzido a partir de uma bateria

A quantidade de hidrogênio gasoso que pode ser produzido a partir de uma bateria em diferentes circunstâncias pode ser estimada utilizando a lei dos gases ideais, em conjugação com algumas outras leis físicas, tais como a lei de Faraday de eletrólise e relações entre a corrente eléctrica, carga e tempo.

3.3.2.1 Estimativa da quantidade de hidrogênio gasoso pode ser produzido a partir de ácido sulfúrico e água

O volume de gás hidrogênio (V_{H_2}) que pode ser produzido a partir de uma certa quantidade de ácido sulfúrico (H_2SO_4) ou água (H_2O) pode ser estimada a partir de (a lei dos gases ideais):

**Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment*, Mikolajczak (2011); *Overcharge reaction of lithium-ion batteries*, Ohsaki, T. (2005).

$$\text{H}_2\text{SO}_4: \quad V_{\text{H}_2} = \frac{R \times T \times m_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{P \times M_{\text{H}_2\text{SO}_4}} \quad (1)$$

$$\text{H}_2\text{O}: \quad V_{\text{H}_2} = \frac{R \times T \times m_{\text{H}_2\text{O}}}{P \times M_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (2)$$

Em que R representa a constante universal dos gases perfeitos (8,3143 J/(mol K)), T é a temperatura absoluta em Kelvin, P é a pressão de gás, $m_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ e $m_{\text{H}_2\text{O}}$ são respectivamente a massa de H_2SO_4 e H_2O e $M_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ e $M_{\text{H}_2\text{O}}$ são respectivamente a massa molar de H_2SO_4 e H_2O . A tabela 10 mostra a massa de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) ou água (H_2O) que é necessária a fim de produzir 1 dm³, 10 dm³, 100 dm³, 1 m³ e 10 m³ gás hidrogênio (H_2 (g)) a 4%, em condições normais de pressão atmosférica e à temperatura ambiente de (20°C).

Tabela 10: Massa de (concentrado) ácido sulfúrico (H_2SO_4) ou água (H_2O) que é necessária para produzir um certo volume de 4% de gás hidrogênio (H_2 (g)) em condições normais de pressão atmosférica e à temperatura ambiente de (20°C).

| Volume produzido de 4% de H_2 (g) | Massa de (concentrado) H_2SO_4 | Massa de H_2O |
|--|--|-------------------------------|
| 1 dm ³ | 0,16 g | 0,030 g |
| 10 dm ³ | 1,6 g | 0,30 g |
| 100 dm ³ | 16 g | 3,0 g |
| 1 m ³ | 0,16 kg | 30 g |
| 10 m ³ | 1,6 kg | 0,30 kg |

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

A composição química das baterias naturalmente difere de fabricantes para fabricante e entre os diversos tipos de baterias. O conteúdo típico de água em baterias comuns é listado na tabela 11 com base nas informações contidas no documento "*Product information primary and rechargeable batteries*" através do *European Portable Battery Association* (2007). As baterias de chumbo-ácido contêm 17% de ácido sulfúrico de acordo com o mesmo

documento, mas não é claro se esta refere-se a ácido sulfúrico concentrado ou com uma solução de ácido água. (AMON *et al.* 2012)

O eletrólito da bateria de chumbo ácido normalmente consiste de 37% em peso de ácido sulfúrico quando totalmente carregada (SALKIND *et al.* 2011).

Tabela 11: Teor de água em algumas baterias.

| Tipo de Bateria | Teor de água |
|-------------------------------------|---------------------|
| Baterias de zinco-carbono | 6 % |
| Baterias de oxido de prata | 2 % |
| Baterias de zinco-ar | 10 % |
| Baterias de níquel-hidreto metálico | 8 % |

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

3.3.2.2 Estimativa da quantidade de gás de hidrogênio que pode ser produzida através da carga elétrica

O volume de gás hidrogênio (H_2 (g)) (V_{H_2}) que pode ser produzido a partir da carga elétrica (Q), quando a água (em excesso) é eletrolisada, pode ser estimado através da combinação da lei dos gases ideais e a lei da eletrólise de Faraday, da seguinte forma:

$$V_{H_2} = \frac{Q \times R \times T}{P \times 2 \times F} \quad (3)$$

em que F é a constante de Faraday (96485,3329 As/mol). A tabela 12 mostra o volume de hidrogênio gasoso puro (H_2 (g)) e o volume de hidrogênio gasoso (H_2 (g)) à 4% que pode ser produzido quando a água (em excesso) é eletrolisada, utilizando diferentes valores de carga em condições normais de pressão atmosférica e a temperatura ambiente de (20°C).

Na literatura, a taxa máxima de formação de hidrogênio por ampere-hora é de 0,42 dm^3 à temperatura ambiente e pressão atmosférica padrão (SALKIND *et al.* 2011). Muitas baterias menores (por exemplo, baterias de telefones celulares e câmeras, ou baterias recarregáveis de tamanho AAA) têm uma capacidade de carga de aproximadamente 600-2000 mAh. Assim, uma bateria poderia produzir aproximadamente 0,3-1 dm^3 de hidrogênio gasoso

puro (H₂ (g)) ou aproximadamente 6-20 dm³ de hidrogênio gasoso à 4% (H₂ (g)) por decomposição de água (AMON *et al.* 2012).

Tabela 12: Volume de hidrogênio gasoso puro (H₂ (g)) e hidrogênio gasoso a 4% (H₂ (g)) que pode ser produzido a partir de diferentes valores de carga em condições normais de pressão atmosférica e à temperatura ambiente de (20°C).

| Carga | Volume H ₂ (g) | Volume 4% H ₂ (g) |
|---------|---------------------------|------------------------------|
| 100 mAh | 0,045 dm ³ | 1,1 dm ³ |
| 1 Ah | 0,45 dm ³ | 11 dm ³ |
| 10 Ah | 4,5 dm ³ | 0,11 m ³ |
| 100 Ah | 45 dm ³ | 1,1 m ³ |
| 1000 Ah | 0,45 m ³ | 11 m ³ |

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

3.3.2.3 Estimativa da quantidade de gás hidrogênio por tempo que pode ser produzido a partir de uma corrente elétrica

O volume de gás hidrogênio (H₂ (g)) por tempo (V_{H₂}/t) que pode ser produzido através de uma corrente elétrica constante (i), quando a água em excesso é eletrolisada, pode ser estimada pela combinação da lei dos gases ideais, a lei da eletrólise de Faraday e a relação entre corrente, carga e tempo, da seguinte forma:

$$\frac{V_{H_2}}{t} = \frac{i \times R \times T}{P \times 2 \times F} \quad (4)$$

A tabela 13 mostra o volume de hidrogênio gasoso puro por tempo que pode ser produzido quando a água em excesso é eletrolisada usando diferentes correntes em condições normais de pressão atmosférica e a temperatura ambiente de (20°C).

Tabela 13: Volume de hidrogênio gasoso puro (H₂(g)) por tempo que pode ser produzido a partir de diferentes intensidades de corrente (i) em condições de pressão atmosférica normal e à temperatura ambiente (20° C).

| Corrente (mA/A) | Volume H ₂ (g) por tempo |
|-----------------|-------------------------------------|
| 1 mA | 1,2 x 10 ⁻⁴ ml/s |
| 10 mA | 1,2 x 10 ⁻³ ml/s |
| 100 mA | 1,2 x 10 ⁻² ml/s |
| 1 A | 1,2 x 10 ⁻¹ ml/s |
| 10 A | 1,2 ml/s |

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

3.3.3 Compostos inflamáveis em baterias de lítio e íon-lítio

Baterias de lítio e íon-lítio contêm solventes orgânicos que são inflamáveis.* Podem conter, por exemplo, carbonato de propileno (ponto de ignição 135° C), carbonato de etileno (ponto de ignição 145° C), carbonato de dimetilo (ponto de ignição 18° C), carbonato de dietila (ponto de ignição 25° C) e carbonato de etil metil (ponto de ignição 25° C) (MIKOLAJCZAK *et al.* 2011).

De acordo com o documento “*Product information primary and rechargeable batteries*” da *European Portable Battery Association* (2007), as baterias de íon-lítio normalmente contêm 1-10% de solventes orgânicos. As baterias de lítio podem conter solventes orgânicos como o acetonitrila (ponto de ignição 5° C), 1,2-dimetoxietano (ponto de inflamação 1° C) e 1,3-dioxolane (ponto de inflamação 2° C) (REDDY *et al.* 2011).

Tem sido demonstrado** que as baterias de íon-lítio quando perfuradas libertam o solvente eletrolítico juntamente com vários outros gases, como o hidrogênio (H₂ (g)), o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄). Assim como o

* *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment*, Mikolajczak, C. *et al.* (2011); *Lithium Primary Batteries*, Reddy T. B. *et al.* (2011).

** *Lithium-ion batteries hazard and use assessment*, Mikolajczak, C. *et al.* (2011); *Overcharge reaction of lithium-ion batteries*, Ohsaki, T., *et al.* (2005).

hidrogênio (H₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), eteno (C₂H₄) e etano (C₂H₆) são liberados quando aquecidas e violadas.

3.3.4 Fuga térmica

A temperatura pode, em algumas baterias, aumentar de forma descontrolada este fenômeno é chamado de "fuga térmica" e pode resultar em uma explosão ou fogo na bateria. Além disso, a fuga térmica pode propagar-se para células adjacentes (AMON *et al.* 2012).

3.3.4.1 Fugas térmicas em baterias de lítio e íon-lítio

Existem muitos relatos sobre baterias de íon-lítio que explodiram ou começaram a queimar mesmo que não tenham sido danificadas ou utilizadas incorretamente, este fato é devido à fuga térmica onde a temperatura aumenta rapidamente como resultado de reações exotérmicas nas baterias. São processos complexos e alguns relatórios abordam este assunto.*

As temperaturas em que as reações exotérmicas em baterias podem iniciar-se, são da ordem de 150-170°C (ANDERSSON, 2011), 90°C (LISBONA *et al.* 2011), aproximadamente 150°C (cátodo de cobalto) ou 250°C (cátodo de manganês)** (BUCHMANN, 2010), 130-150°C (BALAKRISHNAN *et al.* 2006), 70-90°C (MIKOLAJCZAK *et al.* 2011) e 130-150°C (WANG *et al.* 2012).

Tais temperaturas podem ser alcançadas através da sobrecarga, abuso mecânico, abuso térmico, curto-circuito e falhas internas das células.

Quando as baterias de lítio-íon são embaladas juntas, a fuga térmica em uma célula de bateria pode induzir a fuga térmica em uma célula vizinha devido à transferência de calor. A propagação deste fenômeno em uma bateria também pode resultar em re-ignição de um fogo extinto. A bateria pode também permanecer em estado aparentemente "normal" após longo período depois do abuso mecânico e causar um incêndio numa fase posterior (MIKOLAJCZAK *et al.* 2011).

* *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment*, Mikolajczak, C. *et al.* (2011); *A Review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries*, Lisbona, D. *et al.* (2011); *Safety mechanisms in lithium-ion batteries*, Balakrishnan, P. G *et al.* (2006); *Brandfara i bärbara datorer*, Andersson, O. (2011); *Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery*, Wang, Q. *et al.* (2012).

** *Lithium-ion Safety Concerns*, Buchmann, I. (2010).

De acordo com o relatório sueco da *Lund University* “*Brandfara i bärbara datorer*” de Andersson (2011), muitos acidentes com baterias de íon-lítio em computadores têm em comum que os computadores foram colocados de modo que a ventilação tenha sido restringida e/ou tenham ocorrido durante o carregamento das baterias.

Através dos estudos de Mikolajczak *et al.* (2011) verificou-se que a maior parte das reações térmicas de fuga em aparelhos celulares ocorrem durante ou logo após o carregamento, isto é, quando a bateria está completamente carregada. Sabe-se que a fuga térmica depende do estado de carga (isto é, a fuga térmica começa a temperaturas mais baixas quando a bateria está completamente carregada).

De acordo com Buchmann (2010) e Buchmann (2011)* também descobriu-se que a fuga térmica é resultado da presença de partículas metálicas microscópicas que podem resultar em curto-circuito nas baterias. Os fabricantes foram forçados a recolher grandes quantidades de baterias de íon-lítio ou computadores contendo baterias de íon-lítio. Essas baterias podem naturalmente estar presentes em equipamentos eletrônicos antigos.

Para evitar as fugas térmicas, as baterias de íon-lítio podem conter vários dispositivos de segurança diferentes, tais como dispositivos de interrupção de carga e comutadores de coeficiente de temperatura positiva.**

A fuga térmica também pode ocorrer em baterias de lítio à temperatura de aproximadamente 150 °C (LISBONA *et al.* 2011).

3.3.4.2 Fugas térmicas em baterias que não contenham lítio

A fuga térmica também pode ocorrer em baterias de chumbo-ácido, baterias de níquel-cádmio, baterias de hidreto de níquel-ferro e em baterias de ferro-níquel, principalmente durante o carregamento (LINDEN’S *et al.* 2011).

* *Lithium-Ion Safety Concerns*, Buchmann, I. (2010); *Safety concerns with Li-ion*, Buchmann, I. (2011).

** *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment*, Mikolajczak, C. *et al.* (2011); *Safety mechanisms in lithium-ion batteries*, Balakrishnan, P. G *et al.* (2006); *Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery*, Wang, Q. *et al.* (2012).

3.3.5 Riscos de Incêndio Elétricos

3.3.5.1 Capacidade de armazenamento de energia em uma bateria

As baterias modernas têm a capacidade de armazenar muito mais energia do que antigamente, causando um impacto direto sobre o aumento dos riscos de incêndio. Para ilustrar esta situação Amon *et al.* (2012) faz uma comparação entre uma bateria alcalina "Sony Stamina Plus" e uma bateria de íon-lítio "balanço Boston Power", mostradas na Figura 5.

O tamanho destas baterias é quase o mesmo. A célula da bateria alcalina é de 1,5 V enquanto a bateria de íon-lítio é de 3,7 V. A capacidade da bateria alcalina é de 2,5 Ampère-hora (Ah) contra 4,4 Ah da bateria de íon-lítio. A bateria alcalina totalmente carregada contém 13500 Joules de energia enquanto a bateria de íon-lítio totalmente carregada contém 58608 Joules, ou seja, a capacidade de armazenar energia é cerca de quatro vezes maior na bateria de íon-lítio que na pilha alcalina.



Figura 5: A esquerda “Sony Stamina Plus” bateria alcalina e a direita “Boston Power Swing” bateria de íon-lítio.

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

No setor automotivo, é extremamente importante haver baterias que são capazes de armazenar uma grande quantidade de energia. Neste setor as baterias de íon-lítio foram desenvolvidas para serem tão eficazes quanto possível, um bom exemplo são as baterias "pouch cell" (em formato de bolsa) mostradas na Figura 6.



Figura 6: Dois exemplos de pilhas íon-lítio “pouch cell”.
 Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

Este tipo de célula de bateria tem uma capacidade típica entre 20-40 Ah. Uma bateria “pouch cell” de 40 Ah e 3,6 V contém 518400 Joules de energia. Esta é uma energia cerca de 38 vezes maior que na bateria alcalina utilizada na comparação anterior.

Baterias que operam ferramentas manuais também passaram por uma fase de desenvolvimento impressionante em relação à capacidade de armazenar mais energia. Um pacote de bateria para uma bateria normal operando uma parafusadeira pode ter uma tensão de 18 V e uma capacidade de 3 Ah. Neste caso, a bateria totalmente carregada contém 194400 Joules de energia.

3.3.5.2 Sistema de Proteção e Segurança em baterias

Há muitos tipos diferentes de sistemas de proteção e segurança para baterias. Eles podem ou não ser construídos internamente e/ou em seus carregadores e podem também se apresentarem através de técnicas de controle, tais como, os Sistemas de Gerenciamento de Bateria (SMB) para evitar sobrecarga, polaridade invertida ou curto circuito. O risco de incêndio depende muito do tipo e eficácia do sistema de proteção utilizado. Por exemplo, em testes de curto-circuito de baterias alcalinas de 9 volts os resultados dependem da marca e modelo da bateria, apesar das baterias serem aparentemente idênticas.

De acordo com Amon *et al.* (2012) muitos dos dispositivos de controle são colocados do lado de fora da bateria, para que tanto a corrente quanto a tensão possam ser sentidas no carregador.

De acordo com o manual *Linden's handbook of batteries* de Linden, D *et al.* (2011), em algumas baterias os dispositivos térmicos são usados para cortar ou reduzir a corrente, são eles:

- Termostato (*Temperature Cut off TCO*): este dispositivo funciona com uma fixa temperatura e é usada para cortar a carga (ou descarga) quando uma temperatura interna pré-estabelecida da bateria é alcançada. TCOs são geralmente reajustáveis. Eles são ligados em série, dentro da pilha.
- Fusível térmico: este dispositivo é ligado em série com o conjunto de células e abrirá o circuito quando uma temperatura pré-determinada é atingida. Fusíveis térmicos estão incluídos como uma proteção contra a fuga térmica e são normalmente configurados para operar a cerca de 30-500 °C acima da temperatura máxima de operação da bateria.
- *Positive Temperature Coefficient (PTC)*: este é um dispositivo reajustável, ligado em série com as células, cuja resistência aumenta rapidamente quando uma temperatura pré-estabelecida é atingida, reduzindo assim a corrente na bateria para uma corrente de nível mais baixo e aceitável.
- Circuit Interrupt Device (CID): algumas células também incorporam um CID que interrompe a corrente, se a pressão interna do gás na célula excede limites específicos.

Além disso, algumas baterias são providas com respiradouros de segurança. Se uma célula superaquecer e a pressão interna se elevar o respiradouro de segurança se abrirá.

3.3.5.3 Curto Circuito

Um curto-circuito pode surgir se houver uma conexão de baixa resistência entre os eletrodos positivos e negativos. Segundo a lei Ohm $I = V/R$, onde a corrente é dada em Ampères, a tensão é dada em Volts e a resistência é dada em Ohm, a corrente irá aumentar proporcionalmente com o decréscimo da resistência.

Iniciado um curto-circuito através da queda da resistência externa da célula, este irá desencadear um elevado fluxo de corrente diretamente ligado à resistência interna da bateria. Em pouco tempo a bateria estará totalmente descarregada e aquecida através do efeito joule.

Segundo Amon *et al.* (2012) se assumirmos que uma bateria é perfeita, sem resistência interna (0Ω), então, de acordo com a Lei de Ohm, essa bateria seria capaz de fornecer uma quantidade infinita de corrente. Na realidade, não há baterias perfeitas e elas sempre terão

alguma resistência interna reduzindo a capacidade de fornecer corrente. A resistência interna será diferente dependendo da química da célula e do tipo de sistemas de proteção que são empregados na bateria.

3.3.5.3.1 Curto-Circuito Externo

O curto-circuito externo será provocado quando os dois polos da bateria forem unidos de forma que entre eles existam uma baixa resistência, inúmeras situações de manuseio fornecem condições para o curto-circuito externo, como exemplo temos casos de ferramentas metálicas em contato com os dois polos de uma bateria, nesta situação uma corrente muito alta irá fluir através da chave de fenda a partir do polo positivo para o polo negativo da bateria.

Na visão de Amon *et al.* (2012) é evidente que o risco de curto-circuito externo de uma bateria é muito mais elevado numa unidade de recuperação onde um grande número de baterias usadas são armazenadas juntas do que associados com uma utilização normal. A probabilidade de um curto-circuito externo é também aumentada quando as baterias são colocadas em caixotes metálicos e containers e os polos das baterias não são providos de fitas isolantes ou de outras medidas de proteção.

O teste de curto-circuito pode simular um cenário real quando uma bateria é jogada em um container metálico e um curto-circuito ocorrer entre seus polos através do metal do container. Também pode simular um curto-circuito entre os polos através do metal de outro revestimento de bateria.

Será apresentado abaixo o teste de curto-circuito realizado pela *Science Partner – SP*. Na tabela 14 é apresentada a corrente durante o segundo inicial no ensaio de curto-circuito de uma célula de bateria de íon-lítio. Como pode ser visto, a corrente inicial é da ordem de 3000 A. Durante este curto-circuito, a temperatura na célula da bateria irá aumentar e o aquecimento interno poderá fazer com que a célula exceda os limites de estabilidade térmica (MIKOLAJCZAK *et al.* 2011).

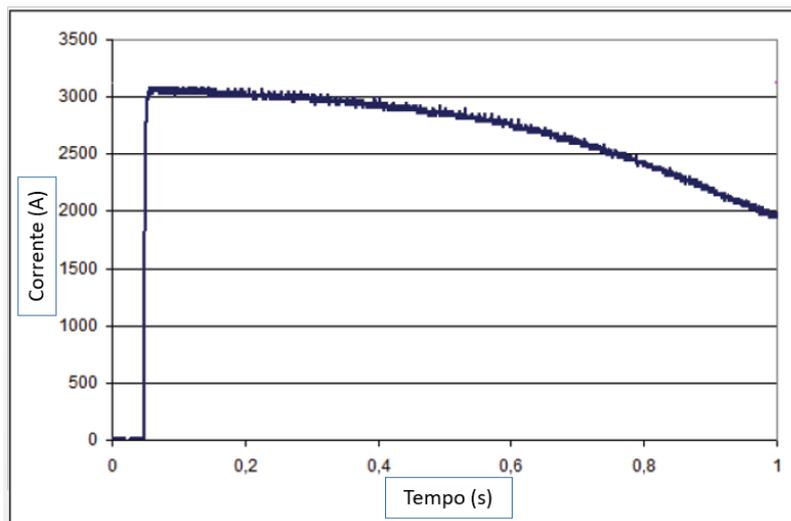


Tabela 14: Primeiro segundo de um teste de curto-circuito realizado uma célula de bateria de lítio-íon.

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

A consequência do curto-circuito é mostrada na Figura 7. Este teste de curto-circuito foi realizado em uma célula “pouch cell” de íon-lítio. A espessura normal da célula é de aproximadamente 8 mm. Durante o ensaio, começou a haver acúmulo de gás no interior da célula da bateria e depois de alguns minutos a célula se rompeu e respirou. (AMON *et al.* 2012).



Figura 7: Ruptura de uma bateria de íon-lítio “pouch cell”.

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

As altas temperaturas devido ao curto-circuito nestas baterias podem criar três cenários de risco distintos: a) podem causar um incêndio em outros materiais em sua proximidade; b) incendiar-se; c) baterias de lítio expõe o lítio que poderá reagir com a água e causar um incêndio.

As baterias de chumbo ácido de 12V quando em curto-circuito podem criar uma corrente muito elevada causando um risco de que possa ocorrer um arco elétrico. Baterias de chumbo ácido podem fornecer corrente superior a 1000 A, durante um curto-circuito.

Uma discussão sobre os perigos da bateria de chumbo ácido é encontrada em “*Lead-acid battery hazards*”, descritos a seguir:

Se uma célula de bateria de chumbo ácido for exposta ao curto-circuito externo, uma reação química muito rápida entre seus terminais ocorrerá. O ácido sulfúrico converterá o chumbo e o dióxido de chumbo em sulfato de chumbo. Neste momento a energia elétrica não é dissipada externamente, mas internamente na forma de calor. O aumento da temperatura resultante no interior da célula de bateria destruirá literalmente a célula e, na verdade, poderá vaporizar os materiais da bateria, incluindo o eletrólito e o chumbo (TAYLOR, 2006).

Friedrich *et al.* (2008) apresenta um caso de uma pilha alcalina Duracell 9 Volts PP3 que estava em curto-circuito com um fio, que resultou numa corrente de 4,2 ampères medido através deste fio. Neste caso, esta corrente foi suficiente para fazer o fio brilhar por aquecimento.

Os autores também informaram sobre alguns incidentes com baterias que haviam sido expostas a testes de curto-circuito. Uma bateria foi testada em curto-circuito por uma semana e meia; logo após foi colocada sobre uma mesa. A célula se rompeu após uma semana em repouso sobre a mesa de forma explosiva sem qualquer contato elétrico, mecânico ou de qualquer outra forma.

3.3.5.3.2 Curto Circuito Interno

Como já foi mencionado o carregamento de baterias de íon-lítio pode resultar na formação de dendritas metálicas de lítio que podem causar curto-circuito interno. A presença de partículas metálicas microscópicas em baterias de íon-lítio também poderá resultar em curto-circuito e conseqüentemente em uma fuga térmica.

Um curto-circuito interno também pode ocorrer se a bateria for exposta à abusos mecânicos ou então se uma bateria estiver exposta ao esmagamento ou outros danos, Amon *et*

al. (2012) afirma que é muito provável que os sistemas de proteção não funcionem adequadamente caso venha a ocorrer um curto-circuito interno e/ou externo.

3.3.5.4 Sobrecarga

As baterias de íon-lítio têm uma ampla gama de trabalho específico em relação à tensão. Uma descarga abaixo de seu ponto de corte de tensão determinado causará danos aos eletrodos e coletores de corrente e poderá ocorrer a fuga térmica quando a célula da bateria é recarregada.

Forçar uma bateria na polaridade invertida também é um risco possível. Pode ocorrer no processo de reciclagem se a bateria for jogada em uma lata de lixo ou um container sem fita isolante ou sem outras medidas de proteção de seus polos. Os polos de uma bateria poderiam, então, entrar em contato com os polos de outra bateria. Neste caso, a bateria com o mais alto estado de carga vai começar a recarregar a bateria com menor estado de carga.

Este cenário poderia ocasionar a polaridade invertida e conseqüentemente a fuga térmica. O risco deste processo dependerá do sistema de proteção construído a na capacidade da célula de criar a fuga térmica. Esta situação poderia ser possível em baterias de níquel-cádmio, baterias de níquel-metal hidreto, e as baterias de ferro-níquel.

3.3.6 Reação do Lítio Metálico

Conforme descrito na seção 2.3.1 o lítio metálico reage com a água formando gás hidrogênio, o lítio metálico também pode inflamar-se quando aquecido.*

3.3.7 Reação do Ácido Sulfúrico

Se o ácido sulfúrico (H_2SO_4) vazar de uma bateria, pode reagir com muitos metais como já foi mencionado na seção 2.3.1 e produzir gás hidrogênio (H_2 (g)), também o dióxido de enxofre (SO_2) em alguns casos. O gás hidrogênio em contato com o gás oxigênio (O_2 (g)), ou o ar, pode então se inflamar.

O ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) também reage vigorosamente com muitos compostos orgânicos e gera uma grande quantidade de calor quando misturado com alguns materiais, tais como água ou materiais orgânicos.

**Flammability assessment of bulk-packed*, Webster, H. (2004); *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* John Wiley & Sons (1995).

3.3.8 Riscos de Incêndio Devido ao Contato com a Água

Na cadeia de reciclagem alguns riscos ocorrem devido ao ambiente que estão expostas as baterias. Elas são em grande parte armazenadas ao ar livre, em containers, em barris sem tampas ou em barris com tampas danificadas e com vazamentos (AMON *et al.* 2012). Desta forma elas são armazenadas junto a água.

A *Science Partner – SP* realizou também alguns experimentos para avaliar o fluxo de corrente em diferentes tipos de água, ou seja, de água ionizada, água da torneira e água do mar (36g NaCl/kg H₂O). O objetivo era determinar o que aconteceria se uma bateria com a tensão terminal de 12V fosse imersa em água e a distância entre os dois polos fosse de 10 centímetros. A resistência entre os dois polos dependerá da condutividade dos diferentes tipos de água. A Tabela 15 mostra os resultados desses testes.

Tabela 15: Imersão de uma bateria 12V em diferentes tipos de água.

| Tipo de água | Voltagem (V) | Resistência (Ω) | Corrente (A) |
|--|--------------|--------------------------|----------------------|
| Água deionizada | 12 | $5,9 \times 10^4$ | $2,0 \times 10^{-4}$ |
| Água de torneira | 12 | $4,0 \times 10^3$ | $3,0 \times 10^{-3}$ |
| Água do mar (36g NaCl/kg H ₂ O) | 12 | 12 | 1,0 |

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

Segundo observações de Amon *et al.* (2012) os resultados destes testes mostram que as correntes não são muito elevadas. Mesmo se a bateria for imersa na água do mar é muito improvável que ela iria causar um incêndio devido a um curto-circuito. Mais provável seria o risco das baterias que estão fisicamente/mecanicamente danificadas reagirem quimicamente. Outro risco seria o aumento da propagação dos líquidos que vazam de baterias que em conjunto com a água promovem a corrosão em outras baterias aumentando assim ainda mais os vazamentos.

O risco possível das baterias armazenadas em containers cheios de água seria a produção de gás hidrogênio durante a eletrólise da água. Se a bateria estiver imersa em água ela vai começar a criar hidrogênio no polo negativo e gás oxigênio no polo positivo. Assumindo que a água da torneira é semelhante à chuva, haverá uma corrente de cerca de 3

mA em uma bateria de 12 V. Isso resultaria em $3,6 \times 10^{-4}$ ml/s de hidrogênio. É um pouco mais do que 1ml de hidrogênio por hora. É uma produção muito baixa, porém se houver bolhas de ar dentro do container existe a possibilidade de sua acumulação e explosão se uma faísca ocorrer no interior do recipiente.

3.3.9 Exposição a Temperaturas Extremas

Como discutido em seções anteriores, as baterias de íon-lítio e lítio podem sofrer fuga térmica a temperaturas relativamente elevadas. A temperatura de início varia na literatura (de 70 a 250 °C), e também é diferente entre cada tipo de bateria. A baixas temperaturas, baterias contendo eletrólitos aquosos podem, possivelmente, congelar e isto pode, em alguns casos resultar em ruptura de células, devido à expansão do eletrólito. Se, em seguida, a temperatura se eleva acima do ponto de congelamento, eletrólito irá vazar da bateria. No dizer de Amon *et al.* (2012) não está claro se este é um problema significativo.

A temperatura de congelamento de cada bateria varia de acordo com o material de eletrólito e de sua estrutura física. Em baterias de chumbo-ácido, o teor de ácido sulfúrico no eletrólito pode variar durante a carga e descarga. O eletrólito irá conter muito mais ácido sulfúrico quando carregando e o seu ponto de congelamento será muito menor quando comparado a uma bateria de chumbo-ácido descarregada (onde o eletrólito tem uma temperatura de congelamento próximo da água pura (0 °C)). Desta forma, é difícil de se obter uma temperatura de congelamento generalizada de eletrólitos, porém os eletrólitos aquosos têm, tipicamente, temperaturas de congelamento abaixo da temperatura de congelamento da água pura (0 °C). Na literatura, a temperatura de armazenagem recomendada para a maioria das baterias, em geral, é de 15 °C com a temperatura extrema admissível de -40 °C a 50 °C (BUCHMANN, 2007).

No entanto, as temperaturas inferiores a -40 °C irão provavelmente resultar em congelamento de muitos eletrólitos aquosos.

3.3.10 Ativação Acidental de Pilhas de Reserva

Se as baterias de reserva são ativadas de forma não intencional, uma bateria totalmente carregada é obtida sem querer. Um exemplo disso é a exposição não intencional de uma bateria reserva com a água. O manuseio inadequado de tal bateria poderia representar um risco de incêndio da mesma forma que a manipulação indevida de qualquer bateria carregada Amon *et al.* (2012).

4 INCÊNDIOS EM INSTALAÇÕES DE RECICLAGEM

A *Science Partner* – SP através do manual “*Fire risks associated with batteries*” listou algumas informações obtidas com base em pesquisas de internet, dados da literatura e informações da STENA e Elkretsen.

Como citado pelos autores há relatos de incêndios em laptops e telefones celulares, mas não são relevantes ao estudo e não estão incluídos.

4.1 Incêndios internacionais

O Serviço de Resgate sueco *Sirenen* relatou três incidentes em sua publicação nº 7, em 2003:

- Uma caixa de recolher papel se incendiou, a caixa era equipada com um sensor para reconhecer quando ela estava cheia e este por sua vez era acionado por duas baterias de lítio. Durante a extinção do incêndio no recipiente a água entrou no sensor através de uma abertura de segurança e a bateria explodiu sendo ejetada como um projétil. Concluiu-se que a água do extintor reagiu com o lítio e causou uma violenta reação;
- Um funcionário de um escritório observou fumaça saindo do triturador de papel logo após soarem os alarmes de fumaça. Quando o fogo foi extinto, pequenos pedaços de uma bateria de 9 volts foram encontrados no triturador, que provavelmente tinha sido colocada lá por engano;
- Um homem tinha trocado as pilhas do controle remoto da TV. As baterias eram do tipo de botão. As baterias foram colocadas em uma caixa em um armário juntamente com outras baterias. Mais tarde um estrondo foi ouvido e um incêndio começou. O fogo se extinguiu rapidamente. É possível que essa bateria tenha causado curto-circuito em uma outra bateria de 9 V.

Vários outros incidentes foram relatados:*

- O alarme de incêndio e o sistema de aspersão foi ativado em um prédio de escritórios bastante novo. Quando o corpo de bombeiros chegou ao local o próprio sistema de

* Erlandsson, U., *Gamla batterier em brandfara*. Sirenen, publicação nº 1, 2007; Erlandsson, U., *Fjärrkontroll brann..* Sirenen, publicação nº 5, 2007; Erlandsson, U., *Mobiltelefonen började brinna*. Sirenen, publicação nº 1, 2007.

aspersão já tinha extinguido o fogo que começou em um cesto de de plástico utilizado para armazenar baterias usadas.

- Cinco incêndios em controle remoto foram notificados, três em 2001, um em 2002 e um em 2007.
- Um telefone celular colocado em cima de uma cama começou a pegar fogo. De acordo com o usuário, o telefone estava desligado e não estava sendo carregado.
- Em 2010 um incêndio começou em um escaninho através de baterias de lítio primárias. A data das baterias havia expirado e, assim, foram removidas de suas embalagens e colocadas, provavelmente carregadas, em uma caixa não utilizada. Um barulho foi ouvido da caixa depois de um tempo e ela começou a se aquecer. A caixa foi deslocada para arrefecer em um pátio, porém foi colocada ao lado de uma parede. A lixeira acendeu e danificou a parede próxima. O pessoal notou o fogo e tentou extingui-lo sem sucesso. A caixa foi transferida para o pátio e o serviço de resgate foi chamado.

Foram levantados alguns dados através de pesquisas na internet e de contatos diretos com algumas fontes nos EUA. Este levantamento foi realizado pela *Science Partner* e será descrita abaixo.

4.2 Incêndios em Instalações de Reciclagem de Baterias

Incidentes de incêndio em instalações de reciclagem de baterias nos EUA, Canadá e Reino Unido foram relatados nos últimos 15-20 anos. Pode ser difícil determinar a causa destes incêndios.

Os principais incêndios relatados em instalações de reciclagem de baterias estão listados na Tabela 16, juntamente com informações relevantes sobre sua causa. A causa dos cinco primeiros incêndios na fábrica de reciclagem de baterias da Trail, no Canadá, não foi relatada.

4.3 Outros Incêndios Causados Por Baterias

Há uma quantidade significativa de informações anedóticas na internet sobre a ignição de baterias durante o carregamento em aparelhos de consumo (computadores, telefones, secadores de cabelo, ferramentas elétricas, etc.), mas estes casos não foram incluídos nos estudos da *Science Partner – SP*.

Tabela 16: Incêndios em instalações de reciclagem.

| Ano | Localização | Tipo de bateria | Causa |
|------|------------------|-----------------|--|
| 1995 | Trail, Canadá | Misturado | - |
| 2000 | Trail, Canadá | Misturado | - |
| 2000 | Trail, Canadá | Misturado | - |
| 2000 | Trail, Canadá | Misturado | - |
| 2002 | Clarence, NY | Lítio | Armazenamento em tambores de 200 litros, umidade? |
| 2007 | Thorold, Canadá | Lítio | Armazenamento em containers, umidade? |
| 2008 | Trail, Canadá | Misturado | - |
| 2009 | Trail, Canadá | Lítio | Armazenamento em montes de terra. |
| 2011 | Brasingstoke, UK | - | - |
| 2011 | Cartersville, GA | - | Baterias em recipientes enviados para instalações. |

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

Existe pouca informação disponível sobre incêndios iniciados em baterias em outras situações. Uma exceção é o trabalho que tem sido feito sobre incêndios em baterias durante o transporte aéreo. A Força Aérea Americana recolheu um número significativo de incidentes, não só nos EUA, que ocorreram durante o transporte aéreo ou em conjunto com o transporte aéreo (por exemplo, carga e descarga, armazenamento enquanto aguarda o transporte) (*U.S. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION*, 2012).

Em um relatório da Força Aérea Americana publicado em 2012 um total de 132 incidentes são relatados, alguns dos quais são significativos. A proporção desses incidentes ocorridos em aviões de carga ou aviões de passageiros é mostrada na Figura 8. Os diferentes tipos de baterias envolvidas nestes incidentes e sua proporção é mostrada na Figura 9.

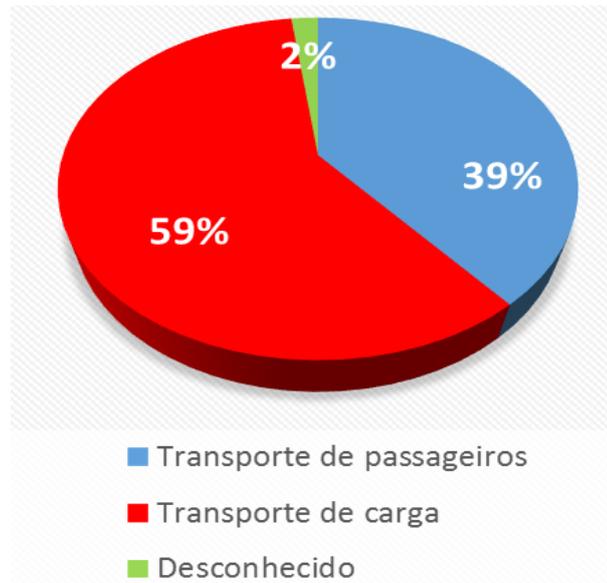


Figura 8: Proporção de incidentes em aviões de carga ou passageiros.
Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

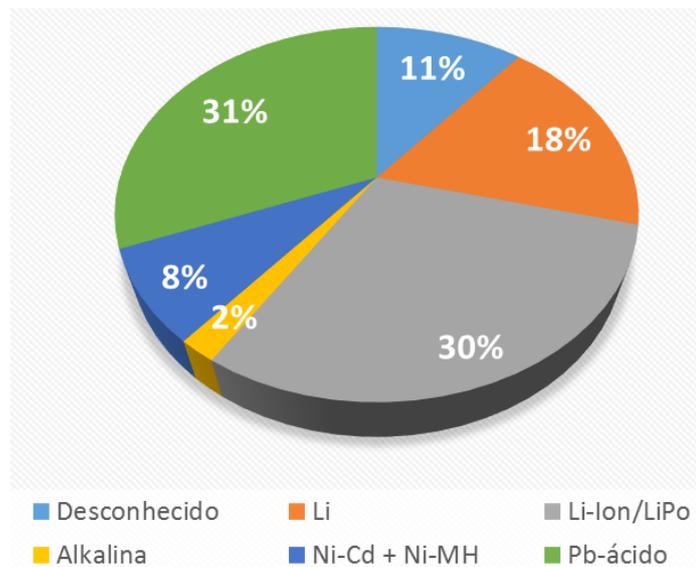


Figura 9: Tipos de baterias envolvidas nestes incidentes.
Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

Como pode ser visto, a maioria dos incidentes ocorreu em aviões de carga causados principalmente por baterias recarregáveis (baterias de chumbo-ácido, e baterias de íon-lítio/polímero de lítio). As baterias de lítio (primária e secundária) estiveram envolvidas em quase 50% de todos os casos.

Amon *et al.* (2012) afirma que aproximadamente 50% dos casos tiveram menores proporções, envolvendo apenas fumaça. Em aproximadamente 25% dos casos algumas

queimaduras ou derretimentos também foram vistos, enquanto no restante dos casos chamadas foram vistas. Em alguns episódios específicos se tentou a extinção das chamadas, mas sem êxito e um grande fogo foi gerado.

A Tabela 17 contém uma seleção dos principais incidentes. A maioria dos incêndios foram causados por curto-circuito dos terminais da bateria, muitas vezes devido a embalagens inadequadas. Em alguns eventos, o incêndio foi causado por danos infligidos à embalagem contendo a bateria.

Tabela 17: Resumo de alguns dos principais incidentes na aviação.

| Data/Origem | Tipo de bateria | Avião | Resumo dos incidentes |
|------------------------------------|------------------------|--------------|---|
| 07/set/2008 UK CAA report | Chumbo ácido | Passageiro | A cadeira de rodas alimentada por baterias explodiu quando estava sendo descarregada, causa desconhecida. |
| 14/fev/2008 US TSA report | Desconhecido | Passageiro | Incêndio no compartimento de bagagens superior interno do avião causado pela bateria de uma lanterna. |
| 27/dez/2007 UPS incident report | Alcalina | Carga | O pacote entrou em combustão espontânea em uma correia transportadora em uma unidade de classificação de pacotes UPS, causa desconhecida. |

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

Tabela 17 (continuação): Resumo de alguns dos principais incidentes na aviação.

| Data/Origem | Tipo de bateria | Avião | Resumo dos incidentes |
|--|------------------------|--------------|---|
| 11/dez/2007 UPS incident report | Íon-lítio/LiPo | Carga | Ao se realizar uma inspeção aduaneira em um pacote com uma faca de corte foi danificada uma bateria que em seguida entrou em combustão. |
| 05/jun/2007 DOT report #2007070001 | Íon-lítio/LiPo | Passageiro | Um computador portátil explodiu. Houve dificuldade em se extinguir o fogo que foi realizado com o auxílio de um extintor de mão. |
| 22/mar/2007 FAA report | Desconhecido | Carga | Um pacote pegou fogo em instalações da FedEx causado devido a um defeito de fabricação do produto. |
| 01/mar/2007 Australian CASA report | Íon-lítio/LiPo | Passageiro | O pacote do correio dos Estados Unidos (EBay) foi transportado em um voo de passageiros e pegou fogo no ponto de acesso ao correio de Sydney. |
| 17/jul/2006 FedEx report | Íon-lítio/LiPo | Carga | O pacote pegou fogo durante o desembarque na alfandega. |
| 15/jul/2006 | Chumbo ácido | Carga | O pacote pegou fogo quando estava sendo descarregado, foi notado que os terminais da bateria estavam desprotegidos. |

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

Tabela 17 (continuação): Resumo de alguns dos principais incidentes na aviação.

| Data/Origem | Tipo de bateria | Avião | Resumo dos incidentes |
|---------------------------------|------------------------|--------------|---|
| 02/jun/2006 China CAA report | Íon-lítio/LiPo | Passageiro | Incêndio no porão de carga de um avião de passageiros, extintores foram usados. A causa foi relacionada a um pacote contendo baterias de LiPo e um possível curto-circuito com teto de carga onde as marcas de fogo foram vistos. |
| 15/mai/2006 | Íon-lítio/LiPo | Passageiro | A bateria extra de um computador portátil pegou fogo. |
| 04/out/2005 UK CAA report | Desconhecido | Passageiro | O pacote pegou fogo em um voo doméstico devido a ativação de uma furadeira portátil “power drill”. |
| 14/set/2005 FAA report | Chumbo ácido | Carga | O pacote pegou fogo após cair durante o seu carregamento. |
| 14/set/2004 FAA report | Chumbo ácido | Carga | Uma bateria pegou fogo quando os terminais da bateria entraram em contato com uma fita metálica devido estar em uma embalagem fraca. |
| 4/set/2004 FAA report | Lítio | Passageiro | A bateria de uma lanterna pegou fogo devido a uma instalação defeituosa. |

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

Tabela 17 (continuação): Resumo de alguns dos principais incidentes na aviação.

| Data/Origem | Tipo de bateria | Avião | Resumo dos incidentes |
|---|-----------------|------------|--|
| 21/jul/2000 | Lítio | Passageiro | Pequenas baterias de brinquedos pegaram fogo na bagagem após um frasco de água de colônia quebrar causando um curto-circuito. |
| 24/ago/1999 Taiwan aviation report #ASC-AAR- 00-11-001 | Chumbo ácido | Passageiro | Incêndio devido à bateria de uma motocicleta. O passageiro tinha em sua bagagem de mão bateria e gasolina. |
| 4/jun/1999 FAA messages | Lítio | Carga | Incêndio durante a descarga devido a um curto-circuito em baterias embaladas com uma haste de aço |
| 28/abr/1999 | Lítio | Passageiro | 120 000 baterias de lítio foram transportadas em dois pallets. Um pallet caiu durante a descarregamento levando a um incêndio. |

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

4.1 Incêndios Originário de Lixo

Em locais de armazenamento de grandes quantidades de baterias, os incêndios são em muitos casos difíceis de extinguir e produzem uma quantidade significativa de fumos tóxicos. Como foi afirmado por Amon *et al.* (2012) em alguns casos, o monte de resíduos deve ser escavado para que o fogo seja extinto.

Na Suécia ocorreu um incêndio na unidade de reciclagem STENA, em Malmö no ano de 2009. O incêndio começou em um colchão, mas se espalhou para os resíduos eletrônicos. O fogo começou às 8h45 e foi extinto às 18h15. 50 pessoas participaram na extinção.

No Japão, um incêndio começou em um aterro em fevereiro de 2004 e queimou por 13 meses (SHIMIZU *et al.* 2009). O Japão usa aterros extensivamente com o intuito de minimizar as emissões de dioxinas oriundas de incineração das baterias.

O auto aquecimento é uma das principais causas de incêndio unidades de armazenamento de pilhas. A causa principal é a exposição das baterias a algum tipo de calor, podendo ser o calor de atrito ou de fricção gerado pelo contato do material colocado no monte, ou o calor gerado por algum processo biológico de secagem, ou químico. Dependendo do tamanho do monte este calor é acumulado e outros processos podem se iniciar produzindo ainda mais calor, até que finalmente a pilha acende através da autoignição.

Não são encontrados facilmente dados sobre o auto aquecimento e ignição de resíduos eletroeletrônicos, conforme indicado por Amon *et al.* (2012) alguns estudos foram conduzidos sobre os combustíveis derivados de reciclagem – RED, principalmente no Japão, Shimizu *et al.* (2009) relata sobre temperaturas de início de auto aquecimento para Combustíveis Derivados de Reciclagem RFD e sobre pós de trituradora de carros “*car shredder dust*” (SD). No entanto, os resultados relatados são difíceis de transpor em dados úteis para uma instalação de reciclagem e armazenamento de material de reciclagem.

Também são encontrados alguns estudos de auto aquecimento de material biológico, como os pallets de madeira. Segundo estes estudos o material biológico tem problemas específicos de auto aquecimento, com a absorção de umidade bactérias e processos de fermentação produzem calor e podem elevar temperaturas até 75 ° C.

Os plásticos bastante presentes nestes dispositivos podem ser facilmente inflamados e a sua chama se espalha rapidamente nestes materiais. Alguns ensaios em resíduos eletroeletrônicos foram conduzidos por Lönnemark A.; Blomqvist P. (2005).

Os requisitos de desempenho relacionados a ignição em equipamentos informáticos e televisores são baixos na Europa, com apenas um requisito HB para o invólucro (SIMONSON *et al.* 2004). Isso significa que o material externo em grande parte do lixo eletrônico é fácil de acender e pode-se esperar um rápido crescimento do fogo, se iniciado um incêndio.

5 CORRENTE DE RECICLAGEM

Os processos de reciclagem diferem de país para país. A *Science Partner* apresenta uma breve descrição do processo na Suécia. As pilhas são recolhidas sozinhas ou através de triagens em unidades de recolha de equipamentos eletroeletrônicos.

5.1 Coleta de Bateria

Na Suécia, as caixas de recolhimento de baterias são colocadas em conjunto com outros containers de recolhimento de lixo, nas proximidades das áreas comerciais, de modo a tornar mais fácil a reciclagem. Em algumas cidades, também estão disponíveis em shoppings "tubos de bateria", como mostrado na figura 10. Também há locais onde a coleta é organizada pelo proprietário de prédios de apartamentos.

As pequenas caixas/silos são colocadas ao ar livre ou em galpões especialmente construídos para este fim, são feitas de metal ou plástico, enquanto os tubos de bateria de uso residencial são feitos de plástico. Quantas vezes estas caixas ou tubos são esvaziados varia consideravelmente dependendo do número de pessoas que os usam e a organização em torno dele. Em alguns casos, eles são esvaziados quando cheios, em outros casos eles são esvaziados quando outros recipientes de reciclagem são esvaziados.

Há também caixas maiores disponíveis em estações de reciclagem na Suécia (geralmente há uma ou duas dessas estações em uma cidade). Tal caixa é mostrada na Figura 11.



Figura 10: Coletor de baterias pipe que estão dispostos em shoppings.
Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

Estas caixas são então transportadas para dois lugares na Suécia onde as baterias são classificadas em sete frações e então transportadas para instalações de reciclagem.



Figura 11: Caixa coletora de baterias grande.
Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

Mesmo que seja facilitada a entrega de pilhas a maioria das pessoas armazenam suas baterias antigas em casa por um tempo. A mesma situação também ocorre na maioria dos escritórios. Isto significa que as baterias podem, em muitos casos, ter começado a fugas de material de eletrólito.

5.2 Lixo Eletrônico

Os resíduos eletrônicos (televisores, brinquedos, leitores de CD, ferramentas, etc.) devem ser entregues em locais de recolha de reciclagem maiores. Eles são normalmente colocados em gaiolas de aço (cerca de 1-2 m³) ou outros recipientes. Geralmente não há pessoal que faça o controle do que é entregue, os próprios consumidores que colocam os resíduos nas caixas coletoras.

Os resíduos eletrônicos são então transportados por caminhão para uma série instalações de pré-tratamento onde é feita a triagem. Na unidade de pré-tratamento, o caminhão inclina a gaiola e o material cai dentro de uma tremonha, como visto na Figura 12. Depois o material da tremonha é transportado para uma correia de classificação onde os operadores separam manualmente o material que deve ser removido como cabos, placas de

circuito, baterias e etc., veja a Figura 13. Os operadores quebram o equipamento com um martelo em muitos casos para poder remover os itens que devem ser classificados. As baterias que são removidas são colocadas em recipientes. Em alguns locais as baterias são classificadas por tipo nesta etapa, em outros todas as baterias são colocadas no mesmo recipiente para serem classificadas em um outro momento. A classificação nesta etapa depende da rotulagem da bateria, podem naturalmente ocorrer situações em que é difícil ler a rotulagem.



Figura 12: Manipulação das gaiolas com empilhadeiras elétricas.
Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

A quantidade de material e equipamento que passa pelos operadores todos os dias é enorme e é notado uma constante mudança devido ao rápido desenvolvimento em equipamentos eletrônicos. Mesmo se os operadores sejam extremamente treinados, não é possível classificar de forma 100% confiável manualmente.

As baterias que não foram classificadas seguem os resíduos eletrônicos para as instalações de trituração e desfragmentação (Nestas instalações, o material pode ser deixado ao ar livre por até duas semanas, uma vez que diferentes tipos de resíduos são processados em dias diferentes ou pode chegar em um recipiente e ser esvaziado imediatamente no processo, ver Figura 14 a 17. Na desfragmentação todo o material é moído em pequenos pedaços e então transportado em torno de centrífugas e outras instalações de triagem para classificar o material que vale a pena ser reciclado, veja a Figura 16. No final, há também a classificação

manual. O processo de moagem real é constantemente pulverizado com água para esfriar o material e o minimizar a emissão de particulados em suspensão no ar.



Figura 13: Classificação do lixo eletrônico.
Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).



Figura 14: Material chegando no local para ser classificado e moído.
Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).



Figura 15: Mistura do material.

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).



Figura 16: Material a ser colocado na correia transportadora para ser encaminhado ao processo de moagem.

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).



Figura 17: Moinho.

Fonte: Adaptado de AMON Francine *et al.* (2012).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A cadeia de reciclagem apresentada no capítulo 5 pode expor as baterias a diversas situações de risco de incêndio. Em algumas etapas deste processo elas são armazenadas misturadas em diferentes faixas de temperatura e umidade, sem a proteção de isolamento nos polos. O vazamento de eletrólito e a exposição a outros líquidos proveniente de equipamentos como o petróleo são notados em muitas ocasiões.

6.1 Exposição ao tempo

Na cadeia de reciclagem as baterias são expostas a temperaturas abaixo de zero, luz solar direta, chuva granizo ou neve. Altas temperaturas como já foi mencionado no item 3.3.4 podem desencadear a fuga térmica fenômeno onde a temperatura interna aumenta rapidamente devido as reações exotérmicas.

Como afirmado por Amon *et al.* (2012) a luz solar direta pode elevar a temperatura de uma superfície em até 70°C, temperatura de possível fuga térmica para muitas tecnologias de baterias, esta temperatura também é superior à temperatura máxima de armazenamento para baterias de níquel-cádmio de acordo com o exército dos Estados Unidos. Muitas baterias também possuem eletrólitos inflamáveis com ponto de ignição inferior à 70°C. A movimentação de material pode gerar faíscas.

Temperaturas abaixo de 0°C pode causar a ruptura da célula devido a dilatação térmica devido ao congelamento de eletrólitos aquosos. Estas situações resultam em vazamentos de líquidos de eletrólitos e na possível corrosão de células adjacentes.

A chuva, a neve e o granizo contribuem para escoar e espalhar eletrólitos e outros líquidos através do monte de baterias armazenadas. Como foi mencionado no item 3.3.8 não é provável que baterias imersas em água podem causar incêndio devido a um curto circuito, mais provável seria o risco de baterias danificadas reagirem quimicamente com a água, outros líquidos ou outros materiais.

Baterias armazenadas em recipientes cheios de água podem produzir gás hidrogênio através da eletrólise da água este gás se acumulado possuem um risco em potencial, este assunto foi discutido no item 3.3.8.

6.2 Manipulação

A grande quantidade de baterias armazenadas sem proteção de seus polos e podendo ser manipuladas de maneiras inadequadas aumenta muito a probabilidade de curtos-circuitos internos e externos. Entretanto estes riscos são grandes em baterias totalmente carregadas e a maioria das baterias armazenadas nestas instalações estão usadas e descarregadas desta forma é baixa a probabilidade destes tipos de incêndio em instalações de reciclagem.

Abusos mecânicos podem resultar no vazamento de eletrólitos que incluem alguns riscos já mencionados.

Como apresentado por Amon *et al.* (2012) os caminhões e tratores usados para misturar o material podem produzir em operação faíscas e calor de fricção. O potencial de ignição por faíscas varia de acordo com o material, este assunto é tratado no “*Ignition Handbook*” Babrauskas, V. (2003) que trás alguma discussão sobre o calor friccional necessário para inflamar diferentes misturas de gases.

O calor de fricção pode elevar a temperatura e a pilha/monte acender através da auto-ignição.

O artigo 15.º da Directiva 2006/66/CE, União Européia (2009) relativa às baterias diz respeito ao armazenamento seguro de pilhas antes e durante o processo de reciclagem, entre outros tópicos relacionados com a reciclagem de baterias. Este documento requer que todos os fluidos e ácidos sejam removidos das baterias a serem tratadas antes do armazenamento. Os locais de tratamento/armazenamento também devem ter superfícies impermeáveis, revestimento adequado à prova de intempéries ou recipientes vedados à prova de fugas. Nomeadamente, o artigo 15.º não menciona a protecção contra curto-circuitos externos (AMON *et al.* 2012).

6.3 Mistura de diferentes tipos de baterias

Alguns riscos estão relacionados ao armazenamento de diferentes tipos de baterias em um mesmo local ou recipiente, esta mistura não é segura. Através do estudo da Science Partner – SP e com base no teor de substâncias químicas em diferentes baterias, foram identificados alguns riscos que serão listados abaixo.

6.3.1 Mistura de baterias de chumbo-ácido com baterias que contem zinco ou outros metais.

As baterias de chumbo-ácido contem como eletrólito o ácido sulfúrico pode produzir o gás hidrogênio se o ácido sulfúrico vazar e entrar em contato com alguns metais tais como o zinco e o ferro, este assunto já foi discutido no item 3.3.1. Algumas baterias primárias como a pilha de zinco-carbono têm como eletrodo o metal de zinco, este metal pode ser o próprio invólucro da bateria.

6.3.2 Misturas de baterias de chumbo-ácido com material orgânico

O ácido sulfúrico reage com muitos materiais orgânicos em uma reação vigorosa e energética podendo haver a liberação de calor. Desta forma os vazamentos de eletrólitos de ácido sulfúrico em contato com materiais orgânicos também podem apresentar um risco em potencial.

6.3.3 Mistura de baterias de lítio ou íon de lítio com outras baterias

O lítio metálico quando colocado em contato com a água produz o gás hidrogênio, desta forma baterias de lítio ou baterias que contenham lítio metálico devem ser mantidas separadas de água ou baterias que contenham eletrólitos aquosos.

Para Amon *et al.* (2012) é difícil dizer se os cenários onde o lítio metálico entra em contato com a água são susceptíveis de ocorrer na prática. Algumas baterias de lítio também contêm cloreto de tionilo que reage com água formando cloreto de hidrogênio e dióxido de enxofre que não são inflamáveis.

Táticas especiais de combate a incêndio podem ser necessárias para conter incêndios em baterias compostas por lítio metálico e solventes orgânicos altamente inflamáveis, baterias de lítio que contenham cloreto de tionilo, e baterias de íon-lítio que contenham solventes orgânicos como o hexafluorofosfato de lítio.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mesmo com todos os riscos apresentados é surpreendente que o número de incidentes em unidades de reciclagem não seja tão grande, provavelmente porque os riscos de incêndio são maiores quando as baterias estão totalmente carregadas, porém eles estão presentes nos processos de coleta, transporte, armazenamento e de reciclagem como já foi abordado.

É evidente que o consumo de baterias continuará a aumentar, as novas tecnologias deverão atender aos requisitos de desempenho em suas aplicações. Desta forma seria de se esperar uma maior quantidade de resíduos sendo processados em unidades de reciclagem.

Como foi apresentado é notado uma maior densidade de energia nas baterias modernas contribuindo com o aumento dos riscos de incêndios elétricos. As novas tecnologias e novas químicas envolvidas poderão criar novos cenários de risco. Desta forma seria de se esperar a evolução das técnicas atuais, tornando-as mais seguras, assim como a criação de processos de reciclagem que minimizem os riscos.

Alguns problemas ainda devem ser solucionados, uma melhor identificação através de rótulos poderá facilitar a triagem, evitando a mistura de diferentes tipos de baterias durante o armazenamento. O incentivo a coleta e a facilitação da identificação de baterias em produtos eletroeletrônicos resolveria alguns problemas de baterias deixadas em frações enviadas para moagem e desfragmentação.

Para Amon *et al.* (2012) em um mundo perfeito, haveriam sistemas de recolha e descarga automática que teriam a capacidade de restaurar a energia presente nas baterias usadas, também um meio para identificar automaticamente as baterias em qualquer equipamento durante a cadeia de reciclagem. O autor aborda que se houvesse inclusão de uma tarifa sobre as baterias existentes e fosse dado um retorno financeiro aos consumidores que disporem as baterias usadas em locais de recolha motivaria estes consumidores a reciclar. Assim a criação de técnicas mais seguras aliadas à responsabilidade dos consumidores contribuiria diretamente com a reciclagem.

As recomendações gerais para o armazenamento e manuseio de baterias incluem: armazenar as baterias em locais bem ventilado com faixas de temperatura e umidade adequadas; não misturar diferentes tipos em um mesmo recipiente; proteger os polos para evitar problemas de curto-circuito; protege-las de danos mecânicos.

O objetivo geral da pesquisa foi alcançado à medida que foram identificados os riscos de incêndios associados as baterias e foram relatados como estes riscos influem nas unidades de reciclagem de baterias e equipamentos eletroeletrônicos, a revisão bibliográfica foi fundamentada na pesquisa realizada pela Science Partner – SP disponível no manual *Fire risks associated with batteries* de Amon F. *et al.* O principal objetivo deste estudo foi dar acesso ao conteúdo para estudantes brasileiros e criar um material que poderá ser um apoio para futuros estudos nesta área.

8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ADMINISTRAÇÃO FEDERAL DE AVIAÇÃO DOS EUA. **Batteries and Battery-Powered Devices**. Aviation Incidents Involving Smoke, Fire, Extreme Heat or Explosion, 2012.

AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DOS ESTADOS UNIDOS. **Hazardous Waste Management System; Modification of the Hazardous Waste Recycling Regulatory Program**. 40 CFR, partes 9, 260, 261, 262, 264, 265, 266, 268, 270, e 273, U.E.P. Agency, Federal Register, p. 25491-25551, 1995.

AMON, Francine *et al.* **Fire risks associated with batteries**. Science Partner, 2012.

ANDERSSON, O. **Brandfara i bärbara datorer**. Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University. p. 61, 2011.

ATWATER, T.B. *et al.* **Metal/air batteries**. Linden's Handbook of Batteries. Editora: T.B. Reddy, McGraw-Hill, Nova York. p. 33.44-33.55, 2011.

AURELIO, Buarque de Hollanda F. *et al.* **Pequeno dicionário brasileiro da língua portuguesa**. 10ª ed. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1961.

BABRAUSKAS, V. **Ignition Handbook**, Fire Science Publishers, 2003.

BALAKRISHNAN, P.G. *et al.* **Safety mechanisms in lithiumion batteries**. Journal of Power Sources, volume 155, p. 401-414, 2006.

BATTERY Safety Reference Guide, System Safety Engineering, s.d. Disponível em: <http://www.cecom.army.mil/safety/sys_service/b_guide.htm> Acesso em: 6 de fevereiro de 2017.

BBC NEWS ENGLAND. **Fire at industrial site at Lasham near Basingstoke**. 2011.

BOCCHI N.; FERRACIN L. C.; BIAGGIO S. R. **Pilhas e baterías: funcionamento e impacto ambiental**. Química Nova na Escola, 2000.

BONI, Renata Saponara. **A Pilha de Alessandro Volta (1745-1827):** Diálogos e conflitos no final do século XVIII e início do século XIX. São Paulo, Pontifícia Universidade Católica, 2007.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA n° 401**, de 4 de novembro de 2008. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>> Acesso em: 12 de janeiro de 2017.

BUCHMANN, I. **Global Battery Markets**. Battery University, 2010. <www.batteryuniversity.com>. Acesso em: 12 de janeiro de 2017.

BUCHMANN, I. **How to Store Batteries**, Battery University, s.d.

BUCHMANN, I. **How to Transport Batteries**. Battery University. 2012. Disponível em: <www.batteryuniversity.com>. Acesso em: 22 de janeiro de 2017.

BUCHMANN, I. **Lithium-ion Safety Concerns**. Battery University, 2010.

BUCHMANN, I. **Safety concerns with Li-ion**. Battery University, 2011.

BULLOCK, K.R. **Valve regulated lead-acid batteries**. Linden's Handbook of Batteries. Editora: T.B. Reddy, McGraw-Hill, Nova York. p. 17.33, 2011.

CBC News- British Columbia. **Trail battery-recycling fire leaves questions**. 2009.

CERVO Amado L.; BERVIAN Pedro A.; DA SILVA Roberto. **Metodologia científica**. 6ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

CHAGAS Aécio Pereira. **Os 200 anos da pilha elétrica**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

CHUA, D.L. *et al.* **Reserve military batteries**. Linden's Handbook of Batteries. Editora: T.B. Reddy, McGraw-Hill, Nova York. p. 35.1-35.31, 2011.

CONGRESSO DOS ESTADOS UNIDOS. **Lei pública 104-142: Mercury-Containing and Rechargeable Battery Management Act**. Em HR 2024, Washington DC. p. 9, 1996.

DEFRA- Department for Environment, Food, and Rural Affairs, UK. **Advisory note on the storage and transport of waste portable batteries**. 2009.

DOWNS, P. **Condensation possible cause of fire: company; Thorold plant will likely discontinue handling lithium batteries.** St. Catharines Standard, 2007.

ENERGIZER CORPORATION. **Proper disposal, storage, care and handling of your batteries.** 2017. Disponível em: < <http://www.energizer.com/about-batteries/battery-care>>. Acesso em 30 de janeiro de 2017.

ENERGIZER HOLDINGS, INC. **Battery Compartment and Device - Design Considerations.** 2017. Disponível em: <http://data.energizer.com/design_hints/catalog/designhints_catalog.pdf> Acesso em: 7 de fevereiro de 2017

ERLANDSSON, U. **Fjärrkontroll brann.** Sirenen, issue 5, 2007.

ERLANDSSON, U. **Gamla batterier en brandfara.** Sirenen, issue 1, 2007.

ERLANDSSON, U. **Mobiltelefonen började brinna.** Sirenen, issue 7, 2007.

FONTES, Anderson M.; LOURENÇO Marcos F. de P.; MESSEDER Jorge C. **A representação experimental da pilha de Daniell nos livros didáticos: Um erro questionado.** Rio de Janeiro, 2012.

FRIEDRICH, R. AND R. RAMIREZ. **9 Volt Battery-Short Circuit Analysis.** Hamilton and Associates, 2008.

GAINES, L. **Lithium-Ion Batteries: Possible Materials Issues.** Argonne National Laboratory, Argonne, IL, p. 16, 2009.

GAINES, L. **Recycling of Li-Ion Batteries.** Argonne National Laboratory- US, Department of Energy, p. 47, 2011.

GAO, L. *et al.* **Process of accidental explosions at a refuse derived fuel storage.** Journal of Loss Prevention in the Process Industries, volume 19, n°. 2-3, p. 288-291, 2006.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

GLOBAL INDUSTRY ANALYSTS. **Consumer Batteries: A Global Strategic Business Report.** p. 661, 2011.

GOVERNO DE ALBERTA. **Transportation of Batteries and Battery Fluids by Road.** Canadá, p. 13, 2010.

GOVERNO DO CANADÁ. **Safe Storage, Use and Disposal of Batteries.** Report No. D112-7, Human Resources and Skills Development, Canadá, 2006.

KAUFMAN, A. *et al.* **Smart fuel cells.** Linden's Handbook of Batteries. Editora: T.B. Reddy, McGraw-Hill, New York. p. 38.1-38.20, 2011.

KIRK-OTHMER ENCYCLOPEDIA OF CHEMICAL TECHNOLOGY. 4ª edição, volume 13, John Wiley & Sons, Inc., Nova York, 1995.

KRAYTSBERG, A. *et al.* **Review on Li-air batteries - Opportunities, limitations and perspectives.** Journal of Power Sources, vol. 196, no. 3, p. 886893, 2011.

LINDEN D. *et al.* **Linden's Handbook of Batteries.** 4ª ed. McGraw-Hill, Nova York, 2011. Disponível em:

<http://www.etf.unssa.rs.ba/~slubura/diplomski_radovi/Zavrzni_rad_MarkoSilj/Literatura/Handbook%20of%20Batteries%203rd%20Edition.pdf>. Acesso em 10 de dezembro de 2016.

LINDEN, D. *et al.* **An introduction to primary batteries.** Linden's Handbook of Batteries. Editora: T.B. Reddy, McGraw-Hill, Nova York. p. 8.108.11, 2011.

LINDEN, D. *et al.* **An introduction to secondary batteries.** Linden's Handbook of Batteries. Editora: T.B. Reddy, McGraw-Hill, Nova York. p. 15.1015.11, 2011.

LINDEN, D. *et al.* **Linden's Handbook of Batteries.** Editor: T.B. Reddy, McGraw-Hill, 4ª edição, Nova York, 2011.

LISBONA, D. **A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries.** Process Safety and Environmental Protection, volume. 89, no. 6, p. 434-442, 2011.

LÖNNERMARK, A. *et al.* **Biobränslen och avfall - Brandsäkerhet i samband med lagring.** SP Rapport 2008-51, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås, 2008.

LÖNNERMARK, A. *et al.* **Emission from Fires in Electrical and Electronics Waste.** SP Rapport 2005-42, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås, 2005.

LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. **Guidance on the safe use, handling, storage and disposal of Lithium Polymer batteries.** Health, Safety and Environment Office, Loughborough University, 2009.

LUCERO, R.D. *et al.* **Reserve magnesium anode and zinc/silver oxide batteries.** Linden's Handbook of Batteries. Editora: T.B. Reddy, McGraw-Hill, Nova York. p. 34.1-34.41; p. 34.6-34.7, 2011.

MANTUANO Danuza P.; ESPINOSA Denise C. R.; WOLFF Eliane; MANSUR Marcelo B.; SCHWABE Wilfrid K. **Pilhas e baterias portáteis: legislação, processos de reciclagem e perspectivas.** Revista Brasileira de Ciências Ambientais, 2011.

MARCONI, Marina de A.; LAKATOS, Eva M. **Fundamentos de metodologia científica.** 6^a ed. São Paulo: Atlas, 2009.

MARCONI, Marina de A.; LAKATOS, Eva M. **Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragem e técnicas de pesquisa, elaboração, análise e interpretação de dados.** 7^a ed. São Paulo: Atlas, 2012.

MARTINS Roberto de A. **Alessandro Volta e a invenção da pilha: dificuldades no estabelecimento da identidade entre o galvanismo e a eletricidade.** Grupo de História e Teoria da Ciência, Campinas, 1999.

MIKOLAJCZAK, C. *et al.* **Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment.** Exponent, Quincy, MA, p. 112, 2011.

MINAYO Maria C. de S. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade.** Petrópolis: Vozes, 2001.

NAÇÕES UNIDAS. **Transport of Dangerous Goods- Manual of Tests and Criteria.** Nova York e Genebra. p. 456, 2009.

NASCIMENTO, Valberes. *et al.* **Pilha de Daniell.** Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2014.

NON RECHARGEABLE BATTERIES DO'S AND DON'TS. IEC 60086-1 and IEC 600865., I.E. Commission, p. 6, 2000.

OHSAKI, T. *et al.* **Overcharge reaction of lithium-ion batteries.** Journal of Power Sources, volume 146, n°. 1–2, p. 97-100, 2005.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Technical Instructions For The Safe Transport of Dangerous Goods by Air**. 2011.

OTTAVIANI, M. **Review of regulations affecting the transport of waste batteries**. 16th International Congress for Battery Recycling– ICBR 2011, Veneza, 2011.

PACKAGING GUIDELINES FOR BATTERY SHIPMENTS. Federal Express, p. 5, 2009.

PRIMARY Lithium Battery Safety and Handling Guidelines, Electrochem, 2010. Disponível em: <www.electrochemsolutions.com/pdf/Safety_and_Handling_Guide.pdf> Acesso em: 2 de fevereiro de 2017

REDDY, T.B. **Lithium primary batteries**. Linden's Handbook of Batteries. Editora: T.B. Reddy, McGraw-Hill, Nova York. p. 14.7, 2011.

REEM BATTERIES & POWER APPLIANCES. **Procedure for handling, upkeeping batteries on storage**. MF-Batteries. 2009.

REEM BATTERIES & POWER APPLIANCES. **Procedure for handling, upkeeping batteries on storage**. MF-Batteries. 2009.

ROBBINS, J. **Clean Harbors continues to operate; Company says it has no plans to reopen battery recycling operations in Thorold**. Welland Tribune, Ontário, 2007.

ROSOLEM, Maria de Fátima. **Baterias: A corrida da inovação**. CPqD. [s.l.], [s.e.], 2015. Disponível em: <<https://www.cpqd.com.br/blog/armazenamento-de-energia/baterias-corrída-da-inovacao/>>. Acesso em 22 de janeiro de 2017.

SALKIND, A. *et al.* **Lead-acid batteries**. Linden's Handbook of Batteries. Editora: T.B. Reddy, McGraw-Hill, Nova York. p. 16.1-16.87, 2011.

SCIENCES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DE L'ACADÉMIE D'ORLÉANS-TOURS. Luigi Galvani; Disponível em: <<http://physique.ac-orleans-tours.fr/>>. Acesso em 23 de novembro de 2016.

SCROSATI, B. *et al.* **Lithium batteries: Status, prospects and future**. Journal of Power Sources, vol. 195, no. 9, p. 2419-2430, 2010.

SEVERINO, Antônio J. **Metodologia do trabalho científico**. 23 ed. São Paulo: Cortez, 2007.

SHIMIZU, Y. *et al.* **Heat accumulations and fire accidents of waste piles**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, volume 22, p. 8690, 2009.

SIMONSON, M. *et al.* **Fire performance of selected ITEquipment**. Fire Technology, volume 40, n°. 1, p. 27-37, 2004.

SIRENEN. issue 7, p. 31, 2003.

STEGALL, A. **Fire, explosion site under investigation**. The Daily Tribune, Cartersville, GA, 2011.

TAYLOR, R.L. **Lead-Acid Battery Hazards**. Calicorp Inc., 2006.

THE EUROPEAN PORTABLE BATTERY ASSOCIATION. **Product Information- Primary and Rechargeable Batteries**. EPBA Europe.net, Bruxelas, 2007.

THIOLLENT, Michel. **Metodologia da pesquisa - ação**. 2. ed. São Paulo: Cortez, 1986.

UNIÃO EUROPÉIA. Directiva 2006/66 / CE relativa às baterias: estudo sobre o cálculo das eficiências de reciclagem e a aplicação - artigo 15°. Bruxelas. P. 236, 2009

UNIÃO EUROPÉIA. Parlamento Europeu e Conselho de Resíduos de Equipamentos Elétricos Eletrônicos. **Diretiva 2002/96/EC**. Official Journal of the Union, Brussels, 2003.

UNIÃO EUROPÉIA. Parlamento Europeu e Conselho que altera a Diretiva 2006/66/CE relativa às pilhas e acumuladores e aos resíduos de pilhas e acumuladores, no que diz respeito às competências de execução atribuídas à Comissão. **Diretiva 2008/12/EC** União Europeia, Brussels, 2008.

UNIÃO EUROPÉIA. Parlamento Europeu e Conselho que altera a Diretiva 2006/66/CE relativa às pilhas e acumuladores e aos resíduos de pilhas e acumuladores no que diz respeito à colocação de pilhas e acumuladores no mercado. **Diretiva 2008/103/EC**. União Europeia, Brussels, 2008.

UNIÃO EUROPÉIA. Parlamento Europeu e Conselho relativo às pilhas e acumuladores e aos resíduos de pilhas e acumuladores e que revoga a Diretiva 91/157/CEE. **Diretiva 2006/66/EC**. Official Journal of the Union, Brussels, 2006.

WANG, Q. *et al.* **Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery.** Journal of Power Sources, volume 208, n.º. 0, p. 210-224, 2012.

WEBSTER, H. **Flammability Assessment of Bulk-Packed, Nonrechargeable Lithium Primary Batteries in Transport Category Aircraft.** Office of Aviation Research, Washington, DC, p. 18, 2004.

WENNSTAM, E. *et al.* **Teknikbevakning av området portabla tillämpningar för bränslecellstekniken 2010/2011.** Elforsk rapport 11:40, 2011.

WOLFF, Eliane; CONCEIÇÃO, Samuel Vieira. **Resíduos Sólidos: A reciclagem de pilhas e baterias no Brasil.** UFMG. Disponível em:
<http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2001_tr104_0146.pdf>. Acesso em 14 de dezembro de 2016.

WOZNIAK, J.A. **Battery selection for consumer electronics.** Linden's Handbook of Batteries, Editora: T.B. Reddy, McGraw-Hill, Nova York. p. 32.132.21, 2011.