

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

PPGEM

CONTRIBUIÇÃO À ENGENHARIA E AO ECODESIGN NA AVALIAÇÃO DO
POTENCIAL DE REUSO DE CÉLULAS DE BATERIAS DESCARTADAS DE
NIMH E LI-ÍON DE TELEFONIA CELULAR

Eduardo Luis Schneider

Tese de Doutorado

Porto Alegre
2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

PPGEM

CONTRIBUIÇÃO À ENGENHARIA E AO ECODESIGN NA AVALIAÇÃO DO
POTENCIAL DE REUSO DE CÉLULAS DE BATERIAS DESCARTADAS DE
NIMH E LI-ÍON DE TELEFONIA CELULAR

EDUARDO LUIS SCHNEIDER
Mestre em Engenharia

Trabalho realizado no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2009

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Vilson João Batista – PGDESIGN/PROMECA/GPFAI/UFRGS

Prof. Dra. Célia de Fraga Malfatti – PPGEM/UFRGS

Prof. Dra. Maria Cecília Loschiavo dos Santos – USP

Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Reinaldo e Madalena pelo amor e educação.

Aos professores do PPGEM, em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior e a Prof. Dra. Célia Malfatti, pela amizade, atenção e ajuda na realização deste trabalho.

Aos meus colegas do LdSM em especial a Sandra Souza (design), ao Eduardo Presser (design), ao Gabriel Bergmann (design), ao Daniel Pereira (engenharia de materiais), ao Daniel Hamester (eletro-técnico) e ao Rodolfo Dresch (engenharia elétrica) pela participação no desenvolvimento deste trabalho e a todos os demais pela amizade e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Renato Machado de Brito e ao meu pai eletro-técnico Reinaldo Schneider pela contribuição no desenvolvimento de novas aplicações para células de baterias com potencial para reuso.

Ao meu amigo Prof. MSc. Eduardo Fonseca pelo auxílio no desenvolvimento de novos invólucros para baterias no laboratório de prototipagem da UCS de Bento Gonçalves.

As lojas de assistência técnica autorizadas, principalmente à AT Celulares, à Help Manutenção Celular e à Cell.com e as demais pessoas que doaram telefones celulares e baterias para este trabalho.

Aos meus colegas do DEMEC, onde trabalhei como professor substituo, em especial ao Arnaldo Ruben Gonzalez, ao Flávio José Lorini, ao Aldoni Gabriel Wiedenhof, ao Heraldo Amorim, ao Volnei e à Rafaela Brittes Dill.

Ao meu colega doutorando Renato Dresch do prédio da engenharia nova e aos colegas da engenharia elétrica, em especial ao Renato Ventura e ao Luiz Fernando.

À minha namorada Tamara e a todos meus parentes e amigos que me incentivam e torcem por mim.

A CAPES pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS E SÍMBOLOS	XV
RESUMO	XVII
ABSTRACT	XVIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Projetos sustentáveis	6
2.2 Crescimento Populacional x Gestão de Resíduos	8
2.3 Recuperação de Materiais ao Final da Vida Útil de Eletro-Eletrônicos ..	17
2.4 Linhas de Desmontagem	20
2.5 A evolução do Telefone e o Surgimento do Celular	22
2.5.1 Divisão de mercado de telefones celulares	26
2.5.2 Desmontagem dos Telefones Celulares	28
2.5.3 Impactos ambientais dos telefones celulares	29
a. A placa de circuito impresso (PCI).....	31
b. O LCD.....	32
c. O carregador.....	32
d. O alto-falante, o microfone e a antena.....	32
e. Teclado e invólucro.....	32
f. Bateria	33
2.6 Baterias.....	33
Componentes das células e baterias.....	34
Classificação de células e baterias.....	35
Métodos de recarga.....	36
Design de baterias recarregáveis	38
2.6.1 Princípios de operação	40
Energia livre.....	40
Voltagem teórica.....	40
Capacidade de carga teórica.....	41
2.6.2 Materiais dos Sistemas de Baterias usadas em Celulares	41

	Baterias de NiMH	42
	Baterias de Li-Íon	44
	Composição dos materiais	45
	Resíduos de baterias recarregáveis	47
	Reciclagem de baterias	48
2.6.3	Fatores que afetam a performance das baterias	49
	Perdas devido à polarização	50
	Impedância interna das baterias.....	51
	Envelhecimento e condições de armazenamento das baterias.....	53
2.6.4	Determinação do Estado de Carga.....	53
2.6.5	Ciclo de Vida das Baterias	54
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
3.1	Desmontagem dos Telefones Celulares	59
3.2	Desenvolvimento da Bancada de Testes de Baterias.....	62
3.3	Metodologia Desenvolvida para a Avaliação de Células.....	64
3.3.1	Desmontagem das Baterias.....	65
3.3.2	Análise do aspecto visual das células.....	67
3.3.3	Verificação da voltagem das células.....	68
3.3.4	Testes de performance em ciclos de carga e descarga.....	69
	Comparação com células novas.....	72
3.4	Invólucros para Novas Baterias	73
	Projeto de Novos Invólucros de Baterias através de <i>Vacuum Forming</i>	73
	Projeto de novos invólucros com <i>snap-fits</i>	76
4	RESULTADOS	78
4.1	Depoimentos coletados.....	78
4.2	Desmontagem dos Telefones Celulares	79
4.3	Avaliação de Células de Baterias	82
4.3.1	Desmontagem das Baterias.....	82
4.3.2	Etapas: 2, 3 e 4.....	84
	Comparação com células novas.....	88
4.4	Projeto de Novos Invólucros para Baterias	92
4.4.1	Novos Invólucros através de <i>Vacuum Forming</i>	92
4.4.2	Dimensionamento dos Invólucros com <i>Snap-Fits</i>	92
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	94
6	CONCLUSÕES.....	102
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	104

8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	APÊNDICE A - Questionário sobre circulação e destino de baterias	113
	APÊNDICE B - Análise das Células Via MEV	114
	APÊNDICE C - Catálogo de Alguns Modelos de Baterias	117
	APÊNDICE D - Reuso de Células em Sistemas de Iluminação	119
	APÊNDICE E - Reuso de Células em Fontes de Alimentação Portáteis	122
	APÊNDICE F - Produção Bibliográfica / Participações em Eventos	125
	GLOSSÁRIO	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aparelhos celulares (426 mil) que saem de circulação nos Estados Unidos, por dia [6].....	2
Figura 2 - Aumento da População da Terra: o número de anos necessários para atingir cada bilhão de pessoas e o ano em que foi o mesmo foi atingido [23].....	9
Figura 3 - O objetivo da hierarquia da gestão de resíduos: Conseguir o máximo benefício prático dos produtos e gerar a mínima quantidade possível de resíduos [adaptado de 25].	10
Figura 4 - Pilhas e baterias portáteis usadas pelo Papa-Pilhas (A) são enviadas para a recicladora onde são desmontadas com golpes de martelo (B) sem antes avaliar a capacidade das mesmas para o reuso [34].	12
Figura 5 - Forno industrial de alta temperatura em A e uma chaminé de incineração em B [36].	14
Figura 6 - Foto de um aterro sanitário em Minas do Leão - RS onde mais de 290 mil toneladas/ano de lixo da cidade de Porto Alegre são enterradas em A e foto de um lixão em B [36].....	14
Figura 7 - Atuação do Ecodesign na minimização da degradação ambiental [desenvolvido pelo autor].	18
Figura 8 - Célula de desmontagem de seleção múltipla esquemática [13].	21
Figura 9 - Linha de desmontagem esquemática [13].	22
Figura 10 - Linha do tempo dos telefones: (A) Cerca de 1900; (B) de tulipa de 1920 -1928; (C) 1º telefone da Ericsson de 1928 -1970; (D) telefone do período de 1970 -1980; (E) telefone de 1982 -1992 [58].....	23
Figura 11 - Linha do tempo com a evolução dos Telefones Celulares: do 1º celular comercial portátil, até o considerado um dos mais completos da atualidade [desenvolvido pelo autor].	25
Figura 12 - Dispositivos para desparafusar, cortar o invólucro, remover a tampa e demais elementos de junção dos componentes [63].....	29

Figura 13 - Construção típica de uma célula cilíndrica de bateria [adaptado de 68].	39
Figura 14 - Construção típica de uma célula prismática de bateria [adaptado de 68].	40
Figura 15 - Processos eletroquímicos numa bateria de NiMH. (A) Bateria carregada, (B) Descarregando (em uso ou armazenada), (C) Descarregada, (D) Recarregando [adaptado de 70].	44
Figura 16 - Processos eletroquímicos numa bateria de Li-Íon. (A) Bateria carregada, (B) Descarregando (em uso ou armazenada), (C) Descarregada, (D) Recarregando [adaptado de 70].	45
Figura 17 - Polarização numa célula como função da corrente de operação. [adaptado de 68].	52
Figura 18 - Diminuição da capacidade em função do número de ciclos para as baterias de NiCd, Li-Íon e NiMH [86].	56
Figura 19 - Possibilidade de tempo de uso (em anos) em função do número de recargas semanais (número de ciclos) [desenvolvido pelo autor]. ...	56
Figura 20 - Fluxograma geral da desmontagem de telefones celulares e baterias com a respectiva diversidade de componentes.	58
Figura 21 - Baterias de NiMH e Li-Íon descartadas e recebidas antes de serem separadas em A e, uma mostra da diversidade de modelos em B. .	58
Figura 22 - Alguns dos celulares desmontados: Ericsson DF 388, Ericsson KF 788, Motorola C331(T), Motorola V2390, Nokia 2220, Nokia 2160, Nokia 5120, Nokia 8260, Nokia 6225.	60
Figura 23 - Vistas do celular modelo Nokia 5120. Frontal (A), traseira (B), lateral esquerda (C) e lateral direita (D).	60
Figura 24 - Operações de desmontagem do telefone celular modelo Nokia 5120.	62
Figura 25 - Projeto elétrico da bancada para testes em células de baterias.	63
Figura 26 - Projeto mecânico da bancada em 3D em A e uma das etapas de construção em B.	64
Figura 27 - Etapas da metodologia de avaliação do potencial de utilização de células descartadas.	64

Figura 28 - Baterias NiMH, 3,6 V: Nokia modelo BMS-3, 1000 mAh em A, Nokia modelo BMC-3, 900 mAh em B e Ericsson BKB 193 (123-105), 900 mAh em C.	66
Figura 29 - Baterias Li-Íon, 3,7 V: Nokia modelo BL-5C, 850 mAh em A e, Siemens modelo V30145-K1310-X250, 700 mAh em B e LGIP-G830, 830 mAh em C.	66
Figura 30 - Vistas da bateria Nokia BMS-3. Frontal (A), traseira (B), superior (C) e inferior (D).	67
Figura 31 - Operações de desmontagem da bateria Nokia BMC-3 (1-5). Em 6 a bateria desmontada.	67
Figura 32 - 2ª etapa: inspeção visual do aspecto superficial. Presença de vazamento nas células de uma bateria de NiMH em A e, uma célula de Li-Íon “estufada” em B.	68
Figura 33 - 3ª etapa: medição da voltagem remanescente com multímetro em A e, remoção da PCI da bateria em B.	69
Figura 34 - Ligação dos conjuntos de células em série (em A) para posterior instalação na bancada (em B).	69
Figura 35 - Células etiquetadas da bateria modelo BMC-3 em A. Em B, células modelo BMC-3 e modelo BL-5C estocadas.	72
Figura 36 - Baterias fechadas com suas células expostas. Modelos: Nokia BMS-3 em A e Ericsson BKB 193 1021 em B.	73
Figura 37 - Arranjo espacial com 3 células do modelo Nokia BMS-3.	74
Figura 38 - Modelo Ericsson BKB 193 1021. Arranjo espacial com 5 células em A e com 4 células em B.	74
Figura 39 - Fresamento da matriz dos moldes em MDF em A, modelamento da placa de PVC (transparente) com a forma da matriz em B e C.	75
Figura 40 - Conceitos de invólucro com <i>snap-fits</i> em A e B e o design para desmontagem com a utilização de uma ferramenta de alta disponibilidade, que é o clipe em B.	77
Figura 41 - Aplicação das restrições nas laterais e deflexão na ponta do <i>snap</i> em A. Em B, a malha gerada.	77
Figura 42 - Equipe desmontando, separando os componentes e os mesmos sendo guardados ao passo que a linha de desmontagem era continuamente abastecida com novos aparelhos.	79

Figura 43 - Apresentação do símbolo do material para a reciclagem: invólucros em A e B e estrutura metálica em C.....	81
Figura 44 - Elementos de junção: <i>snap-fits</i> em A e B, parafuso com fenda não convencional em C e cola em D.	82
Figura 45 - Componentes diversos presentes nas baterias: termistores, capacitores, transistores, resistências entre outros em A. Cabos presentes em baterias mais antigas em B e componentes metálicos em C.	83
Figura 46 - Proporção das células aprovadas dos três modelos de baterias de NiMH nas diferentes etapas do processo de avaliação.	85
Figura 47 - Proporção das células aprovadas dos três modelos de baterias de Li-Íon nas diferentes etapas do processo de avaliação.	85
Figura 48 - Etapa 3 - Verificação da Voltagem das células de NiMH em A e de Li-Íon em B.....	86
Figura 49 - Etapa 4 – Desempenho nos ciclos de carga e descarga das células de NiMH em A e de Li-Íon em B.	86
Figura 50 - Relação entre a frequência relativa de células e baterias aprovadas e rejeitadas nas etapas 2 e 3 do processo de avaliação.	87
Figura 51 - Comparação das médias das células aprovadas dos três modelos de baterias de NiMH com os três modelos de Li-Íon nas diferentes etapas do processo de avaliação.....	87
Figura 52 - Ciclos de carga e descarga lenta para células de NiMH novas e aprovadas para reuso com conceitos A e C.	89
Figura 53 - Variação da resistência interna com o tempo na descarga lenta das células de NiMH novas e aprovadas para reuso com conceitos A e C.	89
Figura 54 - Ciclos de carga e descarga lenta para células de Li-Íon novas e aprovadas para reuso com conceitos A e C.	91
Figura 55 - Variação da resistência interna com o tempo na descarga lenta das células de Li-Íon novas e aprovadas para reuso com conceitos A e C.	91
Figura 56 - Novos invólucros de baterias através de <i>Vacuum Forming</i> . Em A, a placa de PVC moldada e, em B os invólucros cortados com as células dentro.....	92

Figura 57 - Análise linear estática da geometria modelada do *snap-fit*. 92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Telefone celular típico com seus componentes: baterias e acessórios diversos [desenvolvido pelo autor].	4
Tabela 2 - Localização dos principais fabricantes de telefones celulares no Brasil.	27
Tabela 3 - Comparação do crescimento (em milhões de unidades vendidas e divisão de mercado) de 2005 a 2008 entre as maiores empresas fabricantes de telefones celulares [6].	27
Tabela 4 - Síntese da versão 11 de março de 2009 do ranking verde de eletrônicos com os fabricantes de telefones celulares [61].....	28
Tabela 5 - Elementos e compostos perigosos (% em peso) contidos nas baterias recarregáveis NiCd, NiMH e Li-Íon (US EPA, <i>Office of Solid Waste</i> [75]).	46
Tabela 6 - Evolução das baterias de NiMH utilizadas em telefones celulares [desenvolvido pelo autor].....	50
Tabela 7 - Comparação de algumas características-chaves das baterias de NiCd, NiMH e Li-Íon [9].....	55
Tabela 8 - Modelos de baterias mais comuns entre as descartadas e doadas para este estudo.	59
Tabela 9 - Operações de desmontagem do telefone celular Nokia 5120.....	61
Tabela 10 - Modelos de baterias avaliados neste trabalho e suas respectivas quantidades.....	65
Tabela 11 - Procedimento com as operações de desmontagem da bateria BMS-3.	66
Tabela 12 - Classificação dada na 3ª etapa em função dos valores de voltagem remanescente de cada célula aprovada na etapa anterior.	68
Tabela 13 - Conceitos dados às células qualificando o desempenho das mesmas durante os ciclos de descarga rápida e descarga lenta em função dos níveis de voltagem.	71

Tabela 14 - Exemplo de etiqueta com código impresso que é colada em cada célula aprovada para o reuso.....	72
Tabela 15 - Listagem dos dois modelos de baterias escolhidos.	74
Tabela 16 - Listagem das informações coletadas nas assistências técnicas, agentes autorizados e magazines.....	79
Tabela 17 - Telefones celulares desmontados e seus modelos de baterias de NiMH e Li-Íon.	80
Tabela 18 - Tempo de duração (em s) de cada operação de desmontagem do telefone celular Nokia 5120.....	81
Tabela 19 - Células das baterias de NiMH desmontadas e suas PCI's.	82
Tabela 20 - Células das baterias de Li-Íon desmontadas e suas PCI's.	83
Tabela 21 - Tempo de duração (em s) de cada operação de desmontagem da bateria BMS-3.	84
Tabela 22 - Resultados do desempenho dos modelos das células de NiMH e de Li-Íon avaliadas e aprovadas (quantidade absoluta e relativa).....	85
Tabela 23 - Perda de capacidade das células aprovadas para reuso em relação à capacidade de células novas.	90

LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS E SÍMBOLOS

- A - Unidade básica de intensidade de corrente elétrica e simboliza "C/s" (Coulomb por segundo)
- ABS - Acrilonitrila butadieno estireno
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- Ah - ampéres hora
- Anatel - Agência Nacional de Telecomunicações
- ASTM - American Society for Testing Materials
- C - Coulomb
- CAD/CAM - *Computer Aided Design / Computer Aided Machine*
- C/D - Chave seletora "carga/descarga"
- CNC - Comando numérico computadorizado
- CONAMA - Conselho nacional do meio ambiente
- C-Rate - Taxa de corrente de carga ou descarga de uma bateria
- DfA - *Design for Assembly* - Design Orientado para Montagem
- DfD - *Design for Disassembly* - Design Orientado para Desmontagem
- DfE - *Design for Environment* - Design Orientado para o Meio Ambiente
- DfM - *Design for Maintenance* - Design Orientado para Manutenção
- DMLU - Departamento Municipal de Limpeza Urbana
- EDS - *Energy Dispersive X-Ray Fluorescence System*
- EEE - Equipamentos eletro-eletrônicos
- EPI - Equipamento de proteção individual
- F - Constante de *Faraday*
- I_c - Corrente de carga
- I_{cc} - Corrente contínua
- I_d - Corrente de descarga
- LCD - Display de cristal líquido
- LdSM - laboratório de design e seleção de materiais
- LED - Light-emitting diode
- Li-Íon - Íon lítio
- ICNIRP - *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*
(Comissão Internacional para a Proteção contra Radiação Não-ionizante)
- INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial
- MDF - *Medium-density fiberboard*
- MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura
- MSDS - *Material safety data sheet*
- NDV - *Negative delta V*
- NiCd - Níquel cádmio
- NiMH - Níquel metal hidreto
- PC - Policarbonato
- PCI - Placa de circuito impresso
- PCB's - Bifenilas policloradas

PBT's - *Persistent, bioaccumulative, toxic chemicals*
PVC - Policloreto de vinila
PU - Poliuretano
RMS - *Root Mean Square* (potência eficaz ou potência média quadrática)
SAR - *Specific Absorption Rate* (quantidade máxima de energia absorvida pelo corpo ao usar um telefone celular)
UIT - União Internacional de Telecomunicações
UPS - *Uninterrupted power sources*
US EPA - Agência de Proteção ao Meio Ambiente dos Estados Unidos
USB - *Universal Serial Bus*
Vca - Voltagem em corrente alternada
Vcc - Voltagem em corrente contínua
WCED - *World Commission Environment and Development*
WEEE - Resíduos de equipamentos eletro-eletrônicos

RESUMO

A sociedade atual vive diante de um paradoxo que precisa ser resolvido em curto prazo. A produção crescente em um mercado que oferece equipamentos high-tech cada vez mais acessíveis (computadores mais velozes, telefones celulares com diversas utilidades, entre outros) associada a um grande desperdício de recursos naturais e à contaminação do meio ambiente causada tanto pelo processo de produção destes equipamentos quanto pelo rápido descarte dos mesmos. Dentre os aparelhos eletrônicos, os telefones celulares têm se destacado. Existem, atualmente, mais de 2,5 bilhões de celulares no mundo – o equivalente a mais de 40% da população global, e em 2010, serão 4 bilhões. A popularização desses aparelhos e a produção crescente dos mesmos têm aumentado a demanda por baterias recarregáveis as quais são descartadas, muitas vezes, antes mesmo do término de sua vida útil, gerando, com isso, um grande impacto ambiental associado ao desperdício de recursos naturais e à contaminação do meio ambiente. Nesse contexto está inserido o presente trabalho de doutoramento que teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia de seleção e classificação quanto ao potencial para utilização de células de baterias de NiMH e Li-Íon descartadas. Para isso, avaliou-se a capacidade e estimou-se o percentual dessas células que ainda estavam em boas condições operacionais quando as baterias foram descartadas. Foram projetadas e desenvolvidas: uma linha de desmontagem de telefones celulares e baterias, e uma bancada de testes de células de baterias. Ao final do processo de avaliação, uma considerável quantidade dessas células apresentou capacidade para reuso, sendo consideradas aprovadas aproximadamente 40% e 45% do total das células testadas de NiMH e Li-Íon respectivamente. Os resultados obtidos nesse trabalho alertam quanto ao desperdício de recursos naturais com elevado valor agregado e propõem uma avaliação crítica do comportamento de fabricantes e consumidores desse tipo de dispositivo para conversão e estocagem de energia, visando estabelecer uma alternativa ambientalmente correta para diminuir a quantidade desse tipo de lixo eletrônico. Foi realizada também uma análise dos invólucros de algumas baterias originais, de maneira a projetar novos invólucros que fossem mais fáceis de montar e desmontar e possibilitassem maior flexibilidade na montagem e manutenção de células em uma bateria.

ABSTRACT

Modern society lives in front of a paradox that must be resolved in the short term. Increasing production in a market that offers high-tech equipment each time more available (faster computers, cell phones with various utilities, among others) with a huge waste of natural resources and environmental contamination caused by the production process of these equipments and the rapid disposal of them. Among the electronic devices, cell phones have highlight. There are currently over 2.5 billion mobile phones in the whole world - the equivalent of more than 40% of the global population and, in 2010, there will be 4 billion. The popularity of these devices and the growing production of them have increased the demand for rechargeable batteries which are often discarded, before the end of its useful life. This, in turn, leads to great waste in material and natural resources and to the contamination of the environment. This work is inserted in this context which aimed at the developing of a methodology for selection and assessment in terms of use potential for NiMH and Li-Ion discarded battery cells. In order to do so, the capacity of these cells, which were still in good operating conditions when the batteries were discarded, was assessed, and the percentage was estimated. A disassembly line of cell phones and batteries and cells batteries workbench tests were designed and developed. At the end of the assessment process, a considerable number of these cells still had reuse potential, with approximately 40% and 45% of all NiMH and Li-Ion discarded and tested cells being approved respectively. The present results warn about the natural resources waste and propose critical behavior assessment of producers and consumers of this type of device for conversion and energy storage, aiming to establish an environmentally correct alternative to reduce the amount of this sort of electronic trash. An analysis of some original batteries casings packs was also carried out in order to design new casings packs that could be easier to assemble and disassemble and provide more flexibility in the assembly and maintenance of cells in a battery.

1 INTRODUÇÃO

A humanidade depende enormemente de energia elétrica e de combustíveis fósseis, por outro lado, apesar da razoável disponibilidade de energia dispersa na natureza, como sua utilização não acontece sem impactos para o meio ambiente, sua exploração excessiva está gerando desequilíbrios ambientais muito graves [1].

A sociedade atual vive diante de um paradoxo que tem que ser resolvido em curto prazo: como resolver a questão de uma produção cada vez mais crescente e um mercado que oferece equipamentos *high-tech* cada vez mais acessíveis – computadores mais velozes, telefones celulares com diversas utilidades, aparelhos de som, DVDs, televisores etc., com o grande desperdício de recursos naturais e a contaminação do meio ambiente causados pelo próprio processo de produção destes equipamentos e pelo rápido e crescente descarte dos mesmos. Seja por causa da sua rápida obsolescência ou por estarem danificados, os mesmos estão sendo despejados em aterros sanitários ou outros locais inapropriados onde as formas de reaproveitamento dos mesmos são as mais rudimentares e precárias. Associa-se a isso a inexistência de uma política de regularização destes detritos ou, no máximo, um tímido conjunto de dispositivos legais que não atendem minimamente as reais necessidades de preservação ambiental, causando danos já devidamente constatados à própria saúde humana, inclusive nos países considerados desenvolvidos [2].

O telefone celular está entre os eletrônicos que conquistaram de forma mais rápida consumidores em todo o planeta. O aparelho chegou à marca de 50 milhões de usuários em cinco anos. A televisão demorou treze anos para atingir um público semelhante. Hoje, existem mais de 2,5 bilhões de celulares no mundo – o equivalente a mais de 40% da população global. Em 2010, serão 4 bilhões. De acordo com o relatório anual de 2008 da Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) em 2008, no Brasil, foram habilitados 29,7 milhões de acessos e, ao final do exercício, dos 150,6 milhões de acessos habilitados, 81,5%

eram de pré-pagos e 18,5% de pós-pagos. A teledensidade (número de acessos por grupo de 100 habitantes) correspondente ao número total de celulares habilitados avançou de 63,6%, em 2007, para 78,1%, no final de 2008. Com essa quantidade de aparelhos celulares em uso no Brasil, segundo a UIT (União Internacional de Telecomunicações), o país foi o terceiro entre os países que mais atraíram novos assinantes do serviço, ficando atrás apenas da China e da Índia [3].

No Brasil, segundo estimativa produzida pela consultoria Tendências, até o fim do ano de 2009 serão atingidos 170 milhões de celulares habilitados [4]. De acordo com uma pesquisa feita pelo *Yankee Group*, oito em cada dez pessoas trocam de celular ao menos uma vez por ano e, destes, 43% trocaram quatro vezes de aparelho no mesmo período. Esses aparelhos acabam, mais cedo ou mais tarde, saindo de uso e indo parar no lixo. A quantidade de aparelhos celulares que saem de circulação por dia nos Estados Unidos é de 426 mil e essa impressionante quantidade é representada visualmente pelo artista e fotógrafo Chris Jordan e é mostrada na Figura 1 [5]. O mercado mundial de celulares totalizou, em 2008, 1,222 bilhões de aparelhos comercializados, aproximadamente 7% a mais que em 2007, conforme a consultoria IDC [6].



Figura 1 - Aparelhos celulares (426 mil) que saem de circulação nos Estados Unidos, por dia [6].

Considerando que um telefone celular meça em média 10x5cm (50cm²), e que as medidas de um campo de jogo de futebol para partidas internacionais oficiais são de 105 x 70 m (7350 m²), com a quantidade de aparelhos

comercializados em 2008, poderiam ser cobertos mais de 870 campos de futebol. Se a massa média for de 0,1 Kg por aparelho, essa mesma quantidade de celulares, juntos, somam mais de 128 mil toneladas e são equivalente a mais de 2844 caminhões de transporte de carga carregados com peso bruto de 45 toneladas cada [7, 8].

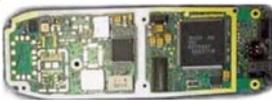
Considerando que cada aparelho tenha um custo operacional de U\$10 mensais, a riqueza destinada aos pagamentos mensais é de U\$12,8 bilhões, o que corresponde a mais de 61 milhões de salários mínimos mensais. Considerando que cada aparelho custou em média U\$100, isso representa mais 616 milhões de salários mínimos.

Os telefones celulares (Tabela 1) são alimentados por diversos tipos de baterias recarregáveis e, muitas dessas, contêm substâncias tóxicas e metais pesados, tais como cádmio, níquel, zinco e cobre, capazes de contaminar o meio ambiente quando incineradas ou dispostas em aterros. O impacto das baterias no lixo comum depende da quantidade gerada e da toxicidade das mesmas. A quantidade de resíduos gerada é uma função da vida útil da bateria e de seu tamanho. Já a toxicidade dos resíduos depende da composição do material da bateria. Além disso, os carregadores (também chamados de fontes de alimentação ou adaptadores) utilizados para carregar as baterias possuem componentes tóxicos e são um dos principais contribuintes ao desperdício e a geração de resíduos de celulares [9].

Os componentes do celular exercem um impacto muito grande no meio ambiente. Mas, mesmo que o consumidor tenha consciência e queira descartar o celular sem trazer nenhum prejuízo à natureza, ele não tem meios nem locais adequados para fazê-lo, no Brasil. Na Europa já existe essa preocupação da indústria por causa da pressão da sociedade e das entidades de consumidores. Eles descobriram que grande parte do lixo eletrônico ia para a China, onde mulheres e crianças acabavam contaminadas nos lixões com a fumaça gerada por resíduos queimados. Nos países membros da comunidade européia há uma lei sobre resíduos de equipamentos eletro-eletrônicos (WEEE) que exige que os fabricantes de produtos eletro-eletrônicos forneçam informações sobre desmontagem dos produtos e localização de substâncias perigosas objetivando aumentar as taxas de reuso e reciclagem de produtos eletrônicos no final de suas vidas úteis [10, 11]. Analisando-se as típicas questões relacionadas à fase de

projeto de um produto: existência de mercado para o produto, tempo e unidades que precisam ser vendidas para haver o retorno do investimento e pagar os custos de produção; destino do mesmo ao final do ciclo de vida. Constatou-se que se a última questão tivesse que ser respondida de forma ambientalmente sustentável, os celulares provavelmente ainda não existiriam.

Tabela 1 - Telefone celular típico com seus componentes: baterias e acessórios diversos [desenvolvido pelo autor].

Equipamento	Componentes	Materiais diversos
 <p>Telefone Celular</p>	Placa de circuito impresso (PCI) 	Constituídas de resina reforçada e componentes eletrônicos (contém Pb e retardantes de chama)
	Display de Cristal Líquido (LCD) 	Sustâncias usadas possuem vários níveis de toxicidade
	Antena, alto-falante, microfone e vibra-call 	Também contém metais pesados e perigosos
	Invólucro / Teclado 	PC + ABS + retardantes de chama bromados
	Carregador 	Fios cobre cobertos de plástico, ouro, cádmio, e retardantes de chama
	Parafusos 	Aço e bronze são os materiais mais utilizados
 <p>Bateria</p>	Células, PCI e Invólucro 	Cádmio, níquel, zinco, cobre, PC + ABS + retardantes de chama bromados

O presente trabalho teve como objetivo geral focar-se no desenvolvimento de um processo para avaliar e classificar as células de baterias de NiMH e Li-Íon descartadas após o uso. Os objetivos específicos foram: alertar para o desperdício de recursos naturais com elevados valores agregados; propor uma

avaliação crítica do comportamento de fabricantes e consumidores desse tipo de dispositivo para conversão e estocagem de energia; estabelecer uma alternativa ambientalmente correta para diminuir a quantidade desse tipo de lixo eletrônico; uma vez constatado que há o descarte prematuro, fazer com que células voltem a ser utilizadas enquanto ainda tenham potencial.

Esta tese está estruturada da seguinte forma: inicialmente é feita uma abordagem do problema por meio de uma revisão da literatura no capítulo 2, onde são destacados os tópicos mais relevantes para o desenvolvimento deste trabalho. No capítulo 3 é feita a apresentação dos materiais e da metodologia utilizada. Para verificar o percentual de baterias boas que são descartadas, foi desenvolvida uma metodologia para avaliação de células de baterias de NiMH e Li-Ion descartadas. Assim, foram projetadas e desenvolvidas: uma linha de desmontagem de telefones celulares e baterias, e uma bancada de testes de células de baterias, onde a capacidade das mesmas foi analisada em diferentes ciclos de carga e descarga. Os invólucros de algumas baterias originais foram analisados de maneira a projetar novos invólucros que fossem mais fáceis de montar e desmontar e possibilitassem maior flexibilidade na montagem e manutenção de células em uma bateria, considerando que muitas vezes uma bateria fica comprometida devido ao dano causado a uma célula apenas. Além de baterias, também foram coletados depoimentos em pontos de venda e agentes autorizados. Os resultados das análises e dos ensaios são mostrados no capítulo 4. No capítulo 5 encontram-se as discussões a respeito dos resultados, no capítulo 6, as conclusões desse trabalho e, no capítulo 7, as sugestões para futuros trabalhos. O Apêndice A mostra um questionário sobre a circulação e destino de baterias de celulares que foi aplicado em assistências técnicas, agentes autorizados e grandes redes. O Apêndice B apresenta uma caracterização de amostras de células utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura. Os Apêndices C e D trazem estudos de caso de aplicações de células aprovadas e reutilizadas em luminárias e em fontes de alimentação. No Apêndice E é mostrada uma relação da produção bibliográfica, de participações em eventos e de trabalhos em andamento que são relacionados e foram desenvolvidos durante o doutorado. Finalmente, um glossário apresenta, em ordem alfabética, algumas palavras e expressões técnicas acompanhadas de suas definições.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de servir de fundamentação teórica para a realização deste trabalho, apresenta-se nessa seção uma revisão dos tópicos mais importantes.

2.1 Projetos sustentáveis

Para enfrentar os problemas complexos que o mundo globalizado traz, como ataque aos recursos naturais, mudanças climáticas, dependência do petróleo, a sociedade deve se conscientizar e fazer sua parte. Segundo JUVINALL, 1991, descrevendo o papel do engenheiro perante a sociedade e as habilidades necessárias para o bom exercício da profissão, a essência da engenharia estaria na utilização de recursos e de leis da natureza para o benefício da humanidade [12]. A civilização moderna tem buscado o desenvolvimento sustentável através do aproveitamento energético, do uso de energias alternativas, da biotecnologia, da nanotecnologia, da utilização de recursos renováveis, biocombustíveis como biodiesel e etanol, dando preferência ao uso de materiais de baixo impacto como os reciclados e minimizando a geração de lixo com a reutilização de materiais e componentes.

A questão da sustentabilidade é entendida como a manutenção dos recursos atuais para as gerações futuras e, conforme VEZZOLI & MANZINI, 2002, pode ser dividida em três vértices: a questão ambiental - caracterizada pela escolha de materiais renováveis, utilização de refugos de produção entre outros; a questão sócio-ética - que prevê a melhora no convívio entre os indivíduos, a multipolarização da sociedade, e o relacionamento amigável no qual o indivíduo exercita da melhor maneira possível as suas capacidades; a questão econômica - que prevê a valorização do produto sustentável frente aos produtores, mostrando as oportunidades e vínculos econômicos para a aceitação do design para o ciclo de vida [13].

Projetos de produtos que empreguem um design sustentável e que sejam desenvolvidos em equipes transdisciplinares têm muito mais chances de fazer sucesso. O design sustentável busca proporcionar qualidade de vida e recursos para as gerações futuras sem que haja a escassez para as gerações atuais quando do desenvolvimento de sistemas. Através dos princípios do design sustentável, considera-se todo o ciclo de vida do produto, desde sua produção até seu descarte passando pelo seu uso, bem como seu transporte e montagem. Já o desenvolvimento de um projeto em equipe interdisciplinar amplia a ótica do problema, agrega qualidade e possibilita a pesquisa e revisão bibliográfica de acordo com os critérios e especificidades de cada área do conhecimento, tal como a engenharia e o design. O Laboratório de Design e Seleção de Materiais – LdSM da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS viabiliza essa integração atuando em diversas linhas de pesquisa, tais como ecodesign, seleção de materiais e biônica [14,15,16].

Para ter um comportamento ecologicamente sustentável, um projeto deve considerar alternativas que visem a economia e o reaproveitamento de matérias primas. Quanto à qualidade, esses materiais ou componentes reaproveitados não deveriam ficar atrás de materiais ou componentes novos, e no caso de uma queda acentuada de qualidade, somente poderá ser cogitado seu reprocessamento. Dependendo se na nova utilização o produto satisfaz a mesma ou uma nova função, distingue-se em reutilização e continuação da utilização [17].

PIETRELLI, 1999, estudou tecnologias de separação com intuito de aumentar a reciclagem de materiais do ponto de vista econômico e ambiental, sempre buscando o desenvolvimento sustentável através de processos mais eficientes para a reutilização interna de resíduos em substituição de matéria prima [18].

Segundo PIERCE et al, 1998, reuso é definido como o uso continuado do produto, mesmo que seja para algo que não foi projetado. Para a idéia de coletar um produto e fazê-lo retornar ao processo industrial é atribuído o conceito de reciclar. Já para a idéia de coletar um resíduo contendo vários produtos e aplicar processos de separação antes de enviar ao processo industrial, é atribuído o conceito de recuperar [19].

A reutilização é caracterizada pela conservação da forma do produto é um procedimento que deve ser priorizado em relação à reciclagem, por várias razões.

Em primeiro lugar, o reuso de materiais que ainda tem potencial de utilização reduz a necessidade de reprocessamento. Em segundo lugar, a qualidade dos materiais reciclados tende a diminuir a cada ciclo de reciclagem e, a fim de garantir as propriedades adequadas para o desempenho esperado numa dada aplicação, o material reciclado precisa ser misturado em certa proporção com matéria-prima virgem, ocasionando, assim, os impactos ecológicos associados à fase de extração. E, finalmente, no reuso não existe qualquer necessidade de controle de emissões e resíduos provenientes dos processos de reciclagem.

Para a reutilização ou reprocessamento de um produto, após uma primeira fase de utilização, pode ser necessário um processo de recondicionamento que se constituiu normalmente das seguintes etapas: desmontagem completa, lavagem, teste, reutilização das partes que justifiquem sua recuperação, reparo das áreas submetidas à abrasão, retrabalho de peças ajustáveis e substituição de peças inaproveitáveis por partes novas.

Além da reciclagem, o reuso e a remanufatura de produtos ou componentes eletrônicos podem ser uma opção ecológica e econômica ainda melhor, desde que a oferta e a demanda estejam em equilíbrio [20].

A análise do ciclo de vida de um produto é muito importante para avaliar o consumo de recursos (riquezas) e a responsabilidade ambiental que está associada com um produto, processo ou atividade [21, 22].

2.2 Crescimento Populacional x Gestão de Resíduos

A humanidade gastou dezenas de milhares de anos para alcançar o primeiro bilhão de habitantes, fato ocorrido por volta de 1802. Em seguida, foram necessários mais 125 anos para dobrar a população, alcançando assim, por volta de 1927, 2 bilhões de habitantes. O terceiro bilhão foi atingido 34 anos depois, em 1961, e assim por diante. Durante este período, o homem abandonou o modo de vida que criara há cerca de 10 mil anos, com o advento da agricultura, e passou a multiplicar-se nas cidades, um mundo à parte da natureza. Foram várias as causas desta fase de rápido crescimento da população mundial. Os índices de mortalidade nos países em desenvolvimento tiveram uma queda marcante após a segunda guerra mundial; campanhas de saúde pública e de vacinação reduziram espetacularmente a doença e a mortalidade infantil.

É difícil de prever o crescimento futuro da população. As taxas de natalidade estão em geral a diminuir, mas variam muito entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento. Segundo a ONU, no ano 2000 a população mundial crescia então a um ritmo de 1,2 % (77 milhões de pessoas) por ano. Isto representou um decréscimo da taxa de crescimento em relação ao seu nível em 1990, sobretudo devido à queda das taxas de natalidade. Estima-se que antes do ano 2030 a humanidade terá alcançado o oitavo bilhão de habitantes (Figura 2) [23].

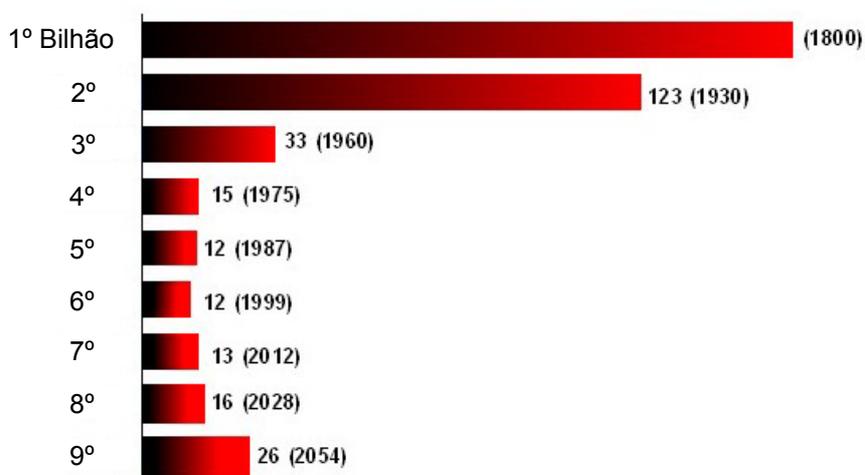


Figura 2 - Aumento da População da Terra: o número de anos necessários para atingir cada bilhão de pessoas e o ano em que foi o mesmo foi atingido [23].

O que se observa é uma dicotomia do mundo tecnológico, onde novos produtos são lançados e, conseqüentemente há uma obsolescência maior e um descarte maior. O fato é que o contínuo aumento populacional pode ter várias conseqüências negativas. Uma delas, é que com o aumento da população e desenvolvimento dos países, aumenta também a poluição produzida e, se já com a população atual os problemas ambientais relacionados com a poluição são demasiados, então se deduz que serão muito piores com uma população ainda maior e a produzir cada vez mais desperdícios; este aumento da poluição poderá implicar também na degradação de muitos ecossistemas naturais.

De acordo com MARTIN & SCHUMANN, 1999, no livro "Armadilhas da Globalização", vivemos numa sociedade 20 por 80, ou seja, uma sociedade onde 20 % da população têm emprego e os outros 80 % está ficando sem postos de

trabalho [24]. Nesta sociedade, 80 % da população consumiriam 20 % dos recursos e os outros 20 % da população consumiriam 80 % dos recursos. Caso houvesse uma educação de qualidade para os 80 % que foram visualizados como excluídos das atividades produtivas, dos benefícios trazidos pelas altas tecnologias, de participação nos bens, do lazer e da cultura, ou seja, se os 80% conseguissem consumir com o mesmo padrão dos 20 %, deveriam existir 10 planetas terra para dar conta dos recursos que tal nível de consumo iria demandar.

Tendo em vista esta tendência de aumento da população e de desenvolvimento tecnológico que acarreta um aumento na demanda por bens de consumo, tem-se a necessidade do emprego racional da gestão de resíduos. Esta possui uma hierarquia cujo objetivo é conseguir o máximo benefício prático dos produtos e gerar a mínima quantidade possível de resíduos (Figura 3) [25, 26]. Seguindo este raciocínio, a opção ambientalmente mais favorecedora será aquela mais ao topo da pirâmide. O conceito mais importante da hierarquia é a prevenção da geração de resíduos que pode ser atingida tanto por melhorias nos processos como pelo impedimento de descarte prematuro dos produtos. Por exemplo: é preferível a reutilização à reciclagem, que por sua vez será preferível à recuperação e que por sua vez também será preferível à disposição final.

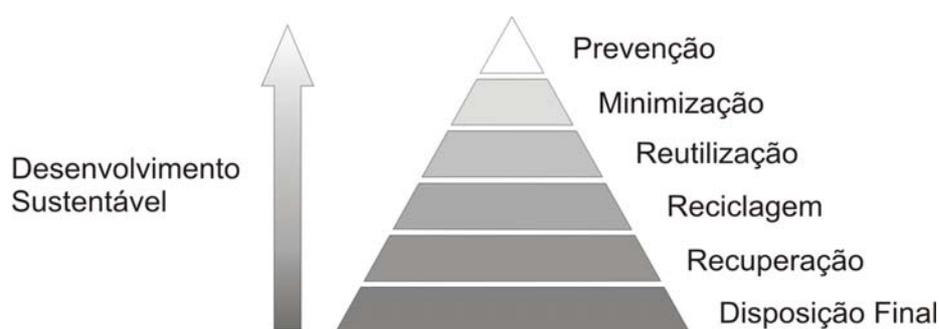


Figura 3 - O objetivo da hierarquia da gestão de resíduos: Conseguir o máximo benefício prático dos produtos e gerar a mínima quantidade possível de resíduos [adaptado de 25].

Considerando o caso das baterias recarregáveis de pequeno porte, a prevenção seria o uso adequado das mesmas, procedendo corretamente ao carregamento, de modo a otimizar a quantidade de energia armazenada e aproveitada durante o uso nos ciclos de carga e descarga. A minimização é entendida como o uso racional das mesmas, por exemplo, o desligamento

noturno dos aparelhos celulares enquanto os mesmos não são utilizados, bem como a possibilidade de redução do volume (dimensões físicas) das baterias.

A reutilização é o passo seguinte na ação de diminuição de resíduos e é onde este trabalho está focado. No caso do reuso de componentes como as baterias de telefones celulares, estas voltariam a serem utilizadas mediante uma ação de melhoria ou recondicionamento ou até mesmo sem serem modificadas se ainda forem úteis para outros usuários.

A reciclagem consiste na transformação de um resíduo numa forma novamente utilizável, enquanto que a recuperação está associada a coleta de um resíduo contendo vários produtos e na aplicação de processos de separação antes de enviar ao processo industrial. Além dos materiais, o conceito de recuperação também é aplicado referindo-se a energia e inclui opções como a incineração, por exemplo, que através da queima controlada de resíduos produz energia elétrica.

Para a reciclagem e recuperação dos metais presentes em aparelhos eletrônicos descartados, processos mecânicos, hidro e pirometalúrgicos podem ser utilizados e vem sendo estudados em diferentes partes do mundo, inclusive na UFRGS no Laboratório de Corrosão – LACOR onde são realizados projetos e trabalhos sobre reciclagem de metais de baterias e de placas de circuito impresso [27, 28]. No capítulo sobre resíduos de baterias recarregáveis, a reciclagem de baterias será abordada posteriormente de modo mais detalhado.

A incineração ou processamento em fornos industriais pode causar emissões de substâncias altamente tóxicas e, no caso do “lixo eletrônico” podem ser citadas: o mercúrio, o cádmio, o chumbo, dioxinas, furanos e PCB's. A NBR 10004 - Resíduos sólidos – Classificação lista algumas dessas substâncias com seus respectivos códigos de identificação no seu Anexo C (Substâncias que conferem periculosidade aos resíduos) e no seu Anexo D (Substâncias agudamente tóxicas) como o Mercúrio, por exemplo [29].



Figura 4 - Pilhas e baterias portáteis usadas pelo Papa-Pilhas (A) são enviadas para a recicladora onde são desmontadas com golpes de martelo (B) sem antes avaliar a capacidade das mesmas para o reuso [34].

No Brasil, pilhas e baterias portáteis usadas têm sido recolhidas por programas como o Programa Real de reciclagem de pilhas e baterias - Papa-Pilhas, o Projeto Vivo Recicle seu Celular, o Programa Claro Recicla, e o projeto Recicla TIM [30, 31, 32, 33]. Algumas empresas que fabricam ou comercializam produtos eletrônicos e que, depois de obsoletos, os entregam para outras instituições através de “obras sociais”, muitas vezes, estão apenas transferindo o “problema” que elas têm, ou seja, a responsabilidade pelo destino adequado destes resíduos, e isso, se traduz em um sistema perverso que une os resíduos humanos aos tecnológicos.

As baterias recolhidas pelos Papa-Pilhas do Programa Real de reciclagem são enviadas para a recicladora Suzaquim Indústrias Químicas Ltda., localizada em Suzano (São Paulo). Lá, as mesmas são desencapadas e seus metais queimados em fornos industriais de alta temperatura, dotados de filtros que reduzem a emissão de gases poluentes, obtendo, nesse processo, sais e óxidos metálicos, que são utilizados na indústria de refratários, vidros, tintas, cerâmicas e química em geral (Figura 4) [34].

Com o programa de recolhimento de baterias e acessórios da operadora Vivo - projeto Vivo Recicle seu Celular, a empresa faz doações à Audioteca Sal & Luz, que produz e empresta livros em áudio para pessoas com deficiência visual e ao Instituto IPÊ, que ajudam a preservar a fauna e a flora brasileiras. Os atuais parceiros da Vivo são a empresa americana Belmont Trading, que é responsável pela disposição dos materiais coletados, reaproveitando celulares considerados

semi-novos ou encaminhando todos os materiais para a reciclagem; a GM&C Soluções em Gestão Empresarial que é uma empresa responsável pela logística de coleta nas Lojas Vivo e suas revendas exclusivas. Os acessórios são encaminhados para a empresa Interamerica, de São Paulo, enquanto as sucatas e baterias são enviadas para a Umicore, empresa belga com fábrica em São Paulo que repassa para a unidade Hofors, na Suécia, onde as baterias depositadas por inteiro em um forno e passam por um processo de fundição. Na próxima fase, a parte polimérica é reaproveitada como fonte de energia e a parte metálica, que forma uma liga contendo diversos metais, é enviada para o refino em Olen, na Bélgica. Os gases resultantes do processo também são tratados em um forno de pós-combustão onde são reduzidos a gases inertes e, em seguida, lavados para a retirada de impurezas residuais. Os metais recuperados retornam ao ciclo como matéria prima para a produção de novas baterias recarregáveis para celular e outros equipamentos eletrônicos. Já as escórias são utilizadas como agregado para concreto [35].

Com seu projeto de reciclagem de aparelhos, baterias, chips e acessórios fora de uso - programa Claro Recicla, a operadora Claro mantém urnas coletoras dos materiais nas lojas da empresa, e nos seus agentes autorizados. Todo o material recolhido é enviado para recicladoras homologadas pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (Ibama) e órgãos ambientais dos estados em períodos semestrais [32].

A operadora TIM possui o projeto Recicla TIM que faz coleta seletiva dos resíduos da TIM em Pernambuco, possibilitando a reutilização de todo o material recolhido como fonte de geração de renda para comunidades de catadores de lixo e a inserção jovens carentes na sociedade, através da arte. Os parceiros da TIM neste projeto são a Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana (EMLURB) de Recife, a Cooperativa de Agentes em Gestão de Resíduos Sólidos (COOPAGRES) e o Instituto Severino Bernardino Gomes de Artes Visuais. Desde fevereiro de 2008 a operadora substituiu seu Programa Recarregue o Planeta pelo Programa Papa-Pilhas (do Banco Real), passando a enviar para o mesmo as baterias, os aparelhos e acessórios usados recolhidos nas lojas próprias e prédios administrativos em todo o Brasil [33].

Segundo a hierarquia de gestão de resíduos, a incineração e a disposição final deveriam ser as últimas opções a serem consideradas. A Figura 5 mostra um

forno industrial de alta temperatura e uma chaminé de incineração. A Figura 6 mostra um aterro sanitário e um lixão [36].

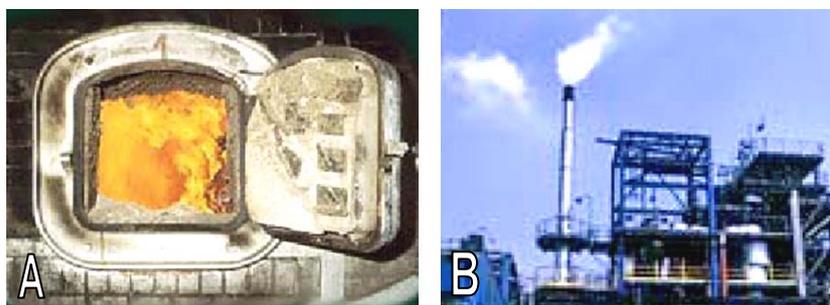


Figura 5 - Forno industrial de alta temperatura em A e uma chaminé de incineração em B [36].

Os locais onde ocorre a disposição final de resíduos sólidos incluem aterros sanitários, aterros controlados e os lixões (deposição a céu aberto). Para serem corretamente dispostos, alguns resíduos sólidos, como as baterias, precisam passar por uma estabilização, que é um processo de tratamento prévio para evitar o contato dos metais com o meio ambiente nos aterros, porém, este não costuma ser muito praticado devido ao elevado custo. Como consequência da falta de isolamento destes resíduos, quando os mesmos estão em contato com algum líquido, alguns compostos podem se dissolver e, é assim, pela exposição dos materiais a processos naturais de infiltração, que ocorre o processo de lixiviação. Como exemplo de desvantagens do uso dos aterros e lixões para descarte de baterias e outros componentes que constituem o lixo eletrônico, tem-se a possibilidade de contaminação dos lençóis freáticos com metais pesados e outras substâncias persistentes.



Figura 6 - Foto de um aterro sanitário em Minas do Leão - RS onde mais de 290 mil toneladas/ano de lixo da cidade de Porto Alegre são enterradas em A e foto de um lixão em B [36].

A Estação de Transbordo da Lomba do Pinheiro (ETLP), local onde o Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU), da Prefeitura de Porto Alegre, destina o lixo público coletado nas ruas e avenidas da cidade, para posteriormente serem transportados até a cidade de Minas do Leão, onde lá são enterrados no aterro sanitário da Sil Soluções Ambientais Ltda. O DMLU considera como sendo resíduo sólido urbano, o lixo domiciliar, o lixo público e o lixo comercial (esse último lixo é vendido pelas cooperativas de reciclagem e não vai para Minas do Leão). Para o aterro sanitário da Sil Soluções Ambientais Ltda., em Minas do Leão, são enviados somente o lixo domiciliar e o lixo público. O DMLU contratou a empresa Construrban Engenharia e Construções Ltda. para coletar o “lixo público” (parte é orgânico, parte entulho). Esse serviço de coleta de lixo público é pago por tonelada coletada. Quanto mais lixo público coleta a empresa Construrban, maior o valor da fatura no final do mês.

Como esse serviço é pago por tonelada de lixo público coletado, os caminhões da Construrban são obrigados a pesarem as suas cargas na Estação de Transbordo da Lomba do Pinheiro (o DMLU tem somente uma balança para pesagem, isso faz com que caminhões da zona norte da cidade percorram muitos km para chegarem até a ETLP, aumentando os custos com combustível). Após a pesagem dos caminhões da Construrban na ETLP, o lixo público (orgânico+entulho) é descarregado nessa estação de transbordo. De lá é transportado por meio de caminhões carretas de 50 m³ para o aterro sanitário da Sil, em Minas do Leão.

A geração de resíduos sólidos no Brasil é cerca de 0,5 kg por pessoa a cada dia. Em São Paulo, cuja região metropolitana possui 19.223.897 habitantes, e é a sexta maior aglomeração urbana do mundo, cada pessoa gera em média 1,0 kg por dia. Nas zonas urbanas quase todos os resíduos são recolhidos, porém, apenas 1,9% deste total são separados pelas coletas seletivas e enviados para a reciclagem [37, 38].

Por ano, são despejados no mercado mundial aproximadamente 230 milhões de computadores, 1 bilhão de celulares e 45,5 milhões de TVs. Os números são assustadores e ações visando a sustentabilidade, tanto dos fabricantes quanto dos consumidores de produtos eletrônicos, são fundamentais para prevenir uma crise de lixo eletrônico.

Os fabricantes de produtos eletrônicos deveriam considerar os passivos sócio-ambientais de sua produção e assumir a responsabilidade por seus produtos até o fim de sua vida útil.

Muitas empresas têm investido mais em propagandas sobre suas políticas de sustentabilidade através de um marketing “pseudo-verde” do que em ações ambientalmente sustentáveis propriamente ditas. Além disso, estes fabricantes precisam projetar produtos limpos com uma vida útil mais extensa, fáceis de reciclar e que sejam seguros para não expor trabalhadores e o meio-ambiente a elementos e substâncias perigosas.

Infelizmente, o que se observa é a falta de uma mentalidade verdadeiramente sustentável para lidar com esse entrave. No Brasil, é importante que a Lei de resíduos sólidos, que está em tramitação no congresso, exija que os fabricantes de produtos eletrônicos sejam responsáveis pelos seus produtos até a fase de descarte.

Os consumidores também precisam fazer sua parte evitando o consumo desenfreado. Muitas pessoas compram novos produtos apenas para se sentirem felizes ou mostrarem para as outras que podem ostentar produtos de marcas caras. Esta maneira de inserção social deve-se ao apelo ao consumo que está em toda parte, e representa uma “necessidade” das pessoas estarem no centro das atenções.

Segundo TONY FRY, 2005, A necessidade não pode ser vista como um objeto único. Ela pode dividir-se em outras categorias como: pobreza, fome, abrigo, segurança, desejos, vontades. As demandas humanas não se resumem apenas ao que o homem necessita para sobreviver, pois não há uma correspondência necessária entre as “necessidades” reais e as representações das “necessidades”. A “necessidade” é a realização do que é vital para que o sujeito humano possa “ser” [39].

Tais como são, as necessidades não podem mais se definirem apenas como desejos inatos; elas são mais bem definidas como funções induzidas (no indivíduo) pela lógica interna do sistema, como uma força produtiva requerida para o funcionamento do sistema em si, pelo seu processo de reprodução e sobrevivência. Em outras palavras, só existem “necessidades” porque o sistema “necessita” delas. Este “sistema” é o desigual sistema sócio-cultural e econômico

no qual todas as pessoas se encontram, independente de quem sejam ou tipo de vida levam.

O sistema de objetos requer que a “necessidade” seja desejada, e, assim, fabrica o desejo, o qual posteriormente irá satisfazer como sendo “necessidade” a ser preenchida pela entrega de commodities, que “necessitam” ser “necessitadas”.

O fundamento para um questionamento moderno de “necessidade” deve ser encontrado na análise de época do capital. Segundo KARL MARX, 1973, a produção não apenas provê o material para a “necessidade”, mas também provê uma “necessidade” para o material... A “necessidade” que o consumo sente pelo objeto é criada pela sua percepção... a produção não apenas cria um objeto para o sujeito, como também um sujeito para o objeto [40].

O design, enquanto ação que transforma o artificial, é sempre gerador de “necessidades”. Um dos pré-requisitos para evitar o aumento da crise ambiental, será uma reavaliação rigorosa das “necessidades” de consumo, e para que isto seja possível, a desconstrução das fundações aparentes das “necessidades” deverá tornar-se um fato largamente integrado ao pensamento do design.

As pessoas podem fazer sua parte: pensando se realmente precisam de novo produto antes de comprar um; apoiando empresas que fazem produtos limpos; devolvendo os equipamentos aos fabricantes quando não precisarem mais deles.

2.3 Recuperação de Materiais ao Final da Vida Útil de Eletro-Eletrônicos

Muitos equipamentos eletrônicos são descartados junto ao lixo doméstico, e assim, desperdiçando tanto materiais valiosos como poluindo o meio ambiente. Com exceção dos grandes aparelhos conhecidos como “linha branca” (geladeira, fogões, etc.), cujos materiais são reutilizados pela indústria de produção secundária de metais, os equipamentos menores são geralmente depositados em aterros sanitários ou queimados sem nenhum tratamento prévio [41].

O impacto ecológico dos EEE, quando não tratados apropriadamente após a sua fase de uso, e a perda econômica proveniente da não valorização da economia de ciclo, são imensos. Somente na Europa, no ano de 2003, 8 milhões de toneladas de EEE são descartadas anualmente e o número mundial de

celulares obsoletos já era estimado como sendo superior a 500 milhões de unidades [42].

O desperdício de materiais, devido à desconsideração do ciclo de vida nos projetos de produtos, tem prejudicado o desenvolvimento sustentável. A preocupação com o fim da vida útil confere aos produtos um maior valor agregado, porém, a escassez de informação sobre o assunto, bem como de material de pesquisa disponível, têm dificultado o desenvolvimento de produtos ecologicamente corretos e economicamente viáveis.

Uma maneira de minimizar esse problema é através da aplicação do ecodesign que considera: os problemas ambientais nas atividades projetuais, a concepção de desmontagem dos produtos, a separação dos materiais e, com isso, viabiliza o reuso, a reciclagem e a correta disposição final dos mesmos, evitando o desperdício e contribuindo para a melhoria da qualidade de vida em um meio ambiente mais saudável [43].



Figura 7 - Atuação do Ecodesign na minimização da degradação ambiental [desenvolvido pelo autor].

De acordo com os princípios do ecodesign, os elementos de junção utilizados nos produtos devem facilitar tanto a montagem como a desmontagem dos seus componentes, eliminando a contaminação entre diferentes tipos de materiais e permitindo o reaproveitamento de componentes nos mais altos níveis de energia e trabalho incorporados [44].

Atualmente a desmontagem de muitos produtos se inviabiliza economicamente devido à dificuldade de completá-la e ao tempo despendido para tanto, pois não é considerada nas fases iniciais dos respectivos projetos.

A indústria tem a responsabilidade de fabricar seus produtos de modo a minimizar o impacto ambiental e conservar os recursos naturais. É fundamental

pensar em produtos ecologicamente corretos, aumentar a capacidade de uso, de reuso e da reciclagem dos materiais. Na concepção do projeto de produto, através do estudo dos elementos de junção, mudanças podem ser feitas com um baixo custo para viabilizar a desmontagem e facilitar a montagem.

Tendo em vista que quando se utilizam junções mecânicas, o número de peças de um produto geralmente é proporcional ao custo de montagem do mesmo, uma boa estratégia é minimizar o tempo necessário de montagem através de um redesign criativo e da aplicação do design para montagem (DfA - *design for Assembly*) [45,46].

Segundo SALUSTRI, 2005, o objetivo do projeto para montagem (DfA) é simplificar o produto para que o custo de montagem seja reduzido. Entretanto, como consequência da aplicação do DfA, normalmente tem-se melhor qualidade e confiabilidade, e uma redução do inventário na produção de peças e equipamentos [47]. Dentre suas diretrizes destacam-se a redução do número de componentes e a eliminação de fixadores.

Embora a maioria dos produtos possa ser eventualmente desmontada, se estas operações forem demoradas, não são economicamente viáveis, uma vez que o custo de desmontagem é susceptível de ser muito maior do que as receitas obtidas através da reciclagem dos materiais e componentes do produto. É por esta razão que o design de produtos de fácil desmontagem tem aumentado de popularidade permitindo que mais produtos possam ser reciclados economicamente [48].

KAHMEYER e LEICHT, 1991, do Instituto Fraunhofer na Alemanha (FhG) destacaram a desmontagem como uma área para examinar a legislação da eliminação de resíduos como forma de incentivar o recolhimento “*take back*” dos produtos pelos fabricantes (*original equipment manufacturer - OEM*). Este trabalho tem contribuído para uma mudança no pensamento dos designers com regras desenvolvidas em uma abordagem metodológica na FhG para serem utilizadas na avaliação da facilidade potencial de desmontagem de produtos [49, 50].

BEARDSLEY et al, 1993, abordaram o problema da desmontagem do ponto de vista do DfA, realizando análise similares dos produtos para analisar teoricamente seus números mínimos de peças antes de fazer o redesign [51]. Existem também outros grupos de pesquisa estudando o DfD através da

abordagem DFA na Universidade de Rhode Island [52, 53] e também na Ohio State University [54].

Um método rápido e econômico de unir partes é através do uso de elementos de junção chamados *snap-fits*. Dentre as razões para sua utilização, podem-se citar: a redução dos custos de montagem, a facilidade de montagem, a vantagem de dispensar chaves de fenda, parafuso e arruelas, de não necessitar soldagem ou adesivos, de serem modelados como parte integral da peça, e de poderem ser desmontados.

O design de um *snap-fit* pode proporcionar desde juntas de fácil separação até juntas praticamente inseparáveis. A resistência da junta, por sua vez, depende do material usado, sua geometria e as forças atuantes na junta. Para um adequado dimensionamento de um *snap-fit* é importante conhecer: o carregamento mecânico que será aplicado nas juntas após a montagem, as tensões e deformações requeridas durante a montagem, o número de vezes que a junta *snap* será montada e desmontada, e as propriedades mecânicas do material que será usado [55, 56].

2.4 Linhas de Desmontagem

As atividades de desmontagem são realizadas em vários processos incluindo remanufatura, reciclagem e disposição final. Os projetos de produtos que possibilitem a desmontagem tornam mais ágeis e econômicos os processos de separação dos componentes e os materiais [57].

A separação das partes facilita a manutenção, os reparos, a atualização e o condicionamento dos produtos. As razões ambientais para adoção desta estratégia aumentam a possibilidade da separação dos materiais incompatíveis, tóxicos e danosos, permitindo, assim, a reutilização, reciclagem, compostagem e incineração [13].

Segundo MANZINI, 2002, existem dois tipos de desmontagem: por entropia e por danificação das partes. No primeiro, ocorre a decomposição de um produto que possui um único conjunto e vai até o desdobramento final com todas as partes. No segundo, é necessário causar certa danificação. Esta pode ser

pequena, com possibilidade de recuperação, ou até um grande grau de danificação, sendo este caso, propício para posterior reciclagem da matéria prima [13].

Nos processos de desmontagem de um único produto, tanto o produto quanto o procedimento são pré-definidos e quase invariáveis. Geralmente esses produtos voltam à fábrica de origem. Já nos processos de desmontagem de vários produtos, há uma necessidade de grande flexibilidade para organizar a logística dos fluxos dos diferentes componentes e peças dos produtos e, geralmente, esses processos são realizados por empresas especializadas em reciclagem.

A desmontagem pode ser em células ou em linha. Na desmontagem em células, a separação dos materiais é realizada em um mesmo local e com apenas um operador (humano ou robô). Este sistema apresenta limites quanto à quantidade de containers que podem ser usados pelo operador no momento da seleção. A Figura 8 mostra uma célula de desmontagem de seleção múltipla esquemática.

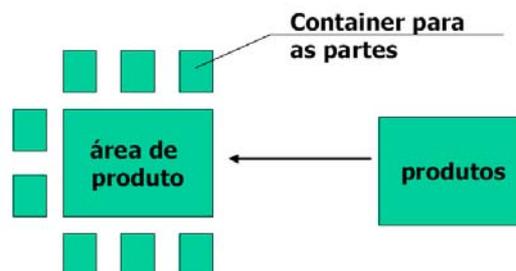


Figura 8 - Célula de desmontagem de seleção múltipla esquemática [13].

Na desmontagem em linha, há várias estações de trabalho de desmontagem produzindo variados fluxos de trabalho. Neste caso, não existe um número determinado de elementos para processar a desmontagem. A Figura 9 mostra uma linha de desmontagem esquemática.

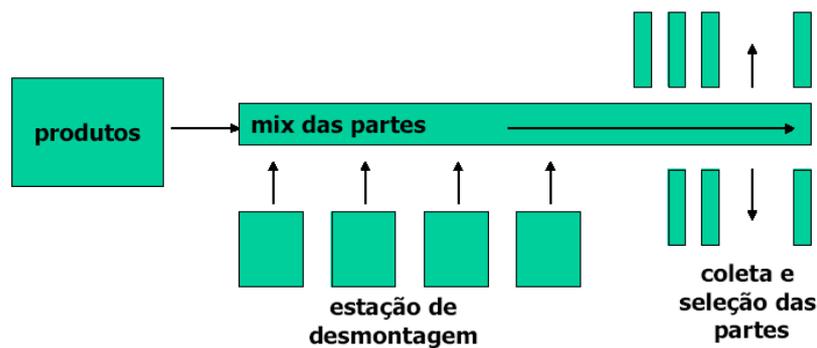


Figura 9 - Linha de desmontagem esquemática [13].

Nos casos de produtos mais complexos, para acelerar o processo de desmontagem, a implementação de um sistema paralelo de desmontagem torna a operação mais eficiente. Esse sistema pode ser espacial ou temporal. No primeiro, as várias partes e os subconjuntos do produto podem ser removidos separadamente, com diversos operadores trabalhando na desmontagem de um mesmo produto. No segundo, após a separação dos subconjuntos, os mesmos são encaminhados para uma estação ou para uma determinada linha de desmontagem.

A desmontagem ainda pode ser automatizada, porém, este sistema requer uma flexibilidade suficiente para poder acompanhar a grande variedade de produtos existentes, bem como uma adaptabilidade, já que a configuração de um produto que será desmontado pode variar devido à sua idade, à sua modalidade de uso e, também, ao seu estado de conservação.

2.5 A evolução do Telefone e o Surgimento do Celular

O telefone consiste basicamente num dispositivo de comunicação entre dois indivíduos. É constituído de três subsistemas: um que converte sinais sonoros em elétricos, um que transmite esse sinal por algum meio possível, e outro subsistema que re-converte os sinais elétricos em sonoros. Sua função e a maneira de alcançá-la têm sido fortemente mudadas desde Alexandre Graham Bell (1847- 1916).

A Figura 10 mostra em uma linha do tempo como os telefones têm evoluído [58]. O telefone de 1900, mostrado em (A), era feito em grande parte de madeira;

só as partes que conduziam eletricidade ou que respondiam a um campo magnético eram metálicas. No fone de tulipa (B), padrão de 1901 a 1925, a madeira foi substituída por um material metálico: uma base de ferro fundido levanta uma coluna de ferro ou latão, apoiando o bocal e o receptor que era longo e feito de latão. Era praticamente tudo metálico com exceção do bocal que era de bakelite.

No início da transição aos polímeros, o telefone (C) de 1928-1970 (um projeto de Ericsson de vida extraordinariamente longa) utilizou ímãs com maiores forças coercitivas, permitindo, assim, que o pedaço – parte da orelha fosse menor. Seu corpo foi moldado com bakelite, mas ainda com uma base em liga metálica parafusado a ele. Há uma redução em peso e, presumivelmente, uma economia em custos de fabricação. Nos telefones de 1970-1975 (D) a base ainda é de material metálico, porém é utilizada uma quantidade bem menor de parafusos para prendê-la. O potencial dos polímeros começa a ser bem explorado apenas nos fones a partir de 1982, como mostrado em (E). Eles são utilizados em presilhas moldadas, dobradiças elásticas e nos apoios para as teclas sensíveis ao toque. Tanto a cobertura como a base são ABS moldados por injeção conferindo boa rigidez apesar do baixo módulo do polímero.



Figura 10 - Linha do tempo dos telefones: (A) Circa de 1900; (B) de tulipa de 1920-1928; (C) 1º telefone da Ericsson de 1928-1970; (D) telefone do período de 1970-1980; (E) telefone de 1982-1992 [58].

O antecessor do telefone celular foi o rádio-fone usado em carros primeiramente pela polícia e outros veículos de emergência no início de 1940 nos Estados Unidos. Este apresentava limitações, como poucos números de canais e a necessidade de uma alta quantidade de energia para transmissões de longo alcance. Além disso, o equipamento era extremamente pesado.

O serviço de telefonia celular comercial foi introduzido em 1983 nos Estados Unidos quando a Motorola lança o primeiro celular portátil, o DynaTac 8000x e, desde então, o uso de celulares não parou de crescer. O preço desse aparelho, que custava cerca de U\$ 3.995 (bem alto se comparado aos valores atuais), não significou uma barreira para os consumidores da época, já que muitos se inscreveram em grandes listas de espera pelo aparelho. A novidade causou uma explosão de consumo instantânea, além disso, desencadeou uma acirrada disputa entre as empresas de telefonia, que passaram a investir pesadamente em tecnologia, sempre visando melhorias na quantidade e na qualidade dos seus produtos e serviços oferecidos, e inclusive à redução do custo final, tornando a nova tecnologia acessível a uma quantidade cada vez maior de consumidores.

Os telefones celulares são dispositivos eletrônicos digitais de alta complexidade capazes de realizar milhões de operações lógicas por segundo. Eles são usados para aumentar a capacidade do telefone sem fio que funciona apenas em curtas distâncias através do envio de sinais entre uma base e o aparelho de telefone. O sistema celular divide áreas geográficas numa rede de pequenas células disponibilizando centenas de frequências e permitindo que milhões de pessoas possam usar o sistema simultaneamente. Por causa da pequena quantidade de energia necessária para a transmissão, as baterias podem ser pequenas.

Esses fatores, e a diminuição contínua do tamanho e peso dos componentes eletrônicos, nas últimas três décadas, combinaram-se para difundir e tornar comum o uso dos telefones celulares portáteis nos anos 90. Dos primeiros celulares aos atuais, a qualidade só melhorou, e o custo reduziu-se a ponto de tornar o telefone celular um dos produtos mais populares da atualidade, acessível à população de baixa renda, permitindo acesso a um aparelho de comunicação extremamente avançado.

Impulsionados pelos avanços tecnológicos e para facilitar ainda mais os afazeres dos usuários, os celulares tendem a combinar cada vez mais as funções (convergência tecnológica) dos outros aparelhos (televisões, tocadores de música e vídeos, agendas eletrônicas, calculadoras, relógios, câmeras fotográficas). Seguindo esta evolução, alguns celulares chamados *smartphones*, agora agregam funções antes restritas aos computadores pessoais. Eles oferecem

capacidades avançadas, executam um sistema operacional mais complexo que permite ao usuário rodar programas para os mais diversos fins. São aplicativos de e-mail, leitores de PDF, visualizadores de fotos, editores de texto, calculadoras científicas, câmeras fotográficas e de vídeo, jogos eletrônicos, gerenciadores de redes sociais, navegadores de internet, mapas digitais e muitos outros. Outra característica marcante é a possibilidade de escrever textos utilizando teclados completos, como os de computador, seja deslizando um teclado especial da parte de trás do telefone, seja escrevendo diretamente na tela com uma caneta própria ou mesmo digitando com os dedos em um teclado virtual. A Figura 11 apresenta uma linha do tempo com uma montagem feita pelo autor da evolução dos telefones celulares. Ela mostra desde o primeiro celular comercial portátil, o DynaTac 8000x que chegou a receber o apelido de "tijolo" devido tanto ao tamanho quanto ao peso, até o Nokia N97 que chegou ao mercado brasileiro no início do mês de setembro como concorrente do iPhone, da Apple e possui, além da lista de recursos obrigatórios para celulares dessa categoria, como: Wi-Fi, 3G, Bluetooth e GPS, traz 32GB de memória interna (expansíveis até 48GB), e uma câmera de 5.4 MP de qualidade superior à da maioria dos concorrentes diretos.



Figura 11 – Linha do tempo com a evolução dos Telefones Celulares: do 1º celular comercial portátil, até o considerado um dos mais completos da atualidade [desenvolvido pelo autor].

Os celulares emitem baixos níveis da chamada radiação eletromagnética não-ionizante. Esta radiação é muito mais leve do que a ionizante, emitida por radiografias, máquinas de radioterapia e tomografias computadorizadas, por exemplo. Todo aparelho de celular é classificado segundo os níveis de radiação eletromagnética que emite. Esse nível de absorção específica (*Specific Absorption Rate* - SAR) reflete a quantidade máxima de energia absorvida pelo corpo ao usar um telefone celular. Quanto maior o SAR, mais radiação seu corpo estará absorvendo. Em alguns lugares do mundo, os fabricantes são obrigados a divulgar o número no próprio manual do telefone ou no site da empresa. No Brasil, já há regras para que as empresas também divulguem aos consumidores o nível dos aparelhos, mas isso ainda vem sendo implementado. A recomendação da Comissão Internacional para a Proteção contra Radiação Não-Ionizante (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) - ICNIRP) é que o limite de SAR seja, no máximo, 2 W/kg. Na prática, a quantidade de energia emitida pelo celular depende de quão forte é o sinal. Quanto mais forte ele for, menos energia o aparelho precisa para se comunicar e, conseqüentemente, menor a proporção de SAR. Assim sendo, uma maneira de reduzir o nível de exposição à radiação é somente usar o telefone quando o sinal estiver forte. É possível reduzir o seu nível de exposição ao falar no celular evitando usar o telefone se o sinal estiver fraco. O ideal é procurar uma localização melhor para fazer a ligação como em ambientes externos ou próximos a uma janela [59].

Ainda não existe prova conclusiva de que o uso de telefone celular eleve o risco de tumores. Muitos estudos afirmam que as emissões eletromagnéticas podem causar no máximo uma elevação na temperatura corporal. Porém é errado pensar que a radiação é a única culpada pelo calor produzido na região do ouvido quando se utiliza o telefone celular. Boa parte do aquecimento é consequência direta da proximidade do aparelho com o rosto, apenas. Além disso, a bateria também pode contribuir para com o aumento de temperatura nessa região, pois normalmente esquenta após o uso prolongado [60].

2.5.1 Divisão de mercado de telefones celulares

O mercado mundial de telefones celulares alcançou uma nova era com uma produção de aproximadamente 1222 milhões de unidades no ano de 2008, o

que equivale a um crescimento de aproximadamente 7% em relação ao ano de 2007. A Nokia mais uma vez liderou a venda de aparelhos no ano, seguida da Samsung em segundo lugar no ranking. A Tabela 3 lista uma comparação do crescimento de 2005 a 2008 entre as maiores empresas fabricantes de telefones celulares [6].

No Brasil, as principais fábricas de telefones celulares estão concentradas na Zona Franca de Manaus e em São Paulo conforme lista a Tabela 2.

Tabela 2 - Localização dos principais fabricantes de telefones celulares no Brasil.

Localização	Fabricantes
Amazonas (Zona Franca de Manaus)	Nokia, Samsung, Siemens (BenQ), Gradiente, Vitelcom e Evadin
São Paulo	Motorola, Sony Ericsson, LG, Samsung, Telemática (Venko), Kyocera e Huawei

Em relação à política dos fabricantes quanto à destinação correta e a reciclagem de seus produtos, o Greenpeace, organização não governamental, elabora trimestralmente um ranking verde de eletrônicos que apresenta a classificação dos 18 principais fabricantes de computadores, telefones celulares, entre outros aparelhos eletrônicos, de acordo com as políticas dos fabricantes em relação aos seus produtos descartados. Sua primeira edição aconteceu em agosto de 2006 e a Tabela 4 lista uma síntese da versão 11 de março de 2009 com os fabricantes de telefones celulares [61].

Tabela 3 - Comparação do crescimento (em milhões de unidades vendidas e divisão de mercado) de 2005 a 2008 entre as maiores empresas fabricantes de telefones celulares [6].

	2005		2006		2007		2008	
Nokia	265	31,80%	348	34,30%	437	38,20%	468	40,90%
Samsung	103	12,30%	119	11,70%	161	14,10%	197	17,20%
Motorola	146	17,50%	217	21,40%	159	13,90%	100	8,70%
Sony Ericsson	51	6,10%	75	7,40%	103	9,00%	97	8,40%
LG	55	6,60%	64	6,30%	81	7,00%	101	8,80%
Outros*	213	25,60%	192	18,90%	212	17,70%	223	19,50%

Tabela 4 - Síntese da versão 11 de março de 2009 do ranking verde de eletrônicos com os fabricantes de telefones celulares [61].

Posição	Nota	Fabricante	Políticas adotadas em relação aos seus produtos descartados
1	7,5	Nokia	Continua bem conceituada devido ao seu programa de recolhimento voluntário de resíduos, bem como por seus critérios para a eliminação de substâncias tóxicas e por seu compromisso em reduzir as emissões de gases de efeito estufa.
2	6,9	Samsung	Apresentou progresso na eliminação de substâncias tóxicas, boas taxas de reciclagem de seus resíduos eletrônicos e melhora no seu resultado ao apoiar a redução de energia nos níveis requeridos mundialmente.
3	5,7	Sony Ericsson	Caiu uma posição por perder pontos devido a sua limitada definição do princípio da responsabilidade individual do produtor. Obteve uma pontuação relativamente elevada nos critérios energéticos.
4	5,6	Philips	Subindo posições graças a sua participação ativa no desenvolvimento de sistemas de reciclagem e aos seus mecanismos financeiros de apoio à responsabilidade do produtor. Também apresentou bons resultados nos critérios sobre substâncias tóxicas.
5	5,5	LG Electronics	Permanece nesta posição já que perde alguns pontos por não apoiar o princípio da responsabilidade individual na Europa, se qualifica bem em outros critérios, pois oferece um programa sobre resíduos eletrônicos e por apoiar a redução das emissões globais.
6	5,3	Motorola	Baixa uma posição. Está razoavelmente bem tanto em matéria de eficiência energética e de poluentes bem como em relação as taxas de reciclagem com programas de recuperação e reciclagem em 73 países.
7	4,3	Panasonic	Pontua mal em todos os critérios sobre resíduos eletrônicos e relativamente bem no que diz respeito aos critérios de substâncias poluentes, obtém um ponto adicional em relação ao consumo de energia, por apoiar cortes nas emissões de gases de efeito estufa.

2.5.2 Desmontagem dos Telefones Celulares

Uma das dificuldades encontradas na desmontagem dos celulares é que há centenas de modelos diferentes de cada tipo de aparelho, e cada modelo pode ter diferentes componentes e requisitos para a desmontagem. Além disso, é frequentemente difícil de identificar o modelo específico de um produto, apenas olhando para ele. Para resolver este problema SAAR, 2004, desenvolveu um sistema de demonstração que liga os códigos de barras existentes nos produtos a locais na rede contendo suas respectivas informações sobre desmontagem, gerando, assim, um banco de dados. Através da leitura do código de barras que

já estão nos produtos, o reciclador pode determinar com exatidão o modelo do aparelho e automaticamente ver a informação correta sobre a desmontagem sem a necessidade de nenhuma digitação manual [62].



Figura 12 - Dispositivos para desparafusar, cortar o invólucro, remover a tampa e demais elementos de junção dos componentes [63].

Num trabalho de automação da desmontagem de celulares desenvolvido na Europa, um robô é programado para remover a bateria, ler o código de barra e, assim, identificar o modelo de celular, o número, o tipo e a posição de parafusos e encaixes. Deste modo, o robô pode executar a desmontagem automaticamente de acordo com o procedimento mais adequado para cada aparelho (Figura 12) [63]. Contudo, apesar das facilidades de identificação dos modelos de celulares em bancos de dados através da leitura dos códigos de barras, pode se observar que, pelo uso de corte por fresamento para abertura de invólucros nas operações de desmontagem empregadas nestes trabalhos, que a aplicação do ecodesign para montagem e desmontagem dos aparelhos não têm sido prevista pelos fabricantes de celulares de forma efetiva.

Em outro trabalho, onde foram empregados conceitos de reuso de componentes de telefones celulares descartados, se utilizaram alto-falantes viva-voz em um projeto de uma caixa de som desmontável com base no ecodesign [64].

2.5.3 Impactos ambientais dos telefones celulares

De acordo com um estudo da Universidade da Flórida, onde a composição de diversos celulares foi analisada, a composição média encontrada sem a bateria foi de 45% de plásticos, 40% de placa de circuito impresso, 4%, display de

cristal líquido (LCD), placa de 3% de magnésio, e 8% de outros metais. Nestes componentes são encontradas as seguintes substâncias tóxicas: chumbo, retardantes de chama bromados, berílio, arsênio, cádmio, cromo hexavalente e antimônio [65].

O Chumbo tem sido amplamente utilizado em EEE como o principal método para fixação de componentes das placas de circuito impresso, através do uso de soldas com chumbo e é tóxico tanto para os seres humanos como para o meio ambiente. É um contaminante comum e pode impactar negativamente os ecossistemas. Nos seres humanos, afeta o sistema nervoso central, sistema imunológico e vascular, rins e sistema endócrino, sendo também um possível agente cancerígeno. Ele se acumula no ambiente e tem efeitos crônicos sobre microrganismos, plantas e animais. Embora progressos tenham sido realizados para diminuir ou eliminar o chumbo de telefones celulares, ele permanece, junto com outras toxinas, em grande parte dos aparelhos que atualmente estão sendo descartados [65].

Os retardantes de chama bromados podem ser persistentes, bioacumuláveis e tóxicos. Além disso, eles podem lixiviar para o solo e águas subterrâneas de aterros. A presença de cobre, largamente utilizado em placas de circuito impresso, aumenta o risco de retardantes bromados formarem dioxinas e furanos durante o processo de incineração [10].

Outro elemento tóxico em telefones celulares é o berílio, normalmente usado em ligas de cobre-berílio para aumentar a flexibilidade e resistência em componentes, como contatos e molas. Os maiores riscos do berílio ocorrem nas instalações de fabricação e reciclagem, onde o pó ou a fumaça expõem os trabalhadores se inalado, podendo causar uma cicatriz permanente nos pulmões, mesmo levando anos após a exposição inicial, e ser fatal [66].

Arsênio pode causar danos ao sistema nervoso, pele e sistema digestivo, podendo causar até mesmo a morte quando ingerido em altos níveis. O telefone celular comum contém semicondutores de gálio-arsênio que são inofensivos durante a utilização, mas criam um composto tóxico quando são incinerados.

O cádmio, que é empregado em alguns semicondutores, é um metal pesado que produz efeitos tóxicos nos organismos vivos, mesmo em concentrações muito pequenas e, uma vez absorvido é fortemente retido. Uma importante descarga do cádmio para o meio ambiente é através da incineração de

lixo doméstico misturado com EEE. Isso gera a exposição do cádmio aos humanos por inalação provocando danos aos rins e severos danos aos pulmões, tais como enfisema pulmonar.

Cromo hexavalente (elemento cromo no estado de oxidação +6) é reconhecido como um carcinogênico humano via inalação. O antimônio é um semi-metal usado junto seus compostos para a construção de diodos, detectores infravermelhos. Geralmente são empregados para dar resistência contra o fogo, porém, o antimônio e muito dos seus compostos também são tóxicos.

Os componentes básicos dos telefones celulares são:

- a. A placa de circuito impresso (PCI);
- b. O painel de cristal líquido ou *liquid-crystal display* (LCD);
- c. O carregador.¹
- d. O alto-falante, o microfone e a antena;
- e. Teclado e invólucro;
- f. A bateria;

a. A placa de circuito impresso (PCI)

A PCI do telefone celular acomoda e conecta todos os componentes elétricos e eletrônicos que constituem o próprio dispositivo, tais como circuitos integrados e capacitores conectados ao circuito (primeiramente feito de cobre) que são soldados na placa e segurados por camadas adesivas e protetoras. A placa geralmente é feita de resina epóxi e fibras de vidro.

A composição média de uma PCI, por peso, é de um terço de cerâmicos e vidros, um terço de plásticos e um terço de metais. Além de cobre e ouro (os mais valiosos em celulares), as PCI's contêm uma variedade de outros metais preciosos e substâncias perigosas, incluindo arsênico (em chips feitos de arsenato de gálio), antimônio, berílio, retardantes de chama bromados, cádmio, chumbo (usado nas soldas), níquel, paládio, prata, tântalo e zinco. De todos os materiais contidos nas PCI's, os que causam o maior impacto ambiental são: o chumbo, o cádmio e os retardantes de chama bromados.

¹ Componente externo ao aparelho.

b. O LCD

O display de cristal líquido é um componente que mostra as informações para os usuários e que é crucial na maioria dos equipamentos eletrônicos. Ele contém cristal líquido entre camadas de vidro, luz de fundo para a iluminação e transistor para energizá-lo. As substâncias usadas como cristais líquidos possuem vários níveis de toxicidade, mas geralmente, em telefones celulares os níveis apresentados não são elevados. Além disso, o tamanho reduzido dos mesmos contribui para diminuir a periculosidade destes resíduos.

c. O carregador

Os carregadores de baterias têm aproximadamente o mesmo peso e volume dos celulares e, geralmente, não são intercambiáveis entre os diferentes fabricantes e modelos de celulares. Isso acarreta na geração de uma grande quantidade de resíduos. Eles consistem principalmente de fios de cobre cobertos de plástico, mais materiais como ouro e componentes tóxicos como cádmio. Retardantes de chama bromados geralmente também estão presentes.

d. O alto-falante, o microfone e a antena

A maioria dos outros componentes do telefone são muito pequenos: o alto-falante é do tamanho de uma moeda, o microfone não é maior que uma bateria de relógio e a antena, nos modelos mais modernos, é interna ao aparelho e nem se vê pelo lado de fora. Contudo, estes também contêm metais pesados e materiais perigosos.

e. Teclado e invólucro

O teclado e o invólucro são feitos de material polimérico, geralmente de policarbonato (PC) ou acrilonitrila butadieno estireno (ABS) ou uma combinação dos dois. A reciclagem destes plásticos é dificultada ou até mesmo impedida pela presença de aditivos, particularmente os retardantes de chama bromados.

f. Bateria

O estudo das baterias, por ser de grande relevância para este trabalho, será abordado em vários dos próximos capítulos, onde são abordados, por exemplo, os componentes e classificação de células e baterias, o design de baterias recarregáveis, os materiais, a composição, os resíduos e o ciclo de vida das baterias usadas em telefones celulares.

2.6 Baterias

Bateria é um dispositivo que transforma a energia química armazenada nos materiais ativos em energia elétrica através de uma reação eletroquímica de oxidação-redução (redox). No caso dos sistemas recarregáveis, a baterias é recarregada pelo processo reverso. Esse tipo de reação envolve a transferência de elétrons de um tipo de material para outro através de um circuito elétrico.

A primeira bateria foi criada por Alessandro Volta, em 1800. Para criar essa bateria, ele fez uma pilha de camadas alternadas de zinco, impregnado com uma mistura de sais e prata. John Daniell, em 1837, desenvolveu uma célula que produziu uma corrente mais constante que a de Volta. Ela consistia em placas de cobre e zinco e sulfatos de cobre e zinco, onde os eletrodos estão em compartimentos separados e uma ponte salina é responsável pelo fechamento do circuito elétrico.

Em 1859, o físico francês Planté Gaston inventou a primeira bateria recarregável. A química da mesma era baseada em chumbo ácido, sistema que ainda hoje é usado. É a mais econômica para aplicações onde o peso é de pequena preocupação, como luzes de emergência e no-breaks.

Em 1868, o engenheiro francês George Leclanché inventou a pilha seca que é a precursora das modernas pilhas comuns de uso tão diversificado. A expressão pilha seca é apenas uma designação comercial criada para diferenciar este tipo de pilha (revolucionário na época) das pilhas até então conhecidas, que utilizavam recipientes com soluções aquosas.

Tecnologia de baterias alcalinas de níquel iniciou em 1899, quando Waldmar Jungner inventou a bateria de NiCd. Os materiais eram caros em

comparação com outros tipos de baterias disponíveis o que limitou seu uso na época apenas a aplicações especiais. Em 1947, com avanços nas pesquisas, Neumann conseguiu construir a primeira bateria selada de NiCd [67].

Em 1956 a *Union Carbide Corporation* desenvolveu a primeira bateria primária alcalina. Em comparação com a pilha comum ela é mais cara, mas apresenta vantagens: mantém a voltagem constante por mais tempo, dura cerca de cinco vezes mais, é capaz de fornecer correntes mais elevadas, além de oferecer um período de armazenamento de até quatro anos. Apesar de serem ambas compostas de dióxido de manganês e zinco, na pilha comum, a mistura eletrolítica é de cloreto de amônio (sal ácido). Já na alcalina, o eletrólito é de hidróxido de potássio ou de sódio que é melhor condutor eletrolítico, resultando em uma resistência interna muito menor do que na pilha comum.

Componentes das células e baterias

Enquanto o termo “bateria” é frequentemente usado, a unidade eletroquímica básica que nos referimos é a “célula” a qual é constituída por cátodo, ânodo e eletrólito. Bateria consiste em uma ou mais células associadas em série e ou paralelo, dependendo da voltagem e da capacidade desejadas.

Para aumentar a voltagem de operação da bateria, suas células são associadas em série, já para aumentar a capacidade são ligadas em paralelo. Neste tipo de ligação, é importante que a corrente seja homogênea, mas mesmo que inicialmente às vezes possa haver certa diferença na voltagem entre as células, com pouco tempo de funcionamento o nível de voltagem das mesmas tende a se equalizar.

A célula consiste em três principais componentes:

1. Ânodo ou eletrodo negativo: sofre a reação de oxidação durante o processo de descarga (uso) da bateria.
2. Cátodo ou eletrodo positivo: sofre a reação de redução durante o processo de descarga (uso) da bateria.
3. Eletrólito (condutor iônico): serve como meio para transferência de carga (íons) entre o ânodo e o cátodo e deve ser um bom condutor iônico.

A combinação mais vantajosa entre os materiais do ânodo e do cátodo é aquela que for a mais leve e resultar em altas voltagens e capacidade para a

célula. Em um sistema prático, o ânodo é selecionado com as seguintes propriedades em foco: eficiência como um agente redutor, alta saída de carga específica (Ah/g), boa condutividade, estabilidade, fácil fabricação, e baixo custo. O Lítio, metal mais leve, com uma alta equivalência eletroquímica, tornou-se um ânodo muito atrativo e conveniente, de modo que eletrólitos compatíveis e design de células têm sido desenvolvidos para controlar sua atividade.

O cátodo precisa ser um eficiente agente oxidante, ser estável quando entrar em contato com o eletrólito, e ter uma voltagem de trabalho útil. Os materiais mais comuns utilizados como cátodos são os óxidos metálicos. Outros materiais de cátodos, tal como elementos da série dos halogênios, enxofre e seus óxidos, são usados como cátodos em sistemas especiais de baterias.

O eletrólito precisa ter uma boa condutividade iônica, mas não pode ser um condutor elétrico, pois neste caso causaria um curto circuito. Outras propriedades importantes são: não ter reatividade com o material dos eletrodos, ter pequena variação nas propriedades com a variação de temperatura, ser de fácil manuseio, e de baixo custo.

Fisicamente, o ânodo e o cátodo são isolados eletronicamente na célula para prevenir curtos-circuitos internos, mas são rodeados pelo eletrólito. No design da célula, um material é usado para separar mecanicamente o ânodo e o cátodo. No entanto, para manter a condutividade iônica desejada, o separador é permeável para eletrólito.

A célula pode ser fabricada de várias formas e configurações: cilíndricas, achatadas, prismática. Seus componentes são projetados para se acomodar com o perfil particular da célula. As células são seladas de diversas maneiras para prevenir vazamentos e ressecamentos. Algumas células possuem dispositivos de ventilação ou outras maneiras para controlar o escapamento de gases acumulados. Mais adiante, a construção típica de células cilíndrica e prismáticas de bateria são abordadas no capítulo sobre design de baterias recarregáveis.

Classificação de células e baterias

Células e baterias eletroquímicas são identificadas como primárias (não recarregáveis) ou secundárias (recarregáveis). As baterias primárias não são capazes de serem facilmente ou efetivamente carregadas eletricamente e, assim,

são descartadas depois de descarregadas. Muitas células primárias, na qual o eletrólito é contido por um absorvente ou um material separador, são denominadas “pilhas secas”.

A bateria primária é uma conveniente fonte de energia usualmente barata para eletrônicos portáteis, lanternas, equipamentos fotográficos, brinquedos, e uma lista de outras aplicações. As vantagens das baterias primárias são: boa vida de prateleira, alta densidade de carga com baixo a moderado nível de descarga, pouca ou nenhuma manutenção, e facilidade de uso.

As baterias recarregáveis ou secundárias podem ser recarregadas eletricamente, após a descarga, para suas condições originais, pela passagem de uma corrente através das células que as constituem no sentido contrário ao da corrente de descarga. Também são caracterizadas por uma alta densidade de carga, alta taxa de descarga e boa performance em baixas temperaturas.

As aplicações das baterias secundárias recaem em duas principais categorias:

1. Aquelas nas quais as baterias são usadas como um dispositivo armazenador de carga. Geralmente várias células são eletricamente conectadas e carregadas por uma fonte de energia primária (rede elétrica) e fornecem energia quando exigidas. Exemplos de uso são baterias para automóvel e *no-breaks*.
2. Aquelas nas quais as baterias são usadas ou descarregam-se essencialmente como uma bateria primária, mas são recarregadas após o uso ao invés de serem descartadas. São usadas desta maneira, por exemplo, em equipamentos eletrônicos portáteis.

Todos os aparelhos eletrônicos sem fio necessitam de uma fonte de energia portátil. Atualmente essa energia é fornecida principalmente por baterias recarregáveis, mas como a tecnologia vem mudando rapidamente, outras fontes de energia, tais como células combustíveis, poderão vir a ter uma participação mais significativa neste mercado.

Métodos de recarga

A capacidade e tempo de vida útil são parâmetros críticos da bateria e que são fortemente afetados pelo método de carga. A recarga é o processo de reposição da energia que foi descarregada da bateria. A subsequente performance da bateria, bem como sua vida total, são dependentes de uma carga

efetiva, cujos principais critérios são: a recarga até sua capacidade máxima (evitando sobrecarga) bem como altas temperaturas ou flutuações da mesma.

A corrente de carga e descarga de uma bateria é medida habitualmente em *C-Rate* e é expressa em:

$$I = M \times C_n \quad \text{Equação 1}$$

Onde: I = corrente em ampere (A);

C = valor numérico da capacidade da bateria em ampéres horas (Ah);

n = tempo em horas na qual a capacidade taxada é declarada;

M = múltiplo ou fração de C ;

A maioria das pilhas e baterias portáteis, com exceção do chumbo ácido, são classificadas em 1 C. Uma descarga de 1 C equivale a uma corrente igual à capacidade nominal. Por exemplo, uma bateria nominal de 1000 mAh fornece 1000 mA por uma hora, se descarregada a taxa 1 C. A mesma bateria descarregada a 0,5 C (ou C/5) fornece 500 mA por duas horas. A 2 C, a mesma bateria fornece 2000 mA por 30 minutos. A capacidade da bateria geralmente decresce com o aumento da corrente de descarga. Assim, uma bateria taxada a 5 Ah, a uma taxa de C/5, irá operar por 5 h se descarregada a 1 A. Se a bateria é descarregada a uma taxa menor, por exemplo C/19, ela irá funcionar por mais de 10 h e fornecer mais de 5 Ah de capacidade. Do mesmo modo, quando descarregada com sua *C-Rate* (ou 5 A), a bateria irá operar por menos de 1 h e fornecendo menos de 5Ah de capacidade.

O tempo de carga é baseado na taxa, no estado, na capacidade e na composição química do material. Quando a bateria está completamente carregada, alguns carregadores reduzem a taxa de carga para um nível que apenas mantém a mesma constante para compensar a auto-descarga da bateria (diz-se que o sistema fica em flutuação).

A pressão interna na célula aumenta com o aumento da temperatura durante a carga, de modo que esta deve ser mantida moderada e, durante seus picos, estes devem ser tão breves quanto possível.

Os níveis de capacidade máxima são atingidos com 150 % de carga de entrada. Já os maiores ciclos de vida são atingidos com 120 %, mas com menor capacidade devido à insuficiente carga de entrada. É importante utilizar algum modo preciso de detecção de carga máxima para evitar a sobrecarga e consequente degradação das células. Entre as técnicas de controle de carga,

têm-se ΔV negativo ou NDV (também chamado de *negative ΔV*), o patamar de voltagem, a taxa de aumento de temperatura (dT/dt), limiar de temperatura e controlador de tempo (*timer*).

O método NDV é utilizado principalmente para as baterias à base de níquel. Pode ser obtido com o uso de um micro controlador que monitora a voltagem da bateria e termina a carga quando ocorre uma variação na taxa ou quando determinada queda na voltagem são atingidas. O método do patamar de voltagem finaliza a carga quando um nível limite de voltagem é atingido.

O método da taxa de aumento de temperatura (dT/dt) monitora a variação da temperatura no tempo e corta o circuito de carga quando o valor de um incremento de temperatura atingir um valor limite ou se uma temperatura máxima permitida é excedida durante a carga.

O método da carga temporizada termina o processo após a bateria ter sido carregada por um período de tempo predeterminado. Este método deve ser usado preferencialmente a baixas taxas para evitar uma sobrecarga excessiva. Esse procedimento também é bastante usado como finalização de carga, que também é chamada de “*topping*”, para garantir uma recarga completa.

Design de baterias recarregáveis

As configurações de células mais utilizadas em baterias de celulares são as cilíndricas e as prismáticas. A montagem de uma célula cilíndrica é mostrada na Figura 13 [68]. Os eletrodos são enrolados de forma espiral e inseridos dentro de um invólucro cilíndrico de aço niquelado. O eletrólito é adicionado e fica contido dentro dos poros dos eletrodos e do separador.

A célula é selada através da conformação do topo do invólucro metálico. O topo consiste em: uma cobertura metálica, um escape de segurança, uma vedação plástica, e uma cobertura metálica. O invólucro metálico serve como terminal negativo e a cobertura metálica como terminal positivo, ambos isolados um do outro pela vedação. O escape de segurança fornece uma segurança que é dada pela liberação de qualquer excesso de pressão que possa ocorrer se a bateria for submetida a algum abuso.

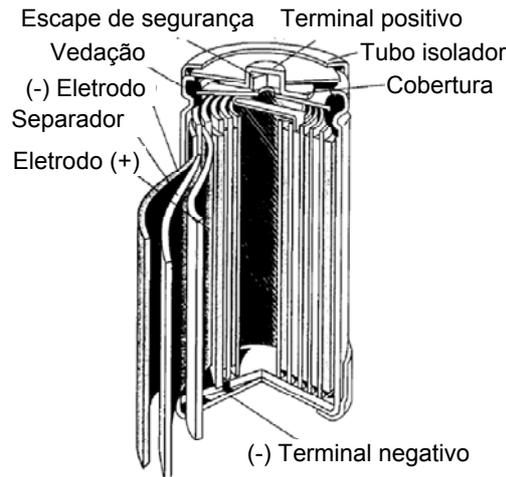


Figura 13 - Construção típica de uma célula cilíndrica de bateria [adaptado de 68].

O design das baterias prismáticas finas permite atender as necessidades de equipamentos mais compactos. A forma retangular permite uma montagem mais eficiente da bateria, eliminando os vazios que ocorrem na montagem das células cilíndricas. A célula prismática permite oferecer também maior flexibilidade no design das baterias, e a densidade de energia volumétrica das mesmas pode ser aumentada por um fator de até 20%. A Figura 14 mostra a estrutura de uma célula prismática [68]. Os eletrodos são construídos de modo similar aos das células cilíndricas com exceção de que são de forma plana e retangular. Os eletrodos planos são montados com os eletrodos positivos e negativos espaçados por folhas separadoras. A célula é selada através da conformação do topo do invólucro metálico. O topo consiste em: uma cobertura metálica, um escape de segurança, uma vedação plástica, e uma cobertura metálica, de modo similar ao usado na célula cilíndrica.

O invólucro metálico serve como terminal negativo e a cobertura metálica como terminal positivo, ambos isolados um do outro pela vedação. Um isolador termo retrátil é colocado sobre o invólucro metálico. A base da célula serve como terminal negativo, o topo como terminal positivo, e a vedação isola os terminais um do outro.

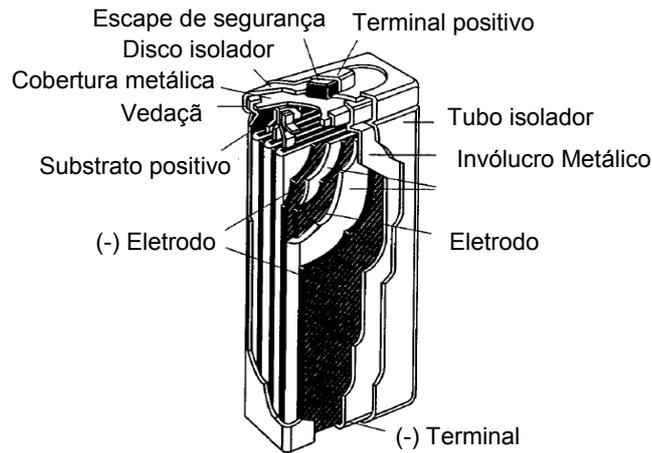


Figura 14 - Construção típica de uma célula prismática de bateria [adaptado de 68].

2.6.1 Princípios de operação

Energia livre

Numa célula, sempre que uma reação ocorrer, haverá uma redução na energia livre do sistema que é expressa como [68]:

$$\Delta G^0 = -nFE^0 \quad \text{Equação 2}$$

Onde: ΔG^0 = variação da energia livre de Gibbs no estado padrão;

F = constante de Faraday (96,500 C/mol de e^- ou 26,8 Ah);

n = número de elétrons envolvidos na reação estequiométrica;

E^0 = Potencial padrão.

Voltagem teórica

O potencial padrão da célula é determinado pelo tipo de material contido na mesma e pode ser calculado a partir de dados de energia livre ou obtido experimentalmente. O potencial padrão de uma célula pode ser calculado a partir dos potenciais dos eletrodos padrões, pela soma do potencial de oxidação do ânodo com o potencial de redução do cátodo.

Quando as condições forem diferentes das do estado padrão, usa-se a equação de Nernst para a o cálculo da voltagem da reação global dada pela adição das duas semi-reações:

$$aA + bB = cC + dD \quad \text{Equação 3}$$

$$E = E^0 - \frac{RT}{zF} \times \ln \frac{a_C^c \times a_D^d}{a_A^a \times a_B^b} \quad \text{Equação 4}$$

Onde E^0 é o potencial padrão; R é a constante universal dos gases (8,315J K⁻¹.mol⁻¹); T é a temperatura em escala absoluta; F é a carga elétrica de um mol de elétrons; z é o número de elétrons transferidos; a é a atividade das espécies relevantes (que pode ser aproximado pelo produto das concentrações dos produtos, elevadas a seus respectivos coeficientes estequiométricos, dividido pelo produto análogo das concentrações dos reagentes da reação redox).

Capacidade de carga teórica

A capacidade de carga teórica de uma célula é determinada pela quantidade de material ativo dentro da célula. É expressa pela quantidade total de eletricidade envolvida na reação eletroquímica e é definida em termos de Coulomb (C) ou ampéres hora (Ah). A capacidade de uma célula depende de diversos fatores como: profundidade de descarga, voltagem no início da descarga, temperatura, tamanho dos eletrodos e idade da célula.

A capacidade de uma célula também pode ser considerada em termos de energia (watt hora) considerando a voltagem e a quantidade de eletricidade envolvidas. Esse valor teórico de energia é o máximo valor que pode ser fornecido por um sistema eletroquímico:

$$\text{Watt hora (Wh)} = \text{voltagem (V)} \times \text{ampéres hora (Ah)} \quad \text{Equação 5}$$

2.6.2 Materiais dos Sistemas de Baterias usadas em Celulares

As baterias recarregáveis geram menos desperdício do que as baterias descartáveis porque podem ser recarregadas centenas de vezes e algumas até 1000 vezes. Porém, algumas das recarregáveis possuem materiais tóxicos tais como cádmio, níquel, zinco e cobre, que podem gerar problemas ambientais.

A velocidade de evolução das baterias é baixa quando comparada com a do desenvolvimento do setor de tecnologia da informação. Os telefones celulares e outros aparelhos eletrônicos sem fio vêm adquirindo novas funções, maiores

velocidades de processamento e diminuindo seus consumos de energia. Enquanto em sete anos a capacidade de processamento dos semicondutores aumentou em 2600 %, as tecnologias das baterias aumentaram somente em 65% [9].

Ao mesmo tempo, o esforço em direção à portabilidade está aumentando a pressão em fazer estes dispositivos menores e mais leves. Isto teve um grande impacto nas indústrias de bateria, o que conduziu ao desenvolvimento de baterias com maior capacidade de energia e com menor peso.

Em uso comum desde 1950, as baterias de Níquel Cádmio (NiCd) são as mais baratas entre as baterias recarregáveis. Até metade de 1990, elas foram as mais utilizadas na maioria dos telefones celulares, em outros aparelhos sem fio e num grande número de produtos eletrônicos, mas agora estão perdendo lugar no mercado para tecnologias mais novas e eficientes. A evolução tecnológica trouxe a necessidade de que as baterias recarregáveis utilizadas em aparelhos eletro-eletrônicos fossem mais leves, compactas e tivessem maior autonomia. As preocupações sobre os efeitos do cádmio no meio ambiente e na saúde e a possibilidade de proibição da disposição das NiCd em aterros também contribuiu para a utilização de outros tipos de baterias [69].

Em particular, as NiCd têm sido substituídas nos últimos anos por baterias Níquel Metal Hidreto (NiMH) e Íon Lítio (Li-Íon), que possuem uma maior densidade energética. Isto significa que elas podem fornecer a mesma quantidade de energia com menos peso, ou mais energia com o mesmo peso.

Baterias de NiMH

As baterias de NiMH foram desenvolvidas em 1989 e comercializadas primeiramente no Japão, em 1990. Elas apresentam maior capacidade do que as de NiCd, porém não operam a temperaturas tão baixas pois são mais sensíveis aos danos ocasionados pelo calor.

A bateria de NiMH é composta por um eletrodo de NiOOH (óxi-hidróxi de níquel) e por outro eletrodo composto por uma liga metálica armazenadora de hidrogênio (M). O material ativo do anodo é o hidrogênio absorvido na forma de hidreto metálico, em vez de cádmio. O metal costuma ser um dos elementos químicos pertencentes ao grupo dos terras raras. O eletrólito é uma solução

aquosa de hidróxido de potássio (KOH/H₂O), misturada com pequenas quantidades de aditivos cuja função é melhorar o desempenho dos eletrodos.

Nesta bateria o eletrodo positivo de níquel encontra-se na fase β -Ni(OH)₂ quando a bateria está descarregada, enquanto o eletrodo negativo da liga metálica apresenta-se sem a presença de hidrogênio em sua composição (M). No carregamento o eletrodo de níquel perde íons H⁺ transformando-se na fase β -NiOOH, e, complementarmente, o eletrodo da liga metálica recebe íons H⁺ (MH). Em ambos os eletrodos os processos de perda do íon H⁺ bem como o processo de recebimento deste íon ocorrem via intercalação iônica na estrutura cristalina dos materiais [70].

A bateria de NiMH, assim como a de NiCd, apresenta o efeito memória, porém de forma moderada. O efeito de memória é causado pela recarga da bateria antes da mesma ser completamente descarregada. Isto causa na bateria a “perda” da energia restante, armazenada, que se torna indisponível. Ele encurta a vida das baterias, principalmente das de NiCd. Este efeito ocorre devido ao crescimento de cristais de Cádmio dentro das células, o que reduz a superfície das placas das mesmas ocasionando uma redução na voltagem que é proporcional à área superficial.

O eletrodo de MH é sensível a processos de sobrecarga, uma vez que intercalando íons H⁺ em excesso, a sua estrutura incha, ocasionando aumento de volume e trincas no eletrodo. Este tipo de bateria apresenta um relativamente alto grau de auto-descarga, ou seja, a bateria se descarrega espontaneamente. Isto equivale a dizer que os íons H⁺ deintercalam do eletrodo MH e migram para o eletrodo de níquel sem a necessidade de curto-circuitar seus pólos. Na Figura 15 são mostradas as etapas de carga e descarga de uma bateria de NiMH.

As baterias de NiMH têm sido substituídas pelas de Li-Íon que possui energia específica e densidade de energia ainda maiores, o que as torna mais atraentes para aplicações sensíveis a peso ou volume.

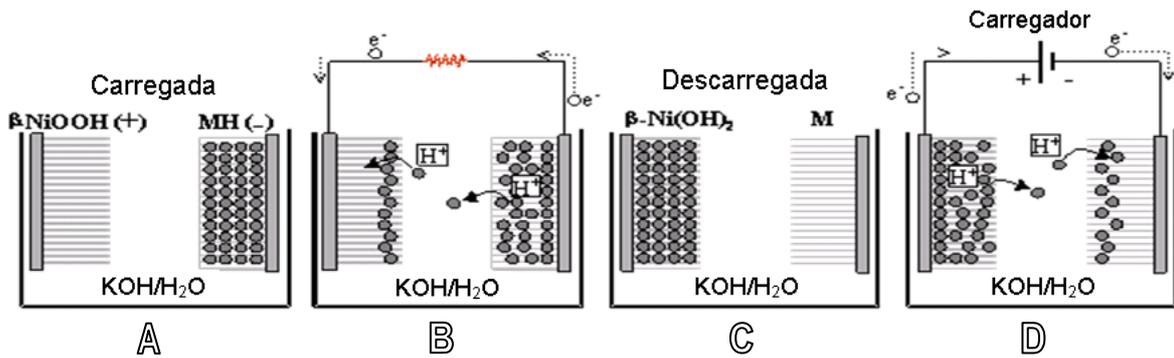


Figura 15 - Processos eletroquímicos numa bateria de NiMH. (A) Bateria carregada, (B) Descarregando (em uso ou armazenada), (C) Descarregada, (D) Recarregando [adaptado de 70].

Baterias de Li-Íon

As baterias de Li-Íon foram introduzidas comercialmente durante o início da década de 90 graças à superação de falhas das primeiras baterias recarregáveis que utilizaram ânodo de lítio [71]. Assim como a bateria de NiMH, a bateria de íon-lítio também é um dispositivo de intercalação iônica, com a diferença que o íon intercalante é o de lítio (Li^+). Este tipo de bateria compõem-se de:

Cátodo (+): Ligas litiadas, exemplos: LiCoO_2 e LiMn_2O_4 ;

Ânodo (-): Carbono grafite (C);

Eletrólito: Sais de lítio (LiClO_4) dissolvidos em solventes orgânicos.

Esta bateria leva o nome de íon-lítio porque o agente responsável pela oxidação (doação de elétrons) e redução (recebimento de elétrons) dos eletrodos é o íon de lítio (Li^+). Uma bateria de Li-Íon fornece corrente elétrica para um sistema quando íons de lítio são intercalados e deintercalados dos eletrodos (Figura 16). O grafite é o material mais comumente usado porque, além de apresentar estrutura lamelar, é capaz de intercalar reversivelmente os íons lítio entre suas camadas de carbono sem alterar significativamente sua estrutura. A Figura 16 mostra um esquema onde é apresentado o princípio de funcionamento desta bateria.

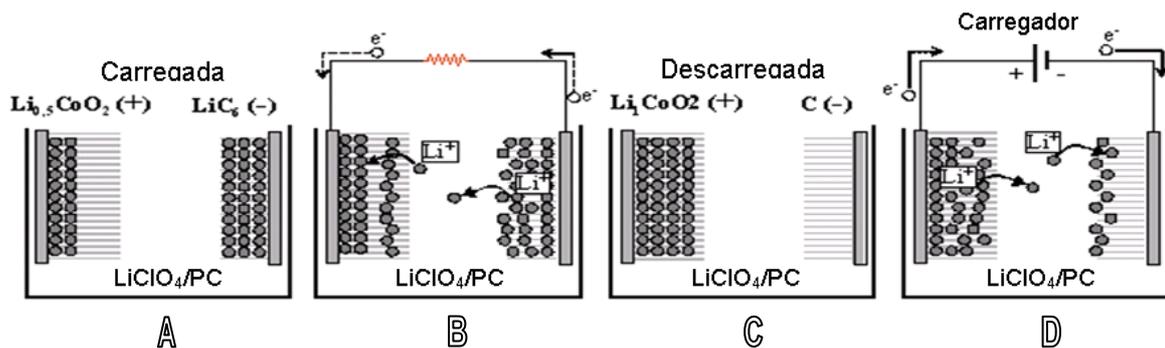


Figura 16 - Processos eletroquímicos numa bateria de Li-Íon. (A) Bateria carregada, (B) Descarregando (em uso ou armazenada), (C) Descarregada, (D) Recarregando [adaptado de 70].

Quando uma bateria de Íon-Lítio está carregada, significa que 50% dos íons de lítio foram retirados do eletrodo positivo, tornando-se $\text{Li}_{0.5}\text{CoO}_2$. Se uma sobrecarga for imposta à bateria mais do que 50% de íons de lítio deixarão o eletrodo, e este sofrerá uma transformação irreversível que danifica a bateria. Outro problema ocorre quando se aplica uma sobredescarga, ou seja, procede-se uma descarga profunda. Isto ocasiona uma corrosão no eletrodo de grafite, o qual perde massa, perdendo capacidade de carga [72].

Devido ao fato de que as células de Li-Íon são irreversivelmente degradadas quando sobrecarregadas ou sobredescarregadas, podendo até vazarem, essas baterias tipicamente empregam um circuito de proteção para garantir uma operação segura e prevenir uma eventual deterioração. Esses circuitos podem prover outros recursos tais como medidor de estado de carga e monitoramento da temperatura.

Um outro tipo de bateria recarregável, a Polímero Lítio (*Li-Polymer*), foi introduzido em 1999. Esta é similar à Li-Íon, mas contém polímero ao invés de líquido eletrolítico. As baterias *Li-Polymer* são finas, leves e flexíveis e têm conquistado uma significativa fatia de mercado para os telefones celulares.

Composição dos materiais

De acordo com a Resolução CONAMA 401/2008, as pilhas do tipo NiCd, Chumbo-Ácido e Óxido de Mercúrio não devem ser descartadas no lixo comum, uma vez que apresentam elevadas concentrações de metais pesados, que podem contaminar o solo e água, e se bioacumular na cadeia alimentar. Depois de utilizadas, e ter sua capacidade energética esgotada, as pilhas e baterias desse

tipo devem ser devidamente separadas do lixo comum e devolvidas ao fabricante, ou estabelecimento comercial onde foram adquiridas. A mesma resolução ainda deixa claro que os estabelecimentos que comercializam pilhas e baterias, bem como que as redes de assistências técnicas autorizadas pelos fabricantes e importadores desses produtos, deverão receber dos usuários as pilhas e baterias usadas, sendo facultativa a recepção de outras marcas, para repasse aos respectivos fabricantes ou importadores. A Resolução CONAMA 401/2008, revogou a Resolução CONAMA 257/99 e é o atual documento norteador no que diz respeito à legislação ambiental que trata de pilhas e baterias usadas [73, 74].

A Agência de Proteção ao Meio Ambiente dos Estados Unidos (US EPA) compilou uma lista de substâncias químicas persistentes, bioacumulativas, e tóxicas (*persistent, bioaccumulative, toxic chemicals* – PBT's) objetivando a redução do descarte de resíduos perigosos. Numa lista um pouco anterior, a agência publicou uma tabela classificando estas substâncias químicas, com um número reduzido de materiais de significativa preocupação (Tabela 5). O cádmio estava ocupando a segunda posição no ranking de periculosidade desta listagem, após o chumbo.

Tabela 5 - Elementos e compostos perigosos (% em peso) contidos nas baterias recarregáveis NiCd, NiMH e Li-Íon (US EPA, *Office of Solid Waste* [75]).

Elementos Tóxicos	Grau de Periculosidade *	NiCd	NiMH	Li-Íon
Cádmio	2	6-26%	-	-
Níquel e compostos	24	11-30%	30-50%	Sim**
Zinco	29	-	5-20%	-
Cobre	41	-	-	2-15%
Cobalto e compostos	63	0-2%	2,5-8%	<25%
Manganês	65	-	0-2%	Alguns***
Alumínio	82	-	0-1%	2-10%
Compostos de Lítio	-	3-10%	0-1%	<25%
Aço	-	15-25%	15-25%	15-30%
Solventes orgânicos	-	-	-	10-20%
Carbono, grafite	-	-	-	3-30%

* Listagem de acordo com o ranking de periculosidade da US EPA;

** A bateria contém esse elemento, mas a quantidade não está exposta no *material safety data sheets* - MSDS.

*** Alguns modelos possuem esse elemento, mas a quantidade não está exposta na MSDS.

Os perigos do cádmio são bem conhecidos. É um provável elemento cancerígeno ao ser humano, é tóxico para a vida selvagem e pode passar através da cadeia alimentar para o ser humano, causando estragos no pulmão, no fígado e nos rins, e até a morte em altos níveis de exposição [75]. O cádmio pode lixiviar dos aterros para os cursos de rios e entrar na atmosfera durante a incineração e processos de reciclagem.

As baterias recarregáveis contêm outros PBT's em adição ao cádmio, mas os perigos listados na Tabela 5 são bem menores. Claramente, as de NiCd apresentam um sério problema por causa do cádmio que elas contêm, mas as baterias que as estão substituindo contêm zinco e cobre – também presentes na Tabela 5 – bem como, cobalto, que é tóxico e persistente. É importante obter informação suficiente sobre todas as tecnologias de baterias recarregáveis e não assumir que alguma é preferível enquanto seus impactos ainda não foram completamente documentados. Ademais, desde que todas as baterias recarregáveis contêm materiais tóxicos, estas deveriam ser recicladas no final da vida útil ao invés de serem enviados para a incineração e aterros.

Resíduos de baterias recarregáveis

O impacto das baterias no lixo comum depende da quantidade gerada e da toxicidade das mesmas. A quantidade de resíduos gerada é uma função da vida útil da bateria e de seu tamanho. Já a toxicidade dos resíduos depende da composição do material da bateria. As baterias recarregáveis são preferíveis a baterias descartáveis devido ao seu tempo de vida útil bem maior. Entretanto, sua toxicidade está causando preocupação em todo o mundo.

O mercado mundial de celulares, que representa sessenta por cento das baterias recarregáveis vendidas no mundo, totalizou em 2008, 1,28 bilhão de aparelhos comercializados e considerando que um aparelho tem em média uma massa de 100g, isso resultará em 128 mil toneladas. A bateria destes telefones é responsável pela metade do seu peso, ou seja, praticamente 64 mil toneladas. Entretanto, as baterias de telefones celulares muitas vezes são trocadas antes do telefone ser descartado, pois, muitas vezes, a vida útil delas não é tão longa quanto à do aparelho (o que acontece na prática é que se trata de aparelhos frágeis e certos acidentes, como simples quedas, contribuem para o surgimento de avarias que reduzem sua vida útil). Se cada telefone usar duas baterias antes

de ser descartado, aproximadamente 1,28 bilhões de baterias serão descartadas por ano, atingindo em torno de 128 mil toneladas de desperdícios.

Segundo FURTADO, 2004, analisando os mecanismos de coleta de pilhas e baterias, no Brasil, apenas uma pequena fração do volume produzido de baterias de pequeno porte era recolhido e, isso seria devido principalmente à fraca divulgação de orientação para os consumidores e a falta de acordos com postos de venda para receberem pilhas e baterias. Além disso, os dados sobre as empresas e infraestrutura para coleta eram insuficientes [76].

Segundo BERNARDES et al., 2004, a maioria das baterias de uso doméstico, especialmente as primárias, são depositadas em aterros de resíduos sólidos urbanos e levadas a aterros sanitários [77]. Os fatores ambientais dos metais provenientes das baterias num aterro são funções das condições das baterias quando aterradas e as condições do aterro. Os invólucros das baterias são normalmente feitos de papel, plástico ou metal. As várias condições que podem desenvolver-se num aterro, afetam a taxa na qual o invólucro se degradará. As seguintes condições podem afetar o índice de degradação: a natureza do invólucro, o nível de carga deixada na bateria, a extensão de exposição à lixiviação do aterro e o conteúdo de oxigênio do aterro.

Os incineradores de baterias também possuem dois aspectos preocupantes. O primeiro é a liberação de metais no ar e o segundo é a concentração de metais nas cinzas que devem ser lixiviadas. Entre os metais presentes nas baterias, mercúrio, cádmio e chumbo apresentam os problemas mais importantes. Geralmente, o mercúrio é mais fácil de ser emitido no ar, o cádmio e o chumbo ficam concentrados nas cinzas. O destino ou a maneira de como os metais são liberados durante a incineração de baterias é uma função da temperatura de combustão, da temperatura de volatilização do metal e da presença de outros compostos não metálicos.

Reciclagem de baterias

Para promover a reciclagem de pilhas, é necessário inicialmente o conhecimento de sua composição. Infelizmente, não há uma correlação entre o tamanho ou formato das pilhas e a sua composição. Em diferentes laboratórios têm sido realizadas pesquisas de modo a desenvolver processos para reciclar as baterias usadas ou, em alguns casos, tratá-las para uma disposição segura [78].

Enquanto a taxa de reciclagem para as baterias de chumbo é de aproximadamente 98%, a taxa das baterias de pequeno porte é de apenas 30%. Acontece que a logística da troca de baterias de chumbo velhas por novas é bastante eficiente. Já as de pequeno porte costumam ser coletadas e misturadas independentemente do tipo material. Além disso, as diferenças de forma, de dimensão e de cor, independem da composição, prejudicando principalmente o serviço das pessoas que trabalham nos centros de triagem, já que, muitas vezes o grau de instrução das mesmas, não permite a identificação e diferenciação das siglas indicadoras dos materiais utilizados no tipo de bateria em questão. Assim, essas baterias de pequeno porte acabam sendo processadas em conjunto, resultando numa composição bem variada com diversos elementos.

Os processos de reciclagem de baterias podem seguir linhas distintas como a baseada em separação dos componentes em operações de tratamento de minérios, a hidrometalúrgica ou a pirometalúrgica [79]. As baterias de NiMH e de Li-Íon costumam ser recicladas utilizando-se primeiramente uma separação magnética (processos de trituração e de moagem), posteriormente, as de NiMH passam por uma separação magnética (para liberar o níquel da fração polimérica) e, as de Li-Íon, por uma recuperação dos sais de lítio por pirólise (tratamento de calor) com a recuperação primária do metal.

2.6.3 Fatores que afetam a performance das baterias

Um bom projeto de uma bateria e de seus compartimentos é importante para um funcionamento seguro e confiável. Muitos problemas atribuídos às baterias poderiam ser impedidos caso fossem tomados alguns cuidados na concepção dos seus projetos. Alguns dos fatores que devem ser considerados na concepção são: peso, volume, materiais, uniformidade dos invólucros, assim como os tipos de ligações entre as células (paralelas ou em série).

As baterias são fontes que armazenam energia, e quando utilizadas corretamente, transferem essa energia de forma segura. No entanto, certas condições podem ocasionar o aumento da temperatura e da pressão interna e, dessa forma, provocar um mau funcionamento ou até mesmo a explosão da bateria. Os fabricantes de baterias privam-se de mencionar explosão. “Abertura

com chama” é a terminologia aceita. Embora sua reação seja mais lenta do que na explosão, a abertura com chama pode ser muito violenta, podendo danificar o equipamento onde a bateria estava conectada.

É possível mencionar alguns dos motivos que poderiam ocasionar esse tipo de problema em baterias:

1. Curto-circuito dos terminais da bateria;
2. Taxa elevada de carga ou descarga;
3. Voltagem inversa;
4. Carga imprópria de baterias secundárias;
5. Danos provocados a uma das células de um conjunto;
6. Danos em algum componente eletrônico do circuito de proteção.

Dos motivos citados, o quinto é um dos mais importantes no caso das baterias de NiMH, pois como a voltagem nominal das células unitárias não ultrapassa 1,2V, para que atinjam valores de voltagem mais elevados as mesmas são normalmente associadas em série constituindo dessa forma uma bateria. As baterias de celulares mais antigos chegavam a serem constituídas por até seis células deste material. Com o passar do tempo, devido tanto à redução da quantidade de energia necessária para alimentar os telefones quanto à tendência de miniaturização dos mesmos, as baterias foram evoluindo e diminuindo o número de células, chegando a reduzir essa quantidade para apenas três, nos aparelhos mais modernos, conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Evolução das baterias de NiMH utilizadas em telefones celulares [desenvolvido pelo autor].

Voltagem (V)	7,2	6,0	4,8	3,6
Nº Células / bateria	6	5	4	3
Exemplos				

Perdas devido à polarização

É desejável que durante a descarga toda a energia do sistema seja convertida em energia elétrica. Mas ocorrem perdas devido à polarização quando

uma corrente passa pelos eletrodos acompanhando as reações eletroquímicas. Essas perdas incluem:

- A Polarização por ativação, que está relacionada com o controle da velocidade das reações eletroquímicas na superfície do eletrodo e é dependente da transferência de carga na interface;
- A Polarização por concentração, que está relacionada com a diferença de concentração dos reagentes e produtos na superfície do eletrodo em relação ao seio do eletrólito e é dependente da transferência de massa.

Estes efeitos da polarização consomem parte da energia, que é consumida como perda de calor, e, portanto, nem toda a energia armazenada teoricamente disponível nos eletrodos é inteiramente convertida em energia elétrica útil. Em princípio, a polarização por ativação e a por concentração podem ser calculadas a partir de várias equações teóricas, se alguns parâmetros eletroquímicos e as condições de transferência de massa estão disponíveis. No entanto, na prática é difícil determinar os valores para ambos, devido à complexa estrutura física dos eletrodos. A maior parte dos eletrodos das baterias são corpos feitos de material ativo, aglutinante, aditivos para melhoria de desempenho e, geralmente, têm uma estrutura porosa de espessura finita. Para estimar os componentes da polarização é necessária uma modelagem matemática computadorizada complexa.

Impedância interna das baterias

Há outro importante fator que afeta fortemente o desempenho ou a capacidade de uma célula: a impedância interna da célula. Esta provoca uma queda de voltagem durante a operação, que também consome parte da energia útil, como perda de calor. Essa queda de voltagem, devido à impedância interna, é normalmente referida como polarização ôhmica ou queda IR e é proporcional à corrente consumida pelo sistema. O valor total da impedância interna de uma célula é a soma: das resistências iônicas do eletrólito (dentro do separador e dos eletrodos porosos), da resistência eletrônica da massa ativa, dos coletores de corrente e dos contatos elétricos de ambos os eletrodos e da resistência do contato entre a massa ativa e o coletor de corrente.

A voltagem útil dada pela célula é reduzida pela polarização e a queda IR. Somente em níveis muito baixo de correntes de operação que a polarização e a queda IR são pequenas, onde a célula opera próximo da voltagem de circuito

aberto e entrega a maior parte da energia teoricamente disponível. A Figura 17 mostra a relação entre a polarização na célula e a corrente de descarga [68].

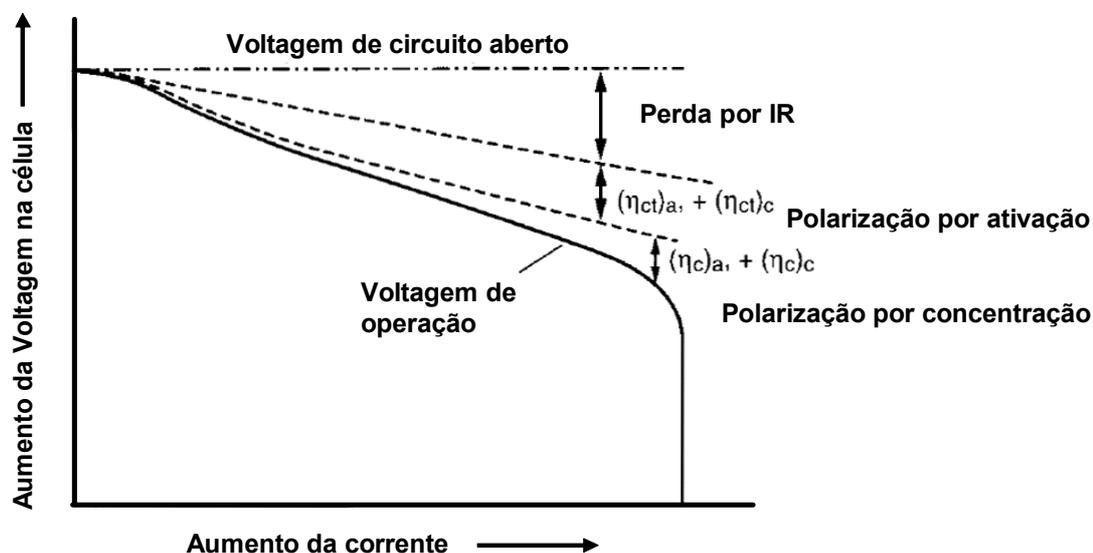


Figura 17 - Polarização numa célula como função da corrente de operação. [adaptado de 68].

A impedância é influenciada por uma série de fatores como temperatura, profundidade de descarga, estado de carga, fatores construtivos e, por isso, é difícil de ser medida. O modelo ideal é de uma resistência ligada em série com uma indutância e de uma capacitância em paralelo. A resistência pode ser medida indiretamente pela leitura a voltagem sobre os terminais da bateria dividida pela corrente que por ela circula, e pode ser usada muitas vezes como parâmetro indicativo do estado de carga da bateria, pois os efeitos indutivos e capacitivos são quase sempre desprezados já que a bateria é um dispositivo de corrente contínua [80].

Estaticamente, para medir a resistência interna é preciso fazer duas medidas: Primeiro a voltagem em circuito aberto (sem ligar nenhuma carga, ou seja, com a corrente nula) e depois fazer uma medida com uma determinada carga ligada. Considerando o equivalente Thevenin, onde se representa a Bateria por uma fonte ideal com uma resistência interna, pode-se calcular a mesma em função das duas medidas. A resistência interna da bateria num dado instante é a derivada da voltagem em relação ao tempo, dividida pela corrente que circula pela bateria no mesmo instante considerado. No processo de recarga da bateria, a voltagem sobre a mesma cresce cada vez menos com o passar do tempo (a

curva é uma exponencial crescente que tende a uma saturação) e a resistência interna diminui. Do mesmo modo, na descarga ocorre o aumento da resistência interna.

Envelhecimento e condições de armazenamento das baterias

A pilha é um produto perecível e deteriora com o resultado da ação química durante o armazenamento. O design, o sistema eletroquímico, a temperatura e a duração do período de armazenagem são fatores que afetam a vida de “prateleira” ou a retenção de carga da bateria.

Todas as baterias apresentam certa quantidade de auto-descarga, principalmente aquelas à base de níquel. Como regra geral, uma bateria a base de níquel se auto-descarrega cerca de 10 % da sua capacidade nas primeiras 24 horas de uso e cerca de 10 % a cada mês subsequente. A auto-descarga das baterias de lítio é menor, sendo cerca de 5% nas primeiras 24 horas e de 1 a 2% a cada mês subsequente.

A auto-descarga em uma bateria aumenta gradualmente com: a alta temperatura, o aumento do ciclo, a idade e presença de um circuito de proteção. Em baterias com alta ciclagem, a energia armazenada é mais perdida ao longo do dia, através da auto-descarga do que da utilização real e, nestes casos, este efeito é irreversível [81, 82].

2.6.4 Determinação do Estado de Carga

À medida que a bateria envelhece, seu “estado de saúde” (*state of health* - SOH) diminui e sua impedância aumenta provocando uma diminuição no seu estado de carga (SOC). O SOC da bateria está relacionado com a capacidade máxima disponível, e não com a capacidade nominal da bateria.

Um conhecimento preciso do estado de carga exerce um controle adicional sobre o processo de carga e descarga e pode ser empregado para aumentar a vida da bateria. Isso reduz o risco de sobrevoltagem e sobredescarga que degradam a bateria. Trabalhos anteriores desenvolveram uma relação entre a variação da impedância e do SOC, mas ocorriam problemas na região de SOC

plena para parcial, pois a mudança de impedância nesta região era pequena e conduziu a resultados imprecisos [83, 84].

COLOMAN et al, 2007, propuseram um modelo matemático para determinar o SOC enquanto a mesma está em operação utilizando o potencial padrão que é a voltagem de circuito aberto da bateria. O método divide a curva de voltagem da bateria em duas regiões: 1) a região linear para o SOC plena até parcial e 2) a região hiperbólica do SOC parcial para baixa. Na região hiperbólica, a taxa de mudança da impedância e da voltagem é maior do que na região linear. Os autores desenvolveram algoritmos que predizem o SOC para a melhor situação, por exemplo, na região linear (SOC de parcial para plena), a voltagem de circuito aberto é prevista usando a voltagem e a corrente de carga nos terminais da bateria com coeficientes predefinidos que estão relacionados com a corrente da bateria. Na medida em que o SOC diminui, outros algoritmos foram desenvolvidos para incorporar as mudanças na impedância com a voltagem nos terminais e a corrente para prever a voltagem de circuito aberto da bateria. Segundo os autores, os resultados são promissores, contudo concluíram que mais trabalho era necessário para implementar o método levando em conta também os efeitos de envelhecimento e de temperatura [85].

2.6.5 Ciclo de Vida das Baterias

O ciclo de vida é definido como o número de vezes que a bateria pode ser recarregada. Uma bateria que alcance o limite de seu ciclo de vida não mantém sua carga e deve ser substituída. A Tabela 7 compara algumas características-chaves que afetam o tamanho da vida útil das baterias de NiCd, NiMH e Li-Íon – as três principais baterias recarregáveis usadas em produtos eletrônicos.

A Tabela 7 refere-se a cada um dos tipos de bateria, mas existe alguma variação entre as características dentro de cada categoria. Claramente, cada tipo tem suas vantagens e desvantagens. As NiCd são as mais baratas e podem ser recarregadas mais vezes, mas são também as mais pesadas e as mais afetadas pelo efeito de memória. As Li-Íon são mais leves e as menos afetadas pelo efeito de memória e podem ser recarregadas mais de 500 vezes dependendo principalmente da profundidade de descarga; Elas são também as mais caras. As

NiMH têm de longe a taxa de auto-descarga mais elevada, o que as torna inapropriadas para aparelhos que permanecem sem serem utilizados por longos períodos [9].

Tabela 7 - Comparação de algumas características chaves das baterias de NiCd, NiMH e Li-Íon [9].

Tipo de Bateria	Densidade Energética (Wh/kg)	Taxa de auto-descarga	Ciclo de Vida (nº de Recargas)	Efeito de Memória
NiCd	50	1% ao dia	400-1500	Fortemente afetada
NiMH	75	3-10% ao dia	350-500	Pouco afetada
Li-Íon	100	1-2% ao dia	500-1000*	Não afetada

* O ciclo de vida é baseado na profundidade de descarga. Descargas rasas proporcionam mais ciclos do que descargas profundas.

Deve-se salientar que o consumo de energia dos aparelhos eletrônicos depende de como estes são utilizados. Por exemplo, os telefones celulares operam em três modos – fala (*talk*), estado de prontidão (*standby*), e desligado (*off*) - cada um destes modos requerem diferentes quantidades de energia. A máxima quantidade de energia é consumida no modo *talk*, quando o telefone está recebendo ou transmitindo sinal de voz. No modo *standby* menos energia é utilizada e, mesmo quando o telefone está desligado, alguma energia ainda é consumida.

O tempo necessário para que as baterias atinjam o final do ciclo de vida depende da frequência de recarga. Essa depende da capacidade da mesma, do consumo do aparelho e de como o usuário executa o carregamento. No entanto, muitas pessoas trocam de telefone celular mais de uma vez por ano buscando um aparelho de melhor performance, com maior número de funções e com design moderno. Junto com a maioria desses aparelhos, suas baterias acabam saindo de uso antes do final do seu ciclo de vida.

Considerando um ciclo de vida de 350 ciclos de carga e descarga para baterias de NiMH e de 490 para as de Li-Íon (quando então a capacidade energética média torna-se inferior a 80%), de acordo com a Figura 18 [86, 87] e conforme a frequência de recarga semanal, as baterias de NiMH teriam um ciclo de vida médio superior a dois anos no caso de três recargas semanais, superior a três anos com duas recargas semanais e superior a seis anos se forem recarregadas apenas uma vez por semana, como se pode observar na Figura 19.

Já as baterias de Li-Íon teriam um ciclo de vida médio superior a três anos, no caso de três recargas semanais, superior a cinco anos com duas recargas semanais e superior a nove anos se forem recarregadas apenas uma vez por semana, como se pode observar na mesma figura.

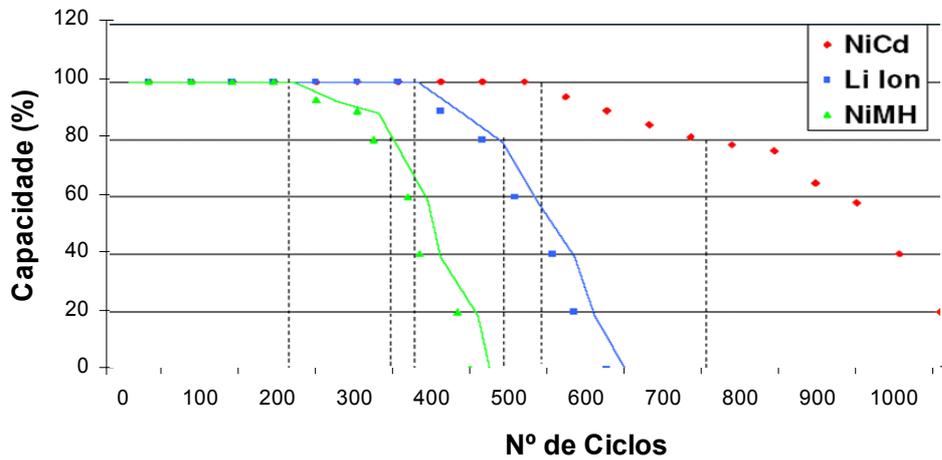


Figura 18 - Diminuição da capacidade em função do número de ciclos para as baterias de NiCd, Li-Íon e NiMH [86].

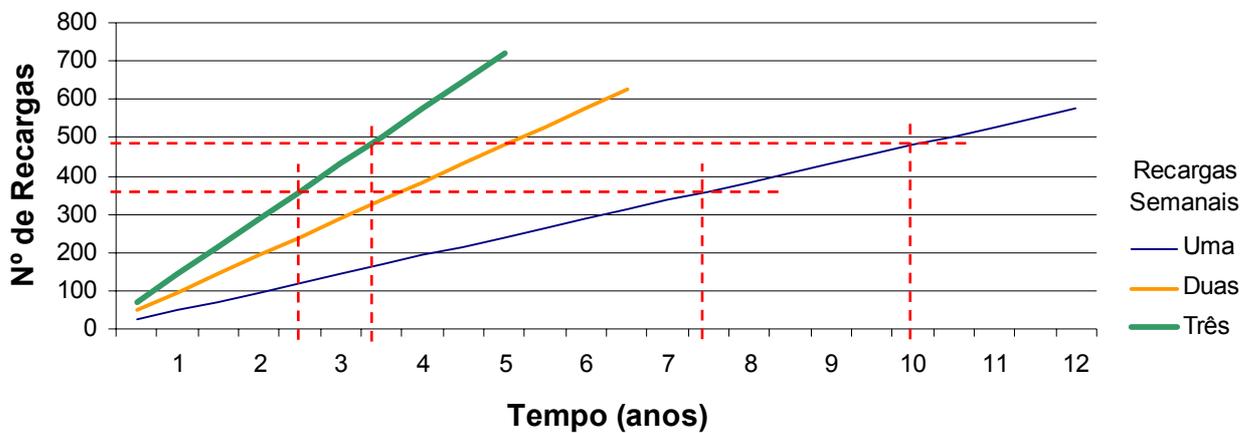


Figura 19 - Possibilidade de tempo de uso (em anos) em função do número de recargas semanais (número de ciclos) [desenvolvido pelo autor].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foi realizada a desmontagem de diversos modelos de diferentes fabricantes de celulares, com o objetivo de estudar e analisar quais os componentes, os materiais e os elementos de junção que compõem os telefones celulares. Os primeiros celulares e baterias utilizados nesse trabalho foram doados por particulares que, através de divulgação por cartazes e eventos, ficaram sabendo que o LdSM estava recebendo doações de aparelhos e baterias de celular para estudo e, assim, puderam fazer o descarte em local apropriado e colaborar com a pesquisa.

Foi feito um levantamento de dados sobre a coleta, circulação e destino de baterias descartadas. Para isto foram visitados 12 agentes autorizados, 8 assistências técnicas e 7 magazines localizados nas cidades de Porto Alegre, São Leopoldo, Esteio, Sapucaia e Canoas. Nas entrevistas com os responsáveis foram feitos questionamentos a respeito da atuação como ponto de coleta; da quantidade de baterias coletadas por mês; da periodicidade da coleta destas baterias; e de como era feito o envio destas baterias aos fabricantes.

Para estudar as baterias recarregáveis de pequeno porte que vem sendo descartadas antes do término de suas vidas úteis, foi projetada e construída uma bancada de testes de baterias, que é utilizada em uma das etapas da metodologia desenvolvida para a avaliação de células candidatas ao reuso. Também foi feita uma análise dos materiais das células via MEV.

A Figura 20 mostra um fluxograma geral da desmontagem de telefones celulares e baterias e os respectivos componentes, destacando as células que foram o foco da pesquisa.

Foram utilizadas baterias descartadas e recolhidas durante o ano de 2006, 2007 e 2008. A Figura 21 mostra diversos modelos de baterias de NiMH e Li-Íon descartadas e recolhidas para serem avaliadas neste trabalho.

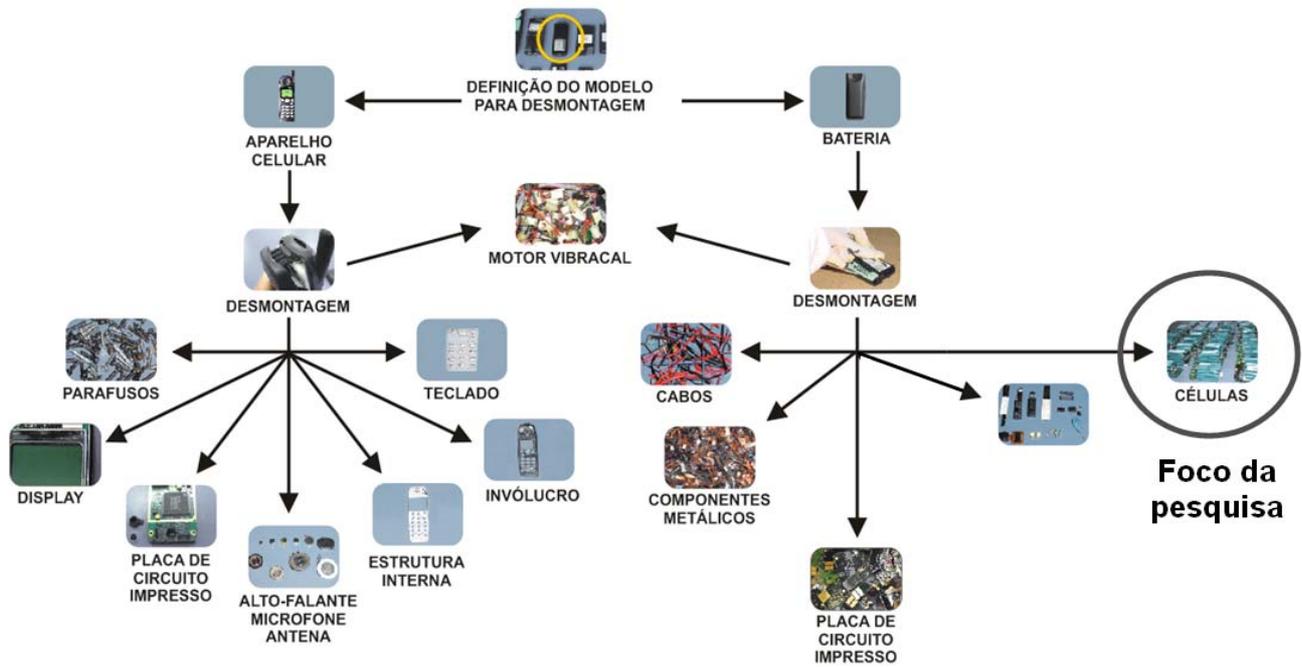


Figura 20 - Fluxograma geral da desmontagem de telefones celulares e baterias com a respectiva diversidade de componentes.

As baterias foram separadas por modelo com suas especificações de material, de voltagem e de capacidade de carga. A Tabela 8 lista os modelos de baterias mais comuns entre as descartadas e doadas para este estudo.



Figura 21 - Baterias de NiMH e Li-Ion descartadas e recebidas antes de serem separadas em A e, uma mostra da diversidade de modelos em B.

Tabela 8 - Modelos de baterias mais comuns entre as descartadas e doadas para este estudo.

Baterias de Li-Íon			Baterias de NiMH		
Marca	Modelo	Quantidade	Marca	Modelo	Quantidade
Nokia	BLB-3	27	Nokia	BBH -1H	36
Nokia	BLC-2	32	Nokia	BBH - 1S	29
Nokia	BL-6C	26	Nokia	BMS-3	295
Nokia	BL-5C	97	Nokia	BMC-3	97
Nokia	BL-4C	27	Nokia	BMC-2	32
Siemens	V30145-K1310-X215	45	Ericsson	BKB 193 104 4,8V	31
Siemens	V30145-K1310-X250	62	Ericsson	BKB 193 104 4,3V	29
Motorola	AANN4285 B	36	Ericsson	BKB 193 085	53
Motorola	NN4815B	30	Ericsson	BKB 193 (123-105)	65
Motorola	SNN5571A	44	Ericsson	BKB 931 C30 R3C	38
Motorola	SNN5749A	23	Siemens	V30145-K1310-X222	32
LG	LGIP - 411A	34			
LG	LGIP - A1000E	46			
LG	LGIP - G830	68			
Sony Ericsson	BKB193 174/11	21			
Total		618			737
Total Geral	1355				

3.1 Desmontagem dos Telefones Celulares

Os materiais e ferramentas utilizados para desmontagem e análise dos telefones celulares e componentes foram: uma lupa, uma flanela, uma pinça fresada de bico fino, uma chave de fenda especial tipo estrela, alicates e um Ferro de solda de 40W com suporte.

Organizou-se uma estação de trabalho de desmontagem que consistiu numa bancada iluminada, sobre qual havia uma flanela, as ferramentas acima mencionadas e EPI's como luvas e óculos de segurança. À medida que os

aparelhos foram desmontados, seus componentes foram separados de acordo com o tipo em: microfone, alto-falante, antena, bateria, motor *vibra-call*, PCI, LCD e a parte estrutural de acordo com o tipo de material (sempre verificando a presença do símbolo de identificação dos materiais).

A Figura 22 mostra alguns dos principais modelos de telefones celulares desmontados: Ericsson DF 388, Ericsson KF 788, Motorola C331(T), Motorola V2390, Nokia 2220, Nokia 2160, Nokia 5120, Nokia 8260 e Nokia 6225.



Figura 22 - Alguns dos celulares desmontados: Ericsson DF 388, Ericsson KF 788, Motorola C331(T), Motorola V2390, Nokia 2220, Nokia 2160, Nokia 5120, Nokia 8260, Nokia 6225.



Figura 23 - Vistas do celular modelo Nokia 5120. Frontal (A), traseira (B), lateral esquerda (C) e lateral direita (D).

A Figura 23 mostra as vistas do telefone celular Nokia 5120. A Tabela 9 lista o procedimento adotado com a descrição de cada uma das operações e

ferramentas utilizadas na desmontagem do mesmo aparelho e a Figura 24 esclarece as operações mostrando as imagens das mesmas, passo a passo. Foram desmontados 5 aparelhos deste mesmo modelo e, para estimar a duração de cada operação, levou-se em conta o tempo de pegar a ferramenta, o número de itens desmontados, o tempo de manuseio e de extração dos mesmos. O tempo total de cada operação foi calculado com a Equação 6 e o tempo total com o somatório de todas as operações.

$$TD = PF + NI * (TM + TE) \quad \text{Equação 6}$$

TD = Tempo total da operação de desmontagem

PF = Pegar a ferramenta

NI = Número de itens

TM = Tempo de manuseio

TE = Tempo de extração

Tabela 9 - Operações de desmontagem do telefone celular Nokia 5120.

Operação	Descrição	Ferramenta
1	Remoção da bateria manualmente através do acionamento do botão que libera o engate interno	Mãos
2	Retirada dos quatro parafusos da parte traseira	Chave de Fenda
3	Desencaixe do botão da parte superior e remoção do invólucro frontal	Mãos
4	Retirada do parafuso que prende o invólucro da PCI e remoção da mesma	Chave de Fenda
5	Retirada dos dois parafusos que prendem a PCI	Chave de Fenda
6	Liberação dos <i>snap-fits</i> que prendem o LCD na parte inferior	Chave de Fenda
7	Remoção do teclado	Mãos
8	Remoção do alto-falante	Mãos
9	Remoção do LCD e parte inferior do teclado	Mãos
10	Remoção do microfone	Mãos

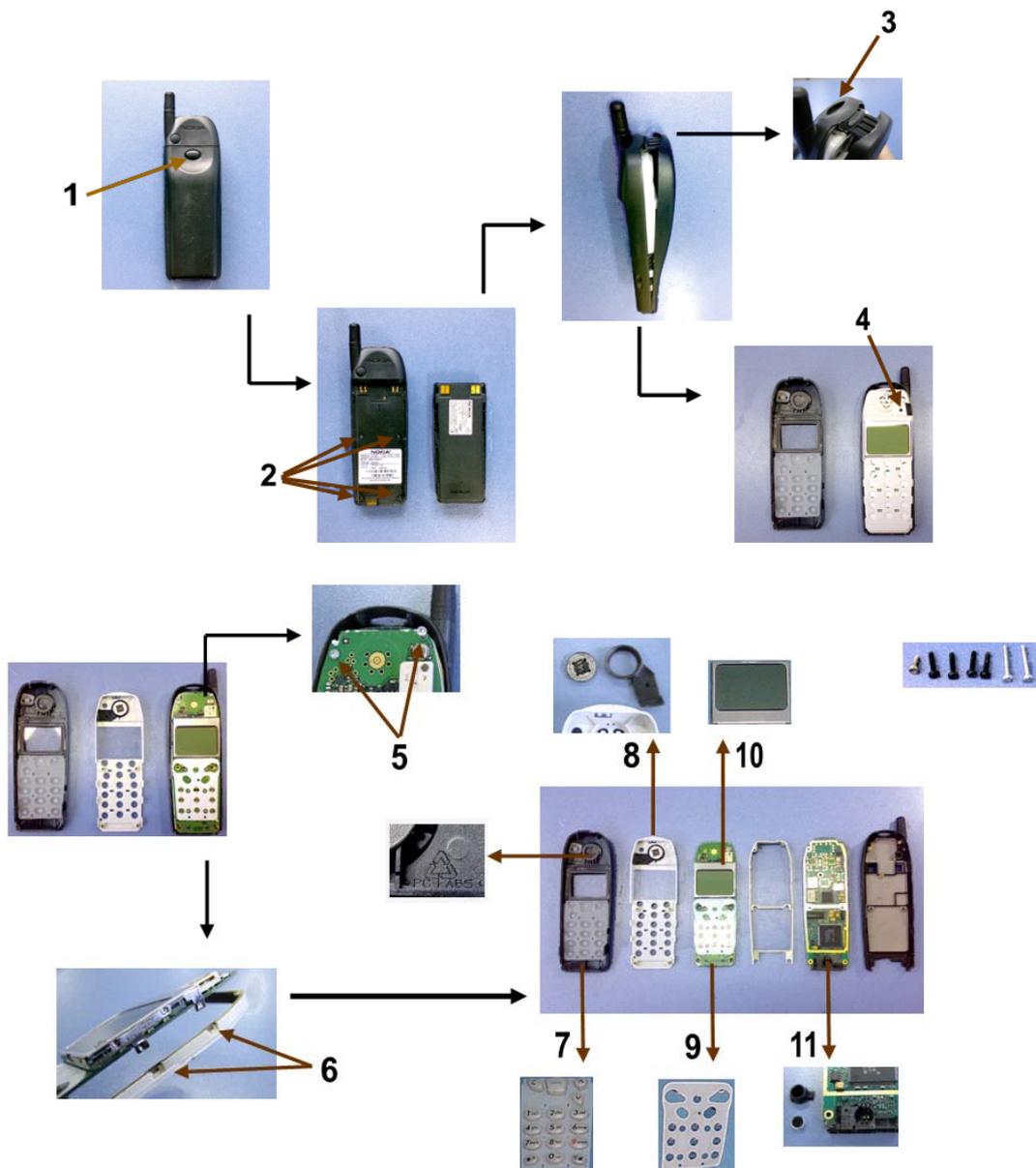


Figura 24 - Operações de desmontagem do telefone celular modelo Nokia 5120.

3.2 Desenvolvimento da Bancada de Testes de Baterias

Foi idealizada uma bancada capaz de testar diversas baterias simultaneamente, controlando os parâmetros de carga e descarga e, assim, possibilitar as operações adequadas para todos os tipos de baterias recarregáveis de pequeno porte. Após a elaboração do projeto elétrico (Figura 25) e mecânico, deu-se início a sua construção. A Figura 26 mostra o projeto mecânico em 3D e

uma das etapas da construção que consistiu na abertura de furos retangulares para as três chaves interruptoras dos resistores de cada saída.

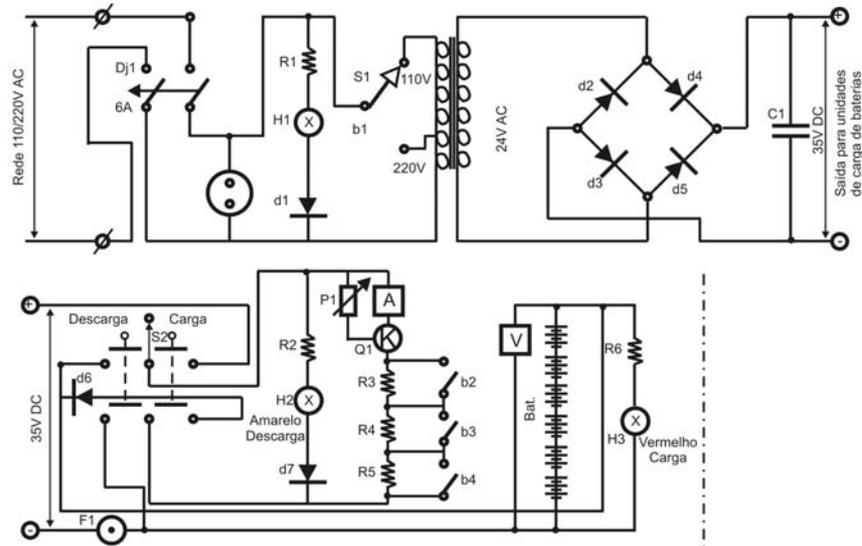


Figura 25 - Projeto elétrico da bancada para testes em células de baterias.

A bancada foi projetada para possuir três saídas idênticas alimentadas por uma fonte geral de alimentação. Esta fonte foi equipada com um transformador para rede 110V ou 220V protegido por disjuntor bipolar de 6A, sendo que o seu secundário alimenta uma ponte de Wheatstone de 10A com capacitor eletrolítico de $2200\mu\text{F} \times 63\text{V}$ de modo a gerar uma voltagem de saída de 35Vcc.

Para ajuste de corrente e voltagem cada saída tem três resistores, R1, R2 e R3 de 68Ω , 33Ω , e 10Ω , respectivamente. Cada um tem ligado em paralelo uma chave de “liga/desliga”. A posição “liga” deixa a chave aberta e, a posição “desliga”, a deixa fechada curto-circuitando a mesma.

Um transistor de potência permite o ajuste fino da corrente (de carga ou descarga) que é feito através de um potenciômetro. Um fusível individual de 2A fornece a proteção contra curtos-circuitos em cada saída. Um voltímetro de 0/30V e um miliamperímetro de 0/1A em cada saída permitem visualizar as condições de operação. Cada saída também possui uma chave seletora de “carga” (LED vermelho) e, “descarga” (LED amarelo) para possibilitar a escolha de operação.

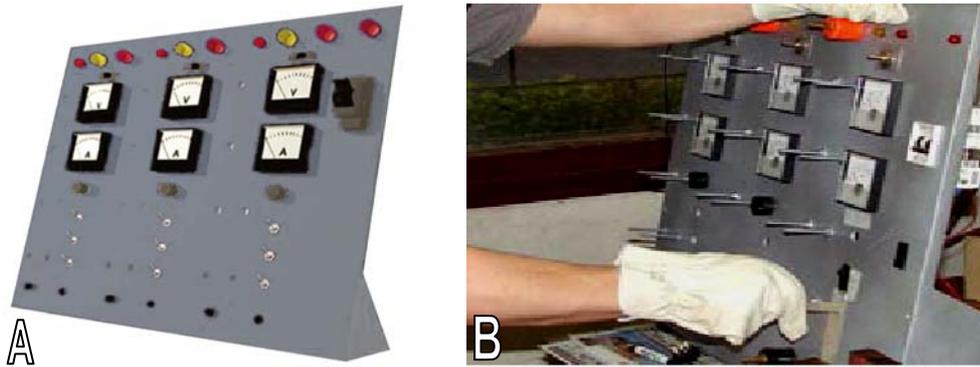


Figura 26 - Projeto mecânico da bancada em 3D em A e uma das etapas de construção em B.

3.3 Metodologia Desenvolvida para a Avaliação de Células

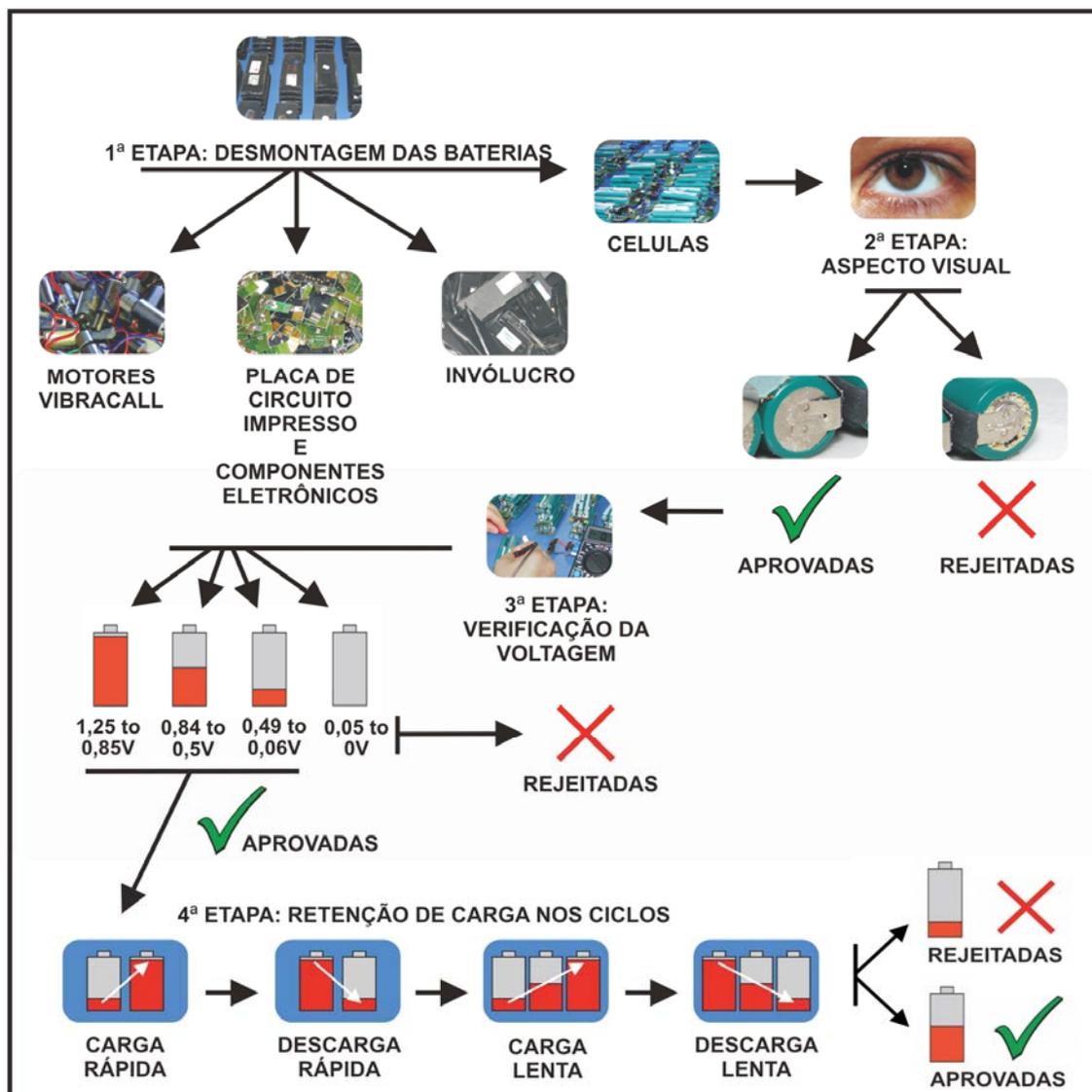


Figura 27 - Etapas da metodologia de avaliação do potencial de utilização de células descartadas.

Foi desenvolvida uma metodologia para avaliação de células composta basicamente de quatro etapas ilustradas na Figura 27.

3.3.1 Desmontagem das Baterias

Após definição do modelo em questão a ser avaliado, a primeira etapa da metodologia desenvolvida para a avaliação de células foi de desmontagem das baterias. Para isso, assim como na desmontagem dos celulares, organizou-se uma estação de trabalho que consistiu numa bancada iluminada com ferramental para forçar as junções nas partes mais frágeis dos invólucros, para a remoção tanto das células como das placas de circuito impresso (PCI's) presentes nas baterias. Nesta etapa de desmontagem, tomou-se cuidado para evitar um acidental curto-circuito com a carcaça das células, bem como para não danificar as mesmas.

Como o volume produzido e comercializado de baterias é enorme, procurou-se avaliar a maior quantidade possível de células a fim de que a amostragem maximizasse sua representatividade. Assim, escolheram-se os modelos recebidos em maior quantidade. A Tabela 10 lista os modelos de baterias avaliados e suas respectivas quantidades. A Figura 28 e a Figura 29 mostram uma ilustração dos modelos de baterias de NiMH e de Li-Íon que foram escolhidos para serem desmontadas e avaliadas devido a sua maior disponibilidade entre as recebidas nas doações feitas para este trabalho.

Tabela 10 - Modelos de baterias avaliados neste trabalho e suas respectivas quantidades.

Marca	Modelo	Sistema	Capacidade (mAh)	Quantidade
Nokia	BMS-3	NiMH	1000	237
Nokia	BMC-3	NiMH	900	97
Ericsson	BKB 193 (1-105)	NiMH	900	65
Nokia	BL-5C	Li-Ion	850	97
Siemens	V30145-K1-X250	Li-Ion	700	62
LG	LGIP – G830	Li-Ion	830	68



Figura 28 - Baterias NiMH, 3,6V: Nokia modelo BMS-3, 1000 mAh em A, Nokia modelo BMC-3, 900 mAh em B e Ericsson BKB 193 (123-105), 900 mAh em C.



Figura 29 - Baterias Li-Íon, 3,7V: Nokia modelo BL-5C, 850mAh em A e, Siemens modelo V30145-K1310-X250, 700 mAh em B e LGIP-G830, 830 mAh em C.

Tabela 11 - Procedimento com as operações de desmontagem da bateria BMS-3.

Operação	Descrição	Ferramenta
1	Inserir uma chave de fenda pequena no encaixe da parte superior e forçar até que o mesmo se rompa e gere uma pequena abertura no invólucro	Chave de fenda pequena
2	Com uma chave de fenda maior, continuar forçando a abertura desde a parte superior longitudinalmente até a parte inferior	Chave de fenda média
3	Forçar a abertura do invólucro manualmente até a separação total da parte frontal da traseira	Mãos
4	Remoção manual das células da parte traseira do invólucro	Mãos
5	Remoção do motor vibra-call e da PCI com alicate de corte	Alicate de corte

A Figura 30 mostra as vistas da bateria BMS-3 e a Figura 31 mostra o procedimento com as operações de desmontagem da mesma e a Tabela 11 apresenta a descrição e a ferramenta utilizada em cada uma delas. Foram medidos os tempos de desmontagem de 5 baterias deste mesmo modelo e, para cada operação, foi registrada a respectiva duração. Assim como na desmontagem

do telefone, o tempo total de cada operação foi calculado com a Equação 6 e o tempo total com o somatório de todas as operações envolvidas.



Figura 30 - Vistas da bateria Nokia BMS-3. Frontal (A), traseira (B), superior (C) e inferior (D).

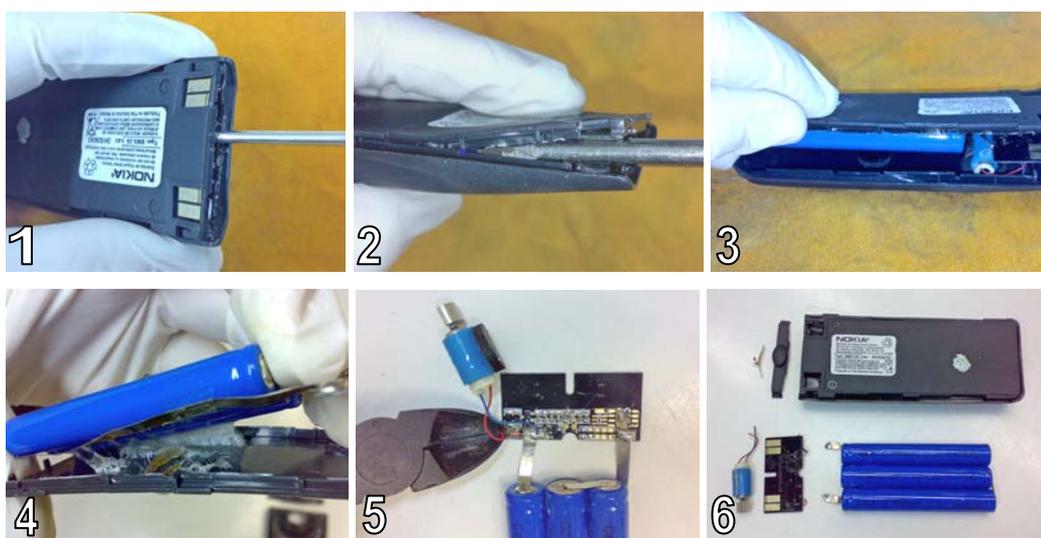


Figura 31 - Operações de desmontagem da bateria Nokia BMC-3 (1-5). Em 6 a bateria desmontada.

3.3.2 Análise do aspecto visual das células

Após a desmontagem e retirada das células, na segunda etapa é feita uma análise do aspecto superficial dos pólos positivos e negativos das células, identificando, através de inspeção visual, aquelas cujos terminais possuem a presença de vazamento, uma camada oxidada, bem como se as mesmas apresentam deformação (estufamento) provavelmente devido a uma pressão

interna elevada. A detecção de qualquer um desses aspectos citados caracterizou a célula como degradada impossibilitando a continuação do estudo de reuso da mesma. Na Figura 32 são mostrados dois casos (células da bateria de NiMH modelo BMC-3 em A e de Li-Íon modelo V30145-K1310-X250) exemplificando a rejeição nesta etapa.

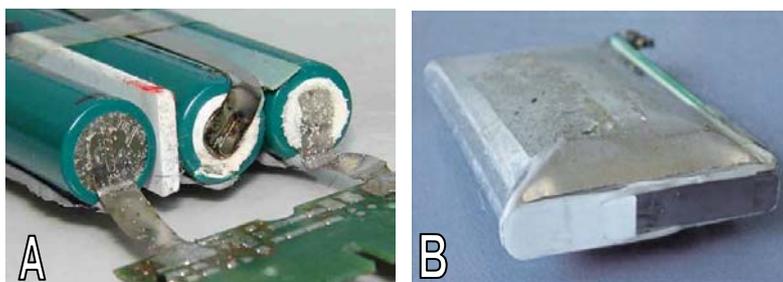


Figura 32 - 2ª etapa: inspeção visual do aspecto superficial. Presença de vazamento nas células de uma bateria de NiMH em A e, uma célula de Li-Íon “estufada” em B.

3.3.3 Verificação da voltagem das células

As células aprovadas pela inspeção visual passaram para a terceira etapa do processo de seleção, onde as tensões remanescentes das mesmas foram medidas e, assim, classificadas, identificadas e separadas em função do respectivo valor de voltagem em: alta (1,25 a 0,85V), média (0,84 a 0,5V), baixa (0,49 a 0,06V) e zerada (0,05 a 0V), conforme mostra a Tabela 12. As células que apresentam valores de voltagem entre 0,05 a 0V foram rejeitadas. Nesta etapa também foi realizada a remoção da PCI da bateria (Figura 33).

Tabela 12 - Classificação dada na 3ª etapa em função dos valores de voltagem remanescente de cada célula aprovada na etapa anterior.

Classificação	NiMH (V)	Li-Íon (V)
CA	1,25 a 0,85	3,8 a 2,5
CM	0,84 a 0,5	2,49 a 1,31
CB	0,49 a 0,06	1,3 a 0,11
CZ	0,05 a 0	0,1 a 0

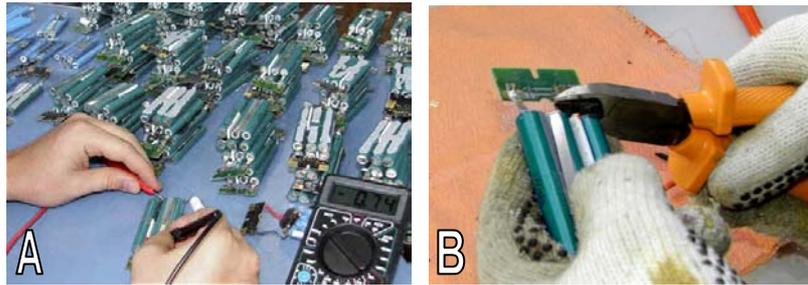


Figura 33 - 3ª etapa: medição da voltagem remanescente com multímetro em A e, remoção da PCI da bateria em B.

3.3.4 Testes de performance em ciclos de carga e descarga

As células com carga remanescente média ou alta foram então descarregadas até atingirem um nível de carga baixo e, então, conectadas umas às outras através de fios soldados nas mesmas, certificando-se sempre de ligar o pólo positivo de uma com o negativo de outra. A Figura 34 mostra esse procedimento sendo feito para a bateria Nokia BMS-3. Para respeitar o limite da bancada de testes, evitou-se que a quantidade de células ligadas em série ultrapassasse 20 V. Uma vez que neste trabalho utilizaram-se somente baterias de NiMH e Li-Íon cujos valores de voltagem nominal das células são de 1,2V e 3,7 V, respectivamente, a quantidade de máxima de células ligadas em série em cada saída da bancada foi de 16 células de NiMH e 5 de Li-Íon, totalizando no máximo, assim, 19,2V e 18,5V, respectivamente.

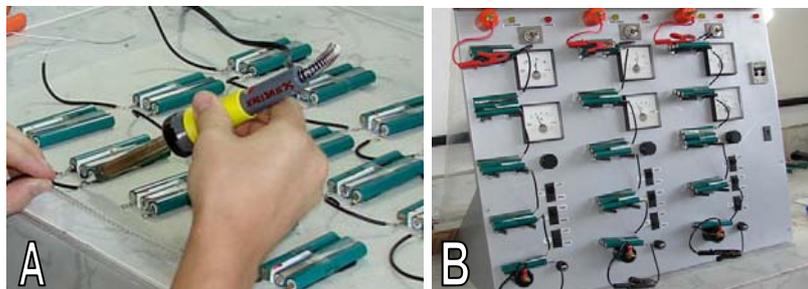


Figura 34 - Ligação dos conjuntos de células em série (em A) para posterior instalação na bancada (em B).

O monitoramento da voltagem nos terminais da bateria possibilita de forma simples e rápida uma análise do estado de carga em que se encontram as

células. Considerando que com o aumento da ciclagem esse valor de voltagem tende a diminuir, pois estas baterias apresentam uma capacidade de retenção de carga inferior e uma resistência interna elevada, na sequência do processo de avaliação (quarta etapa), as células foram testadas passando basicamente por 4 ciclos, sendo dois de carga e dois de descarga [18].

O método de carga utilizado foi o de corrente constante. As correntes utilizadas foram limitadas para evitar um aumento excessivo de temperatura e para não exceder a taxa da reação de recombinação de oxigênio, já que isso é prejudicial às células e poderia degradá-las. Os valores das correntes e a duração dos ciclos foram definidos de modo a aplicar cargas e descargas pouco profundas para oferecer um ciclo de vida maior para as células. Foi levado em consideração que os maiores níveis de capacidade podem ser atingidos com 150% de carga de entrada e o ciclo de vida máximo é atingido com 120% de carga de entrada, mas com menor capacidade devido à insuficiente carga de entrada.

As células foram examinadas na bancada de testes numa sala climatizada na temperatura de 23°C e o procedimento adotado está descrito a seguir: uma vez que as células já estivessem devidamente instaladas e, antes de iniciar qualquer um dos ciclos de carga ou descarga, verifica-se se as três chaves das resistências estão na posição “liga” e que o potenciômetro esteja girado no sentido anti-horário até o fim para que o ajuste das correntes possa ser feito de forma crescente e controlada.

No primeiro ciclo de carga, emprega-se uma “Carga Rápida”, onde a corrente (I_c) é ajustada em 60% da capacidade da bateria durante o tempo de 1h. Decorrido esse tempo, com um multímetro, verifica-se a voltagem em cada célula, registrando-se as leituras numa planilha e descartando-se aquelas (caso haja alguma) com voltagem inferior a 50% do valor da voltagem nominal.

No primeiro ciclo de descarga, emprega-se uma “Descarga Rápida”, onde a corrente (I_d) é ajustada em 50% da capacidade durante o tempo necessário para que a voltagem do conjunto de células em série chegue a um valor de aproximadamente 60% da voltagem nominal. Em seguida, verifica-se a voltagem em cada célula, registrando-se as leituras na mesma planilha e descartando-se aquelas com voltagem inferior a 20% do valor da voltagem nominal (caso haja alguma).

No segundo ciclo de carga, emprega-se uma “Carga Lenta”, onde a corrente (I_c) é ajustada em 40% da capacidade da bateria durante o tempo de 3h. Após, baixa-se a I_c para 20 % da capacidade por mais 20 minutos e mede-se a voltagem em cada célula (o valor medido deverá ser ligeiramente superior ao nominal), registrando-se as leituras e descartando-se aquelas com voltagem inferior a 90% do valor da voltagem nominal (caso haja alguma).

No segundo ciclo de descarga, emprega-se uma “Descarga Lenta”, onde a corrente (I_d) é ajustada em 30 % da capacidade da bateria. Mantém-se a descarga durante o tempo necessário para que a voltagem do conjunto de células em série chegue a um valor de aproximadamente 60% da voltagem nominal. Em seguida, verifica-se novamente a voltagem em cada célula, registrando-se as leituras na mesma planilha e descartando-se aquelas com voltagem inferior a 25 % do valor da voltagem nominal (caso haja alguma).

Os dados registrados nas planilhas foram computados e gerados gráficos de cada ensaio comparando o desempenho de cada célula. Também foram impressas etiquetas com códigos que identificam e qualificam as mesmas conforme a carga apresentada após os ciclos de carga e descarga em função dos níveis de voltagem listados na Tabela 13. O código informa o nível de carga remanescente, a posição da célula, a saída na bancada e os conceitos obtidos nas etapas de descarga rápida e lenta. A Tabela 14 apresenta um exemplo da identificação que é impresso numa etiqueta e colado em cada uma das células aprovadas para reuso. Após serem etiquetadas, as células foram embaladas, dando atenção especial aos pólos negativo e positivo que foram protegidos com fita isolante, para serem estocadas e reutilizadas posteriormente.

Tabela 13 - Conceitos dados às células qualificando o desempenho das mesmas durante os ciclos de descarga rápida e descarga lenta em função dos níveis de voltagem.

Conceito		A	B	C	D	E	F	FF
Voltag em (v) / Célula	NiMH	1,45 a 1,1	1,09 a 0,9	0,89 a 0,7	0,69 a 0,5	0,49 a 0,3	0,29 a 0,1	0,09 a 0
	Li-Íon	4,5 a 3,3	3,29 a 2,7	3,69 a 2,1	2,09 a 1,5	1,49 a 1,0	0,9 a 0,3	0,29 a 0

Tabela 14 - Exemplo de etiqueta com código impresso que é colada em cada célula aprovada para o reuso.

	CM	3	S3	1	DR	FF	DL	F
---	----	---	----	---	----	----	----	---

A Figura 35 mostra a bateria NiMH Nokia BMC-3 identificada exemplificando o uso das etiquetas com os códigos que qualificam o desempenho das células durante o ciclo de avaliação e que também permitem rastrear as mesmas. Na mesma figura também é mostrado como as células são embaladas individualmente e estocadas (no exemplo os modelos NiMH Nokia BMC-3 e Li-Íon Nokia BL-5C).

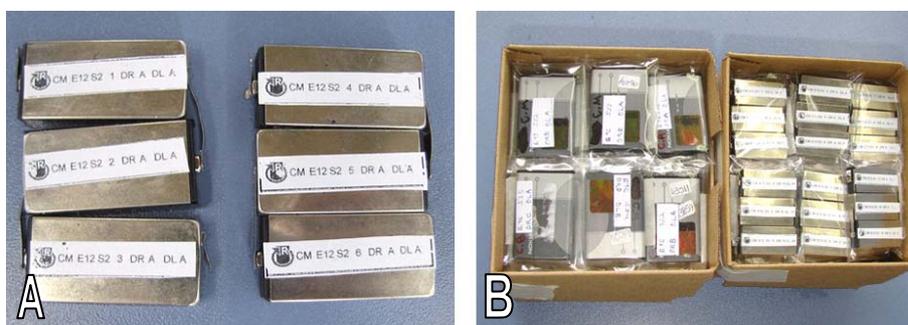


Figura 35 - Células etiquetadas da bateria modelo BMC-3 em A. Em B, células modelo BMC-3 e modelo BL-5C estocadas.

Comparação com células novas

Para qualificar o desempenho das células candidatas ao reuso foram feitas medições cronopotenciométricas (variação da voltagem no tempo) em novos ciclos de carga e descarga lenta para células novas e para as células aprovadas com conceitos A e C. No ciclo de descarga lenta a variação da resistência interna no tempo também foi analisada. Foram utilizadas 9 baterias de NiMH marca Nokia modelo BMC-3, 900mAh e 9 de Li-Íon marca Nokia modelo BL-5C, 850mAh. Para medir a resistência interna usou-se o módulo da variação da voltagem, dividido pela corrente no mesmo instante considerado.

3.4 Invólucros para Novas Baterias

Uma vez avaliadas e aprovadas diversas células de baterias de telefone celular, foi pertinente estudar também a necessidade de as mesmas terem um invólucro, principalmente em aplicações onde há requerimentos mecânicos não usuais, como choques ou acelerações elevadas. Neste sentido, a seguir será abordada a fabricação de novos invólucros através do processo de *vacuum forming* também do processo de injeção.

Projeto de Novos Invólucros de Baterias através de *Vacuum Forming*

A moldagem por *vacuum forming* (ou termoformagem) permite a confecção de peças relativamente simples como os invólucros a um custo relativamente baixo. O processo consiste na sucção do ar através de pequenos furos em volta da peça a ser obtida, havendo assim a moldagem por vácuo. Em contato com o molde, o material resfria e endurece, formando, neste caso, o invólucro com as dimensões desejadas.

Foram projetados três invólucros, de modo que cada um fosse formado por duas partes: uma menor e outra maior que se encaixaria como uma tampa. Para isso, mediu-se as dimensões das células de dois modelos de baterias listados na Tabela 15 e mostrados na Figura 36.

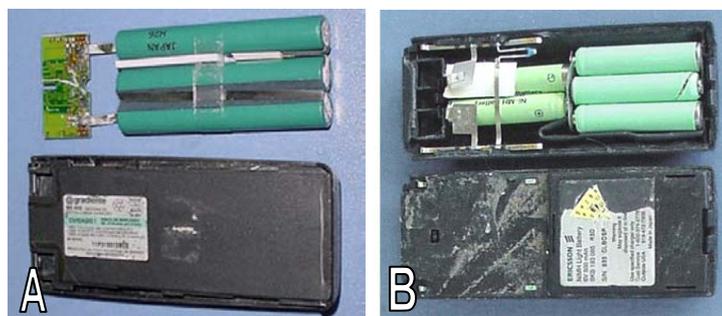


Figura 36 - Baterias fechadas com suas células expostas. Modelos: Nokia BMS-3 em A e Ericsson BKB 193 1021 em B.

Tabela 15 - Listagem dos dois modelos de baterias escolhidos.

Bateria	Dimensão das Células (mm)	Arranjo Espacial
Nokia BMS-3	66,7 x 10,4	3 células: 3
Ericsson BKB 193 1021	42,2 x 13,5	5 células: 3 2
		4 células: 4 2

Na proposta dimensional para os três diferentes invólucros, estipulou-se um espaçamento entre células de 1mm e espaço externo ao conjunto de 3mm em todas as direções.

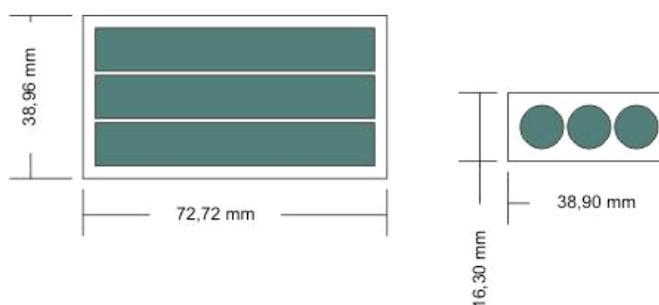


Figura 37 - Arranjo espacial com 3 células do modelo Nokia BMS-3.

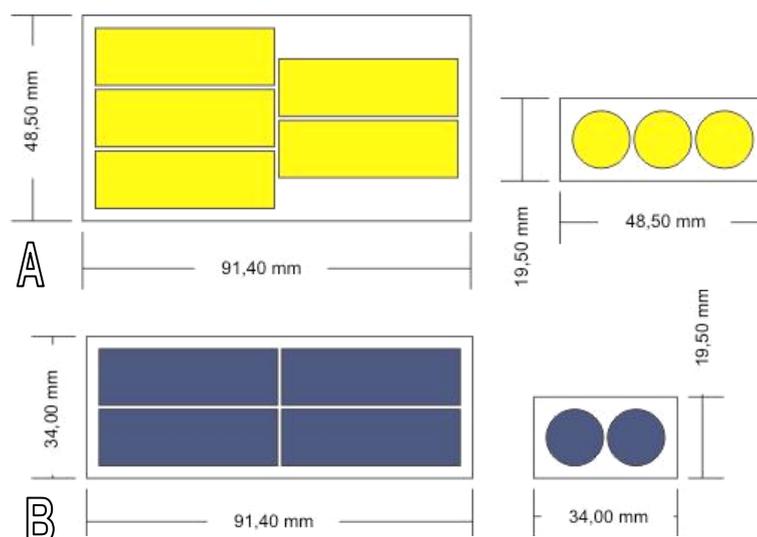


Figura 38 - Modelo Ericsson BKB 193 1021. Arranjo espacial com 5 células em A e com 4 células em B.

Uma vez definidas as dimensões internas dos invólucros, foi feita a modelagem computadorizada da matriz que viria a ser posteriormente usinada por fresamento. O arquivo 3D digital foi feito com o software *SolidWorks*. A matriz foi usinada em mdf utilizando-se uma fresadora CNC Roland modelo Modela PRO MDX-650.

Após a operação de usinagem da matriz, foi aplicada uma camada de *primer* (base que serve de interface entre a matriz e os invólucros e proporciona melhor aderência dos mesmos) na mesma, seguida de lixamento com as granulometrias 240 e 400 para melhorar o acabamento superficial da matriz e, conseqüentemente, dos invólucros.

Para o modelamento dos invólucros utilizou-se uma máquina de *vacuum forming* VACUNET/2 *Eletroforming* com os seguintes parâmetros: temperatura de aquecimento de 400°C e tempo de aquecimento de 1 minuto. O material utilizado foi um filme plástico de PVC transparente. Dentre as características deste material que o tornam adequado para ser utilizado como nos invólucros fabricados neste processo destacam-se: rigidez, transparência, impermeabilidade, resistências química e à temperatura [88].

O material foi primeiramente aquecido e depois posicionado sobre o molde, onde se aplicou vácuo. Tanto a usinagem como o modelamento dos invólucros, foram feitos no Laboratório de Prototipagem da UCS em Bento Gonçalves. A Figura 39 mostra o fresamento da matriz dos moldes em MDF e o modelamento da placa de PVC (transparente) com a forma da matriz.



Figura 39 - Fresamento da matriz dos moldes em MDF em A, modelamento da placa de PVC (transparente) com a forma da matriz em B e C.

Projeto de novos invólucros com *snap-fits*

Para a fabricação de peças com detalhes de maior complexidade e que requerem menor variabilidade, como os *snap-fits*, o processo mais indicado é o de moldagem por injeção. Nele o material polimérico. O processo envolve mudança de estado físico do material polimérico e introdução do mesmo em um molde fechado por intermédio de pressão fornecida por um êmbolo para adquirir a forma final. É caracterizado pelas seguintes etapas: alimentação, plastificação (homogeneização), enchimento do molde, resfriamento, abertura do molde e extração da peça. A moldagem por injeção é indicada para grandes quantidades de peças a serem fabricadas, devido ao elevado custo para confecção dos moldes (material, usinagem e tratamento térmico).

Foram projetados dois conceitos de invólucros de células de bateria que usem *snap-fit* para facilitar a montagem e desmontagem e os mesmos são mostrados na Figura 40. No primeiro conceito, o invólucro teria uma articulação e seriam utilizados *snap-fits* apenas de um lado e, no segundo, eles seriam utilizados dos dois lados e permitiriam a separação completa da parte superior e inferior. A utilização de uma ferramenta de alta disponibilidade (o clipe utilizado para fixar papéis), permitiria fáceis montagens e desmontagens.

Para fazer uma análise do dimensionamento do *snap-fit* de modo que, durante o encaixe, a deflexão da ponta não ultrapassasse a da deformação elástica do material, primeiramente fez-se um corte na parte de cima do invólucro na região da perna do *snap*. Posteriormente, escolheu-se um material onde foram definidas suas propriedades mecânicas: de módulo elasticidade igual a 2500MPa e de coeficiente de Poisson igual a 0,4 (que são equivalentes as do material PC/ABS) e uma seção sólida homogênea, que foi associada à geometria. Foram então aplicadas as restrições nas laterais (seções transversais) da base, conforme mostra a Figura 41, e então, foi feita a deflexão na ponta do *snap* onde está a flecha laranja. Após, foi gerada a malha, e posteriormente, a análise linear estática utilizando o *software* Abaqus 6.8-1.

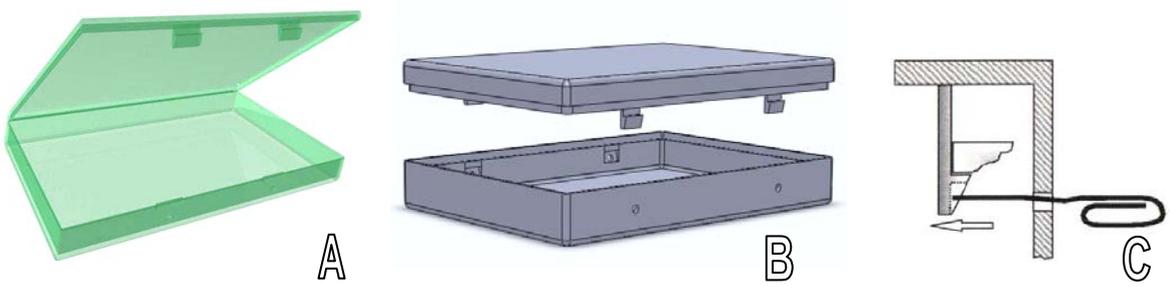


Figura 40 - Conceitos de invólucro com *snap-fits* em A e B e o design para desmontagem com a utilização de uma ferramenta de alta disponibilidade, que é o clipe em B.

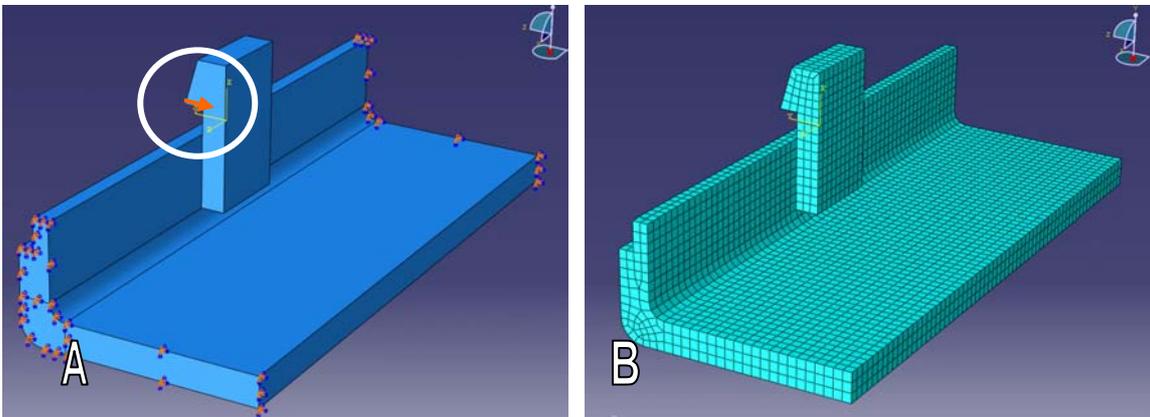


Figura 41 - Aplicação das restrições nas laterais e deflexão na ponta do *snap* em A. Em B, a malha gerada.

4 RESULTADOS

4.1 Depoimentos coletados

A Tabela 16 apresenta o resultado da pesquisa com a aplicação do questionário listando a quantidade média de baterias coletadas calculada com as informações obtidas nos questionamentos realizados com os responsáveis das empresas consultadas. Os gerentes das assistências técnicas, em sua maioria, relataram que todas as baterias coletadas nestes pontos têm como destino os fabricantes e que a coleta é feita periodicamente duas vezes por ano em média. Em alguns casos, foi informado que os destinos finais das baterias seriam nas sedes dos fabricantes em outros países, mas que antes do envio, as baterias permaneceriam armazenadas no Brasil até atingir um volume suficiente para encher um contêiner (aproximadamente 30ton.)

Nas lojas de agentes autorizados os relatos foram bem variados. Em lojas de bairro, onde o volume destas baterias é menor, as baterias são armazenadas durante muito tempo, algo em torno de um ano, até que se atinja um volume considerável, para então serem encaminhadas para a operadora de telefonia que está credenciada ou, quando existe uma assistência técnica autorizada na cidade, são entregues lá mesmo. Mas há muitos casos onde as baterias vão parar diretamente no lixo comum. Em lojas localizadas no centro das cidades, onde o volume coletado é maior, o material é armazenado normalmente em cilindros ou caixas para que posteriormente, as operadoras se encarreguem da coleta destes volumes. Porém, como nas lojas de bairro, também há casos de estabelecimentos que descartam as baterias no lixo comum.

Já nas grandes redes a coleta é feita de duas formas: quando o promotor de venda dos fabricantes passa pelas lojas para dar instrução aos vendedores, já aproveita para coletar estas baterias, mas isto é feito informalmente. A outra

maneira ocorre quando as operadoras de telefonia coletam estas baterias quando se atinge certo volume nestes pontos de venda.

Tabela 16 - Listagem das informações coletadas nas assistências técnicas, agentes autorizados e magazines.

Ramo de atividade	Atuam como ponto de coleta	Quantidade de baterias coletadas por mês	Recolhimento
Assistência Técnica	100 % Sim 0 % Não	0% 1 a 10 11,1% 11 a 20 55,6% 21 a 50 33,3% 51 a 100	0% Mensal 40% Trimestral 60% Semestral 0% Anual
Agentes Autorizados	84,2 % Sim 15,8 % Não	10,5% 1 a 10 73,7% 11 a 20 15,8% 21 a 50 0% 51 a 100	0% Mensal 10,5% Trimestral 84,2% Semestral 5,3% Anual
Grandes Redes	50 % Sim 50 % Não	25% 1 a 10 62,5% 11 a 20 12,5% 21 a 50 0% 51 a 100	0% Mensal 0% Trimestral 75% Semestral 25% Anual

4.2 Desmontagem dos Telefones Celulares

O trabalho de desmontagem ocorreu em sincronia com a equipe atuando de forma integrada. À medida que os telefones estavam sendo desmontados por uma pessoa, outro membro separava os componentes que em seguida eram levados por outra pessoa que abastecia a estação de trabalho de desmontagem com mais aparelhos.



Figura 42 - Equipe desmontando, separando os componentes e os mesmos sendo guardados ao passo que a linha de desmontagem era continuamente abastecida com novos aparelhos.

Tabela 17 - Telefones celulares desmontados e seus modelos de baterias de NiMH e Li-íon.

Descrição	Telefone Celular Desmontado	Bateria Utilizada
Ericsson KF 788 e sua bateria de NiMH de 4,8 V e 750 mAh Ericsson modelo BKB193121 R2A		
Motorola C331(T) e sua bateria de Li-íon de 3,7 V Motorola modelo SNN5595A M4L20821MEBM		
Motorola V2390 e sua bateria de NiMH composta por 3 células de 1,2 V e 700 mAh Motorola modelo SNN5542B		
Nokia 2220 desmontado e sua bateria de NiMH 3,6 V e 900 mAh Nokia modelo BMC-3		
Nokia 8260 desmontado e sua bateria de Li-íon 3,7 V e 1000 mAh Nokia modelo BLB-3		
Siemens A50 desmontado e sua bateria de Li-íon 3,7 V e 650 mAh Siemens modelo V30145-K1310-X215		
Celular Nokia 6225 desmontado e sua bateria de Li-íon 3,7 V e 720 mAh Nokia modelo BLD-3		
Nokia 5120 desmontado e sua bateria de NiMH 3,6 V e 1000 mAh Nokia modelo BMS-3		

A Tabela 17 mostra alguns dos telefones desmontados com seus principais componentes e suas baterias. A Tabela 18 lista os tempos de duração de cada operação da desmontagem do telefone celular Nokia 5120 calculados com a Equação 6 e, cujo tempo médio total correspondente ao somatório das mesmas foi de 1min. e 39s por aparelho.

Tabela 18 - Tempo de duração (em s) de cada operação de desmontagem do telefone celular Nokia 5120.

Operação	PF	NI	TM	TE	TD
1	0	1	3	2	5
2	3	4	2	3	23
3	1,5	1	3	2	6,5
4	3	1	2	3	8
5	0	2	2	3	10
6	0	4	3	2	20
7	1,5	1	3	2	6,5
8	0	1	3	2	5
9	0	2	3	2	10
10	0	1	3	2	5
Tempo Total de Desmontagem					99

A Figura 43 mostra fotos de alguns componentes retirados dos celulares, mostrando a simbologia do material para a reciclagem (policarbonato mais acrilonitrila butadieno estireno em A e B e magnésio em C. A Figura 44 mostra alguns elementos de junção: snap-fits em A e B, parafuso com fenda não convencional em C e cola em D.



Figura 43 - Apresentação do símbolo do material para a reciclagem: invólucros em A e B e estrutura metálica em C.

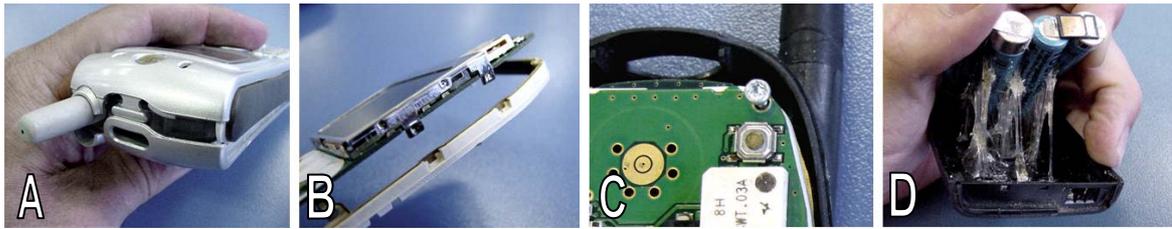


Figura 44 - Elementos de junção: *snap-fits* em A e B, parafuso com fenda não convencional em C e cola em D.

4.3 Avaliação de Células de Baterias

4.3.1 Desmontagem das Baterias

Tabela 19 - Células das baterias de NiMH desmontadas e suas PCI's.

Modelo	Células de bateria	PCI's
Nokia modelo BMS-3, 1000 mAh		
Nokia modelo BMC-3, 900 mAh		
Ericsson modelo BKB 193 (123-105), 900 mAh		

A Tabela 19 e a Tabela 20 mostram as células de NiMH e Li-Íon dos modelos de baterias desmontados, respectivamente. Nas baterias com células

cilíndricas de NiMH a remoção da PCI da bateria pôde ser feita após a retirada das células do invólucro. Nas células prismáticas o acesso aos pólos é mais difícil e, assim, foi necessário remover primeiro a PCI da bateria.

Tabela 20 - Células das baterias de Li-Íon desmontadas e suas PCI's.

Modelo	Células de bateria	PCI's
Nokia modelo BL-5C, 850 mAh		
Siemens modelo V30145-K1310-X250, 700 mAh		
Li-Íon LG modelo LGIP-G830, 830 mAh		



Figura 45 - Componentes diversos presentes nas baterias: termistores, capacitores, transistores, resistências entre outros em A. Cabos presentes em baterias mais antigas em B e componentes metálicos em C.

A Tabela 21 lista os tempos de cada operação de desmontagem da bateria BMS-3 calculados com a Equação 6, e cujo tempo médio total, correspondente ao somatório das mesmas foi de 44,5 s por bateria. A Figura 45 mostra alguns componentes presentes nas baterias, como (termistores, capacitores, transistores, resistências), bem como cabos (presentes nos modelos mais antigos) e componentes metálicos.

Tabela 21 - Tempo de duração (em s) de cada operação de desmontagem da bateria BMS-3.

Operação	PF	NI	TM	TE	TD
1	3	1	3	4	10
2	3	1	3	4	10
3	1,5	1	3	2	6,5
4	0	3	2	1	9
5	3	2	2	1	9
Tempo Total de Desmontagem					44,5

4.3.2 Etapas: 2, 3 e 4

A Tabela 22 apresenta uma listagem geral com os resultados do desempenho das células avaliadas nas diferentes etapas do processo com as quantidades absolutas e relativas. De acordo com os resultados na mesma, das 1197 e 227 células de NiMH e Li-Íon avaliadas na segunda etapa do processo, em média 813 e 195 foram aprovadas, respectivamente, o que corresponde a aproximadamente 72,2 % e 85,8 % do total nesta etapa. Através de um gráfico de barras verticais, a Figura 46 mostra a proporção entre os três modelos das células das baterias de NiMH em A e Li-Íon em B aprovadas nas diferentes etapas do processo. Pode-se observar que os modelos que tiveram maior frequência relativa de aprovação nas diferentes etapas foram o BKB 193 (123-105) e BL-5C para as baterias de NiMH e para as de Li-Íon respectivamente.

Tabela 22 - Resultados do desempenho dos modelos das células de NiMH e de Li-Íon avaliadas e aprovadas (quantidade absoluta e relativa).

Modelo	Etapa 1	Etapa 2		Etapa 3			Etapa 4			Total	
	Desmont.	Aspecto Visual		Verificação da Voltagem			Desempenho nos Ciclos			Aprovadas	
	Quantid. Analisada (células)	Abs.	Rel. (%)	Abs.	Rel. (%)	Total Parcial (%)	Abs.	Rel. (%)	Total Parcial (%)	Abs.	Rel. (%)
BMS-3	711	442	62,17	424	95,93	59,63	407	95,99	57,24	262	36,85
BMC-3	291	212	72,85	184	86,79	63,23	180	97,83	61,86	112	38,49
BKB 193 (123-105)	195	159	81,54	141	88,68	72,31	138	97,87	70,77	85	43,59
Total Parcial	1197	813	72,19	749	90,47	65,06	725	97,23	63,29	459	39,64
BL-5C	97	84	86,60	74	89,29	77,32	72	96,00	74,23	47	48,45
V30145-K1310-X250	62	53	85,48	45	84,91	72,58	44	97,78	70,97	30	48,39
LGIP - 411A	68	58	85,29	43	74,14	63,24	41	95,35	60,29	26	38,24
Total Parcial	227	195	85,79	162	82,78	71,05	157	96,38	68,50	103	45,03
Total	1424	1008	78,99	911	86,62	68,05	882	96,80	65,89	562	42,33

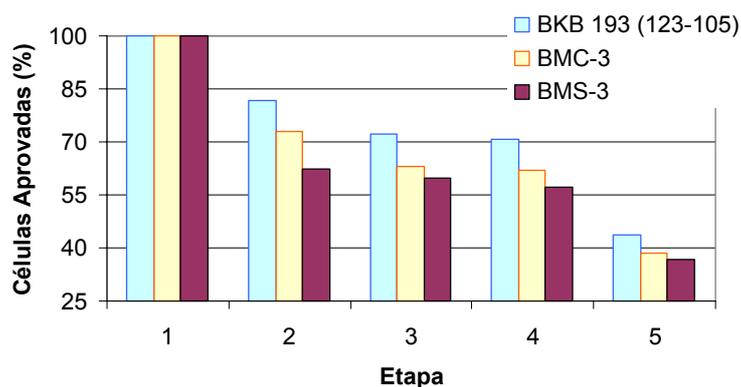


Figura 46 - Proporção das células aprovadas dos três modelos de baterias de NiMH nas diferentes etapas do processo de avaliação.

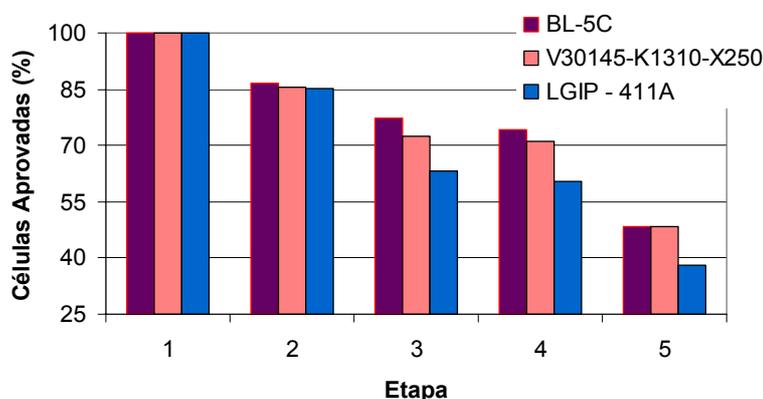


Figura 47 - Proporção das células aprovadas dos três modelos de baterias de Li-Íon nas diferentes etapas do processo de avaliação.

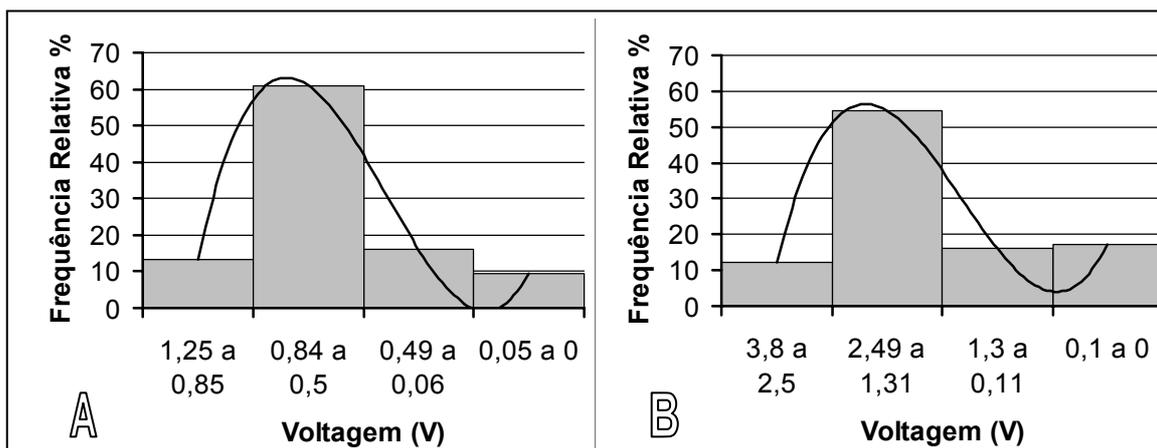


Figura 48 - Etapa 3 - Verificação da Voltagem das células de NiMH em A e de Li-Íon em B.

Após a terceira etapa, as 749 células de NiMH aprovadas na medição da voltagem remanescente passaram pelos ciclos de carga e descarga para avaliação de suas capacidades (quarta etapa). Destas, 24 foram rejeitadas porque não atingiram o valor de voltagem mínimo estabelecido durante os ciclos. Pode-se ver na Figura 49 - A que das 725 células restantes, aproximadamente 63 % tinham valores de voltagem maiores ou iguais a 0,7 V e foram aprovadas, enquanto que 37% foram rejeitadas por apresentarem valores menores que 0,7 V. Já para as células de Li-Íon, em média das 162 células de aprovadas na medição da voltagem remanescente, 5 foram rejeitadas porque não atingiram o valor de voltagem mínima estabelecido durante os ciclos. Pode-se ver na Figura 49 - B que das 157 células restantes, aproximadamente 67 % tinham valores de voltagem maiores ou iguais a 2,1 V e foram aprovadas, enquanto que aproximadamente 33% foram rejeitadas por apresentarem valores menores que 2,1V.

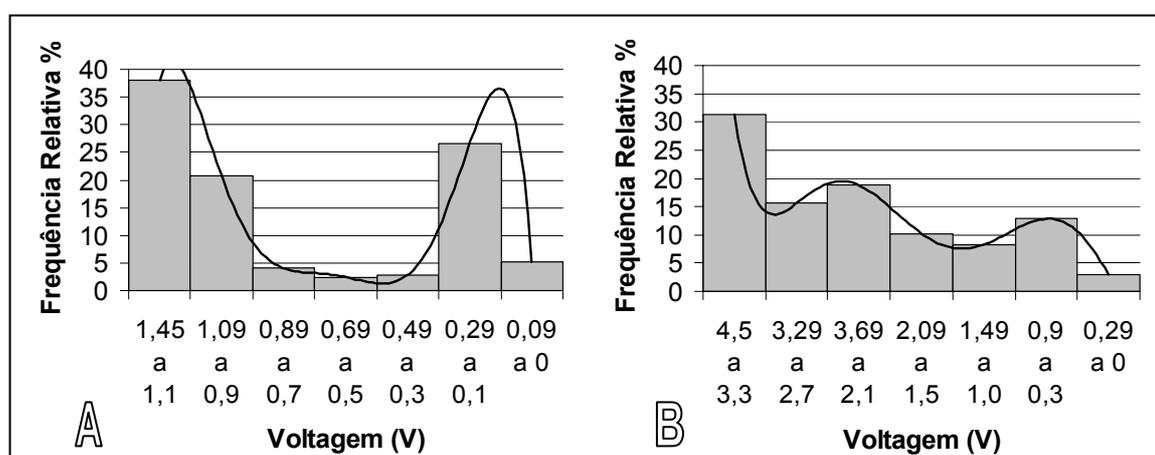


Figura 49 - Etapa 4 – Desempenho nos ciclos de carga e descarga das células de NiMH em A e de Li-Íon em B.

A Figura 50 mostra através de um gráfico de barras verticais uma comparação entre a média das baterias e células dos três modelos de NiMH aprovadas e rejeitadas nas etapas 2 e 3 do processo. Observa-se que a média do número de células de NiMH consideradas aprovadas nas etapas 2 e 3 foram de 73% e 63%, respectivamente, enquanto que o número de baterias consideradas aprovadas nestas etapas foi de apenas 48% e 30%, respectivamente.

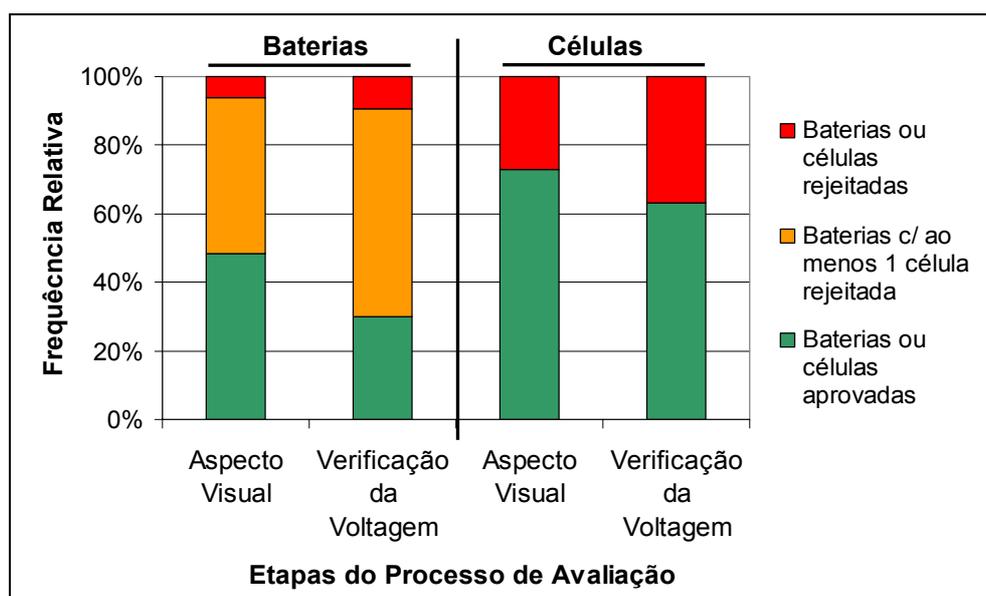


Figura 50 - Relação entre a frequência relativa de células e baterias aprovadas e rejeitadas nas etapas 2 e 3 do processo de avaliação.

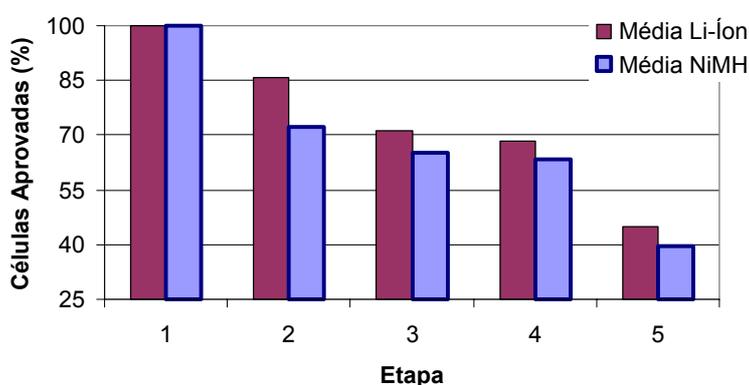


Figura 51 - Comparação das médias das células aprovadas dos três modelos de baterias de NiMH com os três modelos de Li-Ion nas diferentes etapas do processo de avaliação.

A Figura 51 mostra através de um gráfico de barras verticais uma comparação entre a média das células dos três modelos de baterias de NiMH e de Li-Íon aprovadas nas diferentes etapas do processo onde se observa uma proporção de aprovação maior para as de Li-Íon, principalmente na etapa de análise do aspecto superficial onde a diferença nas médias foi de aproximadamente 13%.

Comparação com células novas

A seguir são apresentados os resultados das medições cronopotenciométricas comparando o desempenho das células novas com o das aprovadas para reuso com conceitos A e C nos ciclos de carga e descarga lenta. Conforme se pode ver na Figura 52, onde são mostrados os ciclos para células de NiMH, no ciclo de carga os comportamentos das células novas e das aprovadas com conceitos A e C são semelhantes com uma diferença da ordem de centésimos de volts ao longo do ciclo. Já no ciclo de descarga, a diferença de comportamento entre as células na região de estado de carga baixo é muito mais evidente. As células novas levaram cerca de 3h15min para atingirem 1,15 V, enquanto que as aprovadas com conceitos A e C levaram cerca de 2h40min e de 2h05min respectivamente.

A Figura 53 mostra a variação da resistência interna com o tempo na descarga lenta das células de NiMH novas e aprovadas para reuso com conceitos A e C. Pode-se observar, comparando com o ciclo de descarga da Figura 52, que na medida em que o estado de carga atinge valores baixos, a resistência interna cresce rapidamente e, ao atingir valores próximos de $0,2 \Omega$, a voltagem das células já decresceu a valores próximos de 1,1V que foi o valor considerado como ponto de corte.

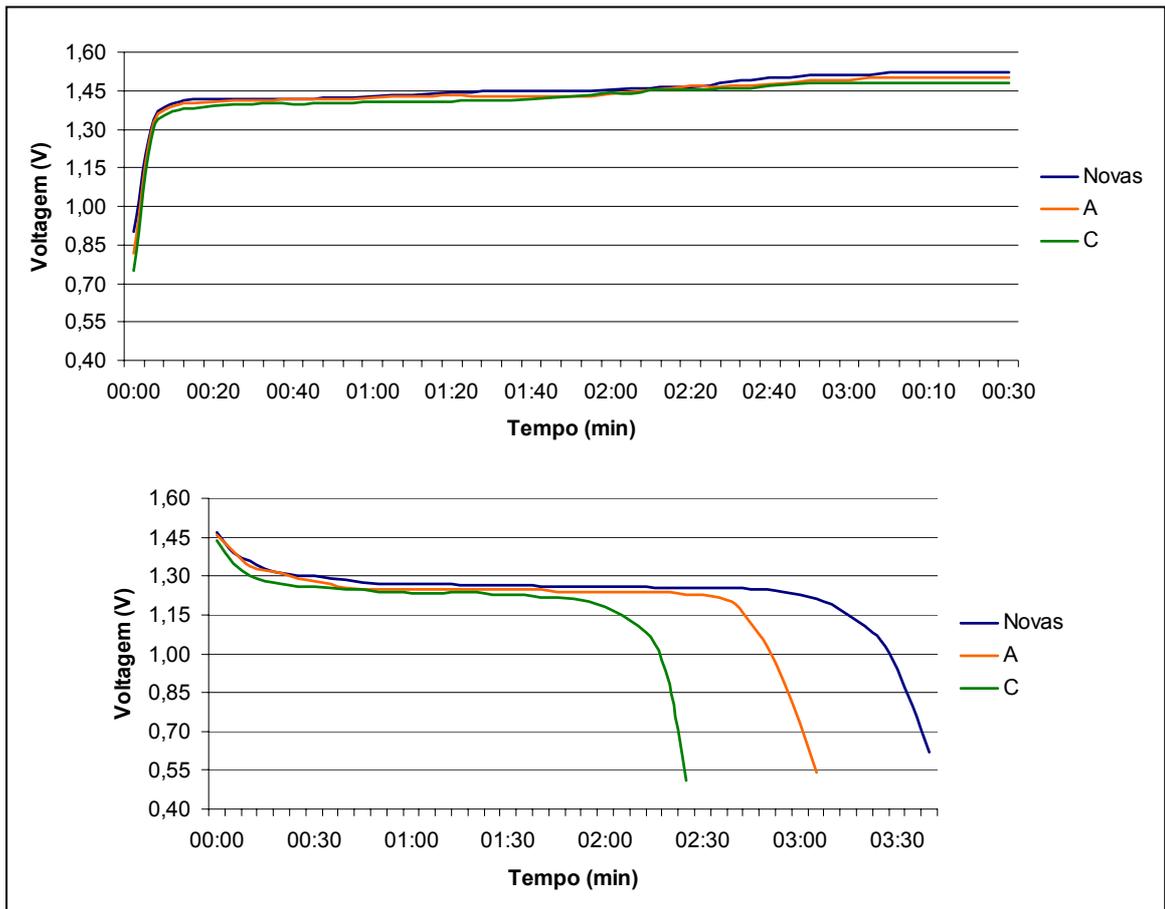


Figura 52 - Ciclos de carga e descarga lenta para células de NiMH novas e aprovadas para reuso com conceitos A e C.

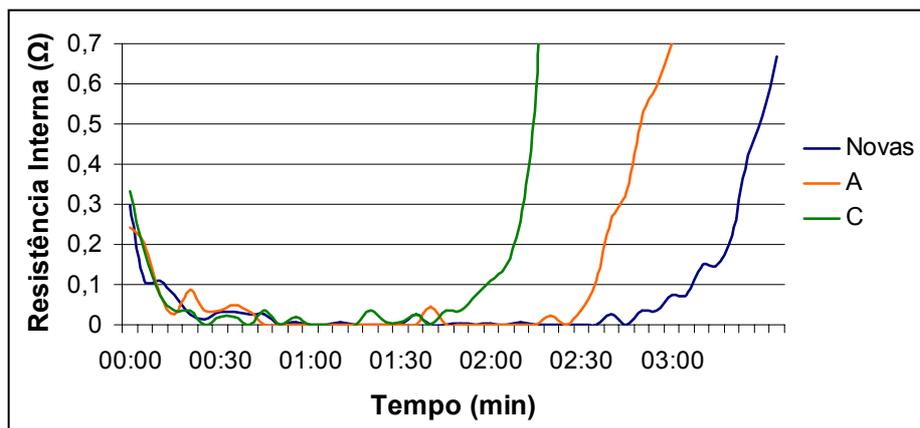


Figura 53 - Variação da resistência interna com o tempo na descarga lenta das células de NiMH novas e aprovadas para reuso com conceitos A e C.

Conforme se pode ver na Figura 54, onde são mostrados os ciclos para células de Li-Íon, no ciclo de carga, assim como nas células de NiMH, os

comportamentos das células novas e das aprovadas com conceitos A e C são semelhantes com uma diferença da ordem de décimos de volts ao longo do ciclo. No ciclo de descarga, novamente, assim como nas de NiMH, nas de Li-Íon também se observa uma diferença de comportamento mais pronunciada entre as células na região de estado de carga médio a baixo. Porém, as células aprovadas com conceito C apresentaram uma voltagem cerca de 3 décimos menor do que as novas durante todo o ciclo de descarga. As células novas levaram cerca de 3h05min para atingirem 3,5V, enquanto que as aprovadas com conceitos A e C levaram cerca de 2h25min e de 1h30min respectivamente.

A Figura 55 mostra a variação da resistência interna com o tempo na descarga lenta das células de Li-Íon novas e aprovadas para reuso com conceitos A e C. Pode-se observar, comparando com o ciclo de descarga da Figura 54, que na medida em que o estado de carga atinge valores baixos, a resistência interna cresce rapidamente e, ao atingir valores próximos de $0,4\Omega$ a voltagem das células já decresceu a valores próximos de 3,25V que é o valor considerado como ponto de corte.

Para estimar a perda de capacidade devido à ciclagem das células aprovadas para reuso em relação à capacidade das novas, foram comparadas as diferenças de tempo na descarga lenta até a voltagem do ponto de corte (considerado como 1,1 V e 3,25 V para os sistemas de NiMH e de Li-Íon respectivamente). Conforme os resultados listados na Tabela 23, células de NiMH e de Li-Íon aprovadas com conceito A apresentaram em média 82,5 e 89,7 % da capacidade de suas respectivas células novas.

Tabela 23 - Perda de capacidade das células aprovadas para reuso em relação à capacidade de células novas.

	Voltagem de corte	Tempo (min.)			Perda de Capacidade (%)		Capacidade disponível (%)	
		Nova	A	C	A	C	A	C
NiMH	1,1	200	165	130	17,5	35	82,5	65
Li-Íon	3,25	195	175	120	10,3	38,5	89,7	61,5

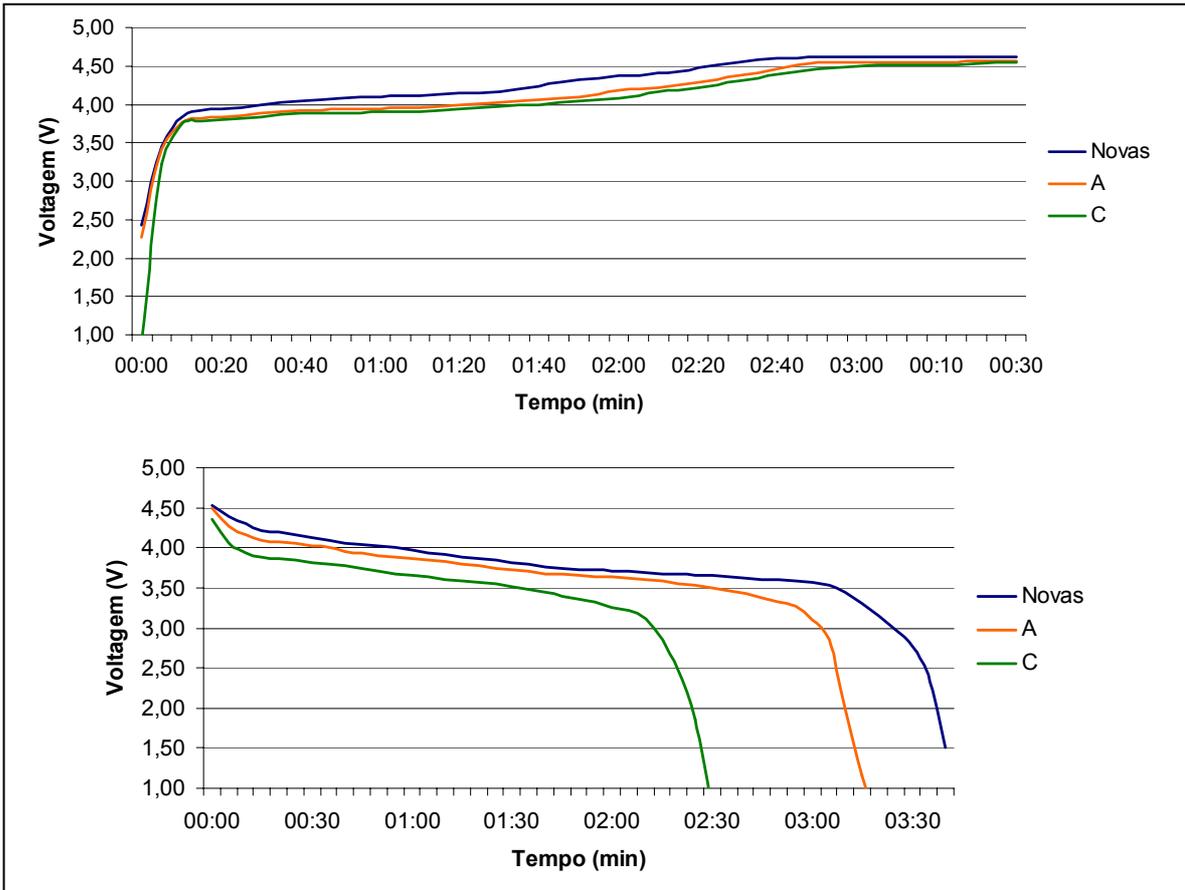


Figura 54 - Ciclos de carga e descarga lenta para células de Li-Íon novas e aprovadas para reuso com conceitos A e C.

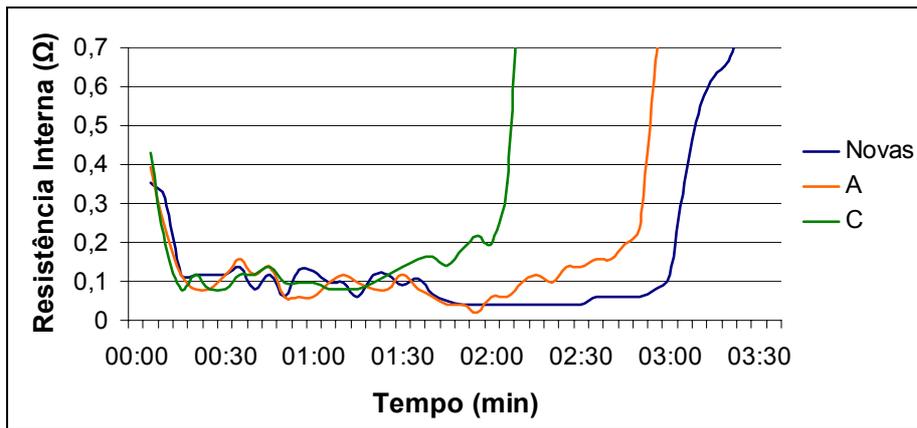


Figura 55 - Variação da resistência interna com o tempo na descarga lenta das células de Li-Íon novas e aprovadas para reuso com conceitos A e C.

4.4 Projeto de Novos Invólucros para Baterias

4.4.1 Novos Invólucros através de *Vacuum Forming*

A Figura 56 mostra em A, a placa de PVC antes das partes superiores e inferiores dos invólucros serem cortadas. Após o corte (conforme pode ser visto em B), as células foram inseridas na parte inferior (menor) e a parte superior encaixada.

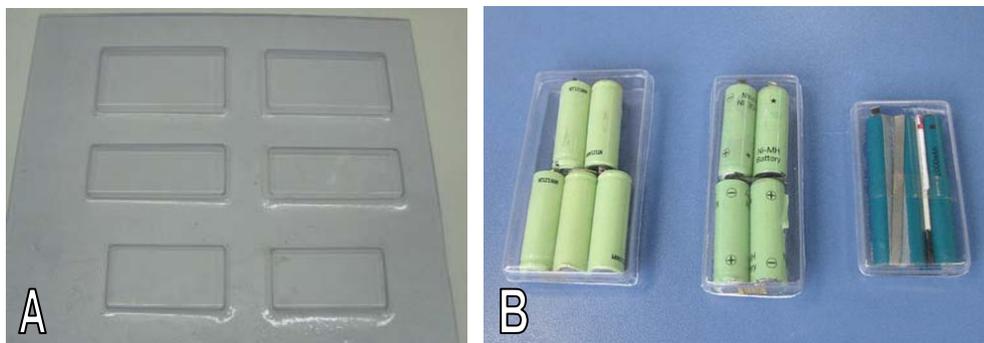


Figura 56 - Novos invólucros de baterias através de *Vacuum Forming*. Em A, a placa de PVC moldada e, em B os invólucros cortados com as células dentro.

4.4.2 Dimensionamento dos Invólucros com *Snap-Fits*

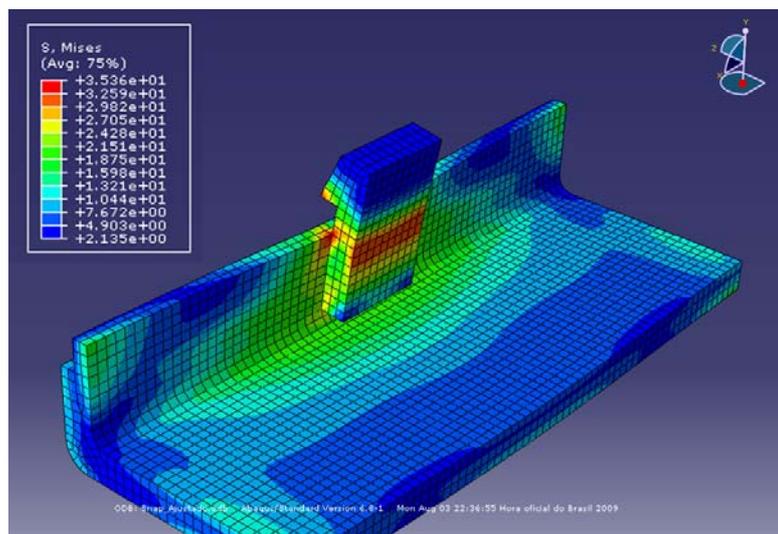


Figura 57 - Análise linear estática da geometria modelada do *snap-fit*.

A análise linear estática mostrou que nas regiões de maior solicitação, conforme pode ser visto na Figura 57, as tensões atuantes atingiram 36 MPa, sendo que no sentido da deflexão as tensões são trativas e no sentido contrário são compressivas. Esta geometria ficou dentro do limite elástico de resistência que, para este material é em torno de 45 MPa, o que representa uma segurança de aproximadamente 20%.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O questionamento realizado nas assistências técnicas, agentes autorizados e magazines consultados permitiu: além de divulgar este trabalho de pesquisa, e solicitar celulares e baterias descartados, constatar, conforme o depoimento dos responsáveis, o que tem sido feito na prática com esses materiais. Descobriu-se que, somente os componentes de celulares que ainda não saíram de linha, ainda têm valor no mercado, de modo que os celulares e componentes mais antigos vêm sendo tratados como lixo e assim, descartados até mesmo no lixo comum (principalmente nos locais onde não há ponto de coleta).

A grande maioria dos telefones celulares vendidos atualmente utilizam baterias de Li-Íon. Porém, no mercado ainda existem muitos celulares, câmeras digitais e notebooks, entre outros aparelhos eletrônicos, que ainda utilizam baterias de NiMH. A porcentagem de baterias (coletadas durante os anos de 2006, 2007 e 2008 para este estudo) de NiMH em comparação com as de Li-Íon, mostradas na Tabela 8, dão uma melhor compreensão da extensão do uso das mesmas. Das 1355 baterias recebidas, 737 eram de NiMH e 618 eram de Li-Íon, o que corresponde a aproximadamente 54,4% e 45,6% respectivamente.

A maioria das autorizadas consultadas garantiu que costumavam recolher e enviar baterias em containers de volta para São Paulo e de lá para os fabricantes. Contudo, analisando a quantidade e modelos recebidos pelas doações de caixas cheias de baterias para este trabalho (que se supõem que deixaram de ser enviadas para os fabricantes), mostrou que, pela proporção entre os modelos atuais e antigos, a maior parte das baterias que eles possuíam nas lojas era bem antiga, sendo principalmente de NiMH. Isso sugere que o envio das baterias aos fabricantes não tem sido uma prática muito comum.

Além disso, alguns gerentes chegaram a confirmar que já houve contratos com fabricantes e operadoras para estes recolherem, mas, no entanto, chegou-se a passar anos sem que isso viesse a ocorrer. Constatou-se, também, certa dificuldade para aquisição de dados formais, pois os gerentes têm receio de relatar exatamente o que ocorre e se comprometer com as questões ambientais.

A desmontagem de diversos modelos e fabricantes de celulares permitiu estudar os principais componentes, materiais e elementos de junção que compõem os telefones celulares. Em alguns dos modelos de celulares mais modernos, verificou-se a presença de componentes como alto-falantes do tipo “viva-voz”, lâmpadas para lanterna, câmeras digitais, bem como processadores de maior capacidade para suportarem LCD’s com maior resolução, softwares como tocadores de mp3 e mp4, receptores de rádio, transmissores de dados por sistemas: infravermelho, *blue tooth*, entre outros. Toda essa tecnologia e a necessidade dos fabricantes de produzirem aparelhos que atendam as exigências dos consumidores por aparelhos com recursos cada vez mais sofisticados induziram a miniaturização dos componentes dos aparelhos e de seus elementos de fixação o que dificulta, em muito, a desmontagem.

Verificou-se na prática que muitos dos componentes são difíceis de manusear até mesmo com pinças especiais, devido tanto formato quanto ao tamanho reduzido. Na desmontagem do telefone celular Nokia 5120, foram desmontados 5 aparelhos e medidos os tempos: de pegar as ferramentas, de manuseio e de extração dos componentes. Calcularam-se os tempos de cada operação, bem como o tempo total de desmontagem, que foi de 1 min. e 39s por aparelho. Isso permite estimar que, em uma hora, uma pessoa treinada seria capaz de desmontar por volta de 30 telefones deste modelo.

Na desmontagem tanto dos telefones como das baterias, foram encontrados elementos de junção como colas, parafusos com fendas não convencionais, rebites, que dificultam o processo de desmontagem, pois demandam um tempo demasiado para completar as operações necessárias. Com isso, elevam o custo do processo, tornando pouco atrativa e, em certos casos, até inviabilizando essa prática.

Através da aplicação do DfA e do DfD no projeto dos telefones celulares e suas baterias, o tempo despendido com cada operação, bem como o tempo total do processo de desmontagem poderia ser reduzido. Esse ganho de produtividade favorece tanto a prática do reuso quanto à da reciclagem dos aparelhos e suas baterias, minimizando a agressão ao meio ambiente no final dos seus ciclos de vida. Além disso, para cumprir os requisitos de fornecer uma ampla informação dos seus produtos, os fabricantes de equipamento eletrônico deveriam reunir e fornecer as informações necessárias nos produtos sobre as facilidades para

desmontagem e reciclagem. Infelizmente, porém, esse trabalho mostra que sustentabilidade não é a tônica do design dos produtos de telefonia celular. A busca pela inovação traz benefícios como o emprego da convergência tecnológica, mas isso traz também o ônus da miniaturização excessiva dos componentes que por sua vez acabam inviabilizando, em muitos casos, a desmontagem dos componentes, separação dos materiais presentes e gerando mais adiante problemas ambientais. A correção de qualquer questão relacionada a problemas ambientais que esteja associado com a fabricação irá influenciar no preço do produto. E é justamente o custo de fabricação que aparenta, ainda, nortear a filosofia e as decisões da grande maioria dos projetos de produto de telefonia celular.

Em alguns modelos de baterias, no momento de remoção do invólucro, foi encontrada, até mesmo uma dificuldade elevada, de maneira que nessas, essa desmontagem manual apenas foi possível rasgando o invólucro o que provoca um dano irreversível no mesmo. Além disso, nestes casos, como as forças necessárias são maiores, o cuidado para não danificar as células deve ser redobrado. Nestes casos fica claro que as possibilidades de manutenção das baterias e suas células foram completamente ignoradas no projeto do produto, pois nenhum empenho foi feito para viabilizar a avaliação do estado das células. Isso sugere que se deva repensar a estrutura atual para uma bateria de celular e realizar o seu design considerando desmontagem (DfD).

Na desmontagem da bateria BMS-3 onde foi analisado o procedimento com as operações e as durações das mesmas, o tempo total de desmontagem encontrado foi de 44,5s por bateria. Isso permite estimar que, em uma hora, uma pessoa treinada seria capaz de desmontar até 80 telefones deste modelo. Constatou-se também que algumas operações consomem mais tempo devido à dificuldade decorrente da desconsideração da desmontagem no projeto original. Notavelmente, a dificuldade na inserção da chave de fenda nas operações número 1, bem como no desencaixe da lateral do invólucro na operação número 2, impõem tempos extras para o processo de desmontagem. Fica claro com a descrição da sequência de desmontagem que muitos aspectos do design podem ser melhorados de modo a facilitar o desencaixe de algumas partes.

Na segunda etapa do processo de avaliação, onde o se analisou o aspecto visual, as células de Li-Íon tiveram proporcionalmente uma quantidade maior de

células aprovadas com aproximadamente 13% a mais do que as de NiMH, o que pode ser atribuído a grande quantidade de baterias antigas presente na população analisada. Ainda nesta etapa, a maior diferença entre a proporção de modelos aprovados de NiMH foi de aproximadamente 19,4%, enquanto que para as de Li-Íon foi de menos de 1,5%.

Já na terceira fase do processo de avaliação, quando a voltagem remanescente foi medida nas células aprovadas na segunda etapa, em média, apenas 9% das células de NiMH apresentaram valores de voltagem dentro da faixa de rejeição, enquanto as células de Li-Íon apresentaram uma rejeição maior, com 17% em média. Mesmo o modelo de NiMH (BMC-3), que teve a menor aprovação, com 86,8%, apresentou um percentual ligeiramente maior do que o modelo de Li-Íon (V30145-K1310-X250) que teve a maior aprovação, com 84,9%.

Na quarta etapa, onde as células foram submetidas aos ciclos de carga e descarga, tanto para as de NiMH quanto para as de Li-Íon, aproximadamente apenas 3% foram rejeitadas durante os ciclos. Considerando o total de células avaliadas até a quarta etapa, aproximadamente 63% das células de NiMH e aproximadamente 68% das de Li-Íon concluíram os testes. Considerando como aprovadas as células que obtiveram conceitos A, B ou C na etapa 4, aproximadamente 40% das células de NiMH e aproximadamente 45% das de Li-Íon foram consideradas aprovadas para reuso.

Considerando que cada celular vendido vem com uma bateria, pode-se fazer um paralelo com a quantidade de telefones celulares comercializada mundialmente em 2008 (1,222 bilhões de unidades), e a quantidade de células de baterias com capacidade de utilização que estão sendo descartadas (assumindo que o tempo médio de troca de aparelhos pelas pessoas é de cerca de um ano e que a metade dos mesmos entram em inatividade). Isso representa um desperdício de mais de 650 mil de baterias que ainda têm potencial de utilização por dia ou quase 250 milhões por ano. Levando-se em conta a quantidade atual de aparelhos habilitados no Brasil (165 milhões), seria possível alimentar aproximadamente 1,5 vezes a quantidade atual de celulares habilitados no Brasil.

Foi possível observar que, em termos de estimativa de aprovação, o número de células de NiMH consideradas aprovadas nas etapas 2 e 3 do processo de seleção foi superior ao número de baterias. Como uma bateria é composta por várias células associadas em série, desde que uma célula

apresente um defeito o desempenho da bateria será insatisfatório e a mesma será considerada rejeitada. Esse resultado reforça ainda mais a proposta desse trabalho, ou seja, muitas das baterias que foram descartadas pelos usuários por apresentarem possivelmente problemas em operação eram constituídas por células em bom estado de funcionamento, isto é, material com potencial para utilização (reuso). Cabe aqui fazer um questionamento quanto à atual filosofia de consumo e produção de equipamentos eletrônicos portáteis (em especial aos da telefonia celular). O serviço oferecido através destes equipamentos gera um passivo ambiental elevado. Sendo assim, sem manutenção e/ou sem reuso, como é possível garantir a sustentabilidade ambiental?

Os experimentos realizados com células de baterias de NiMH e de Li-Íon novas e aprovadas com conceitos A e C mostraram que as variações dos valores de resistência interna são dependentes do sistema eletroquímicos de bateria. A medição da resistência interna nos testes de descarga para a avaliação do SOC mostrou-se uma ferramenta útil para o cálculo da perda de capacidade das células usadas em comparação com células novas e permitiu estimar que as células de NiMH e de Li-Íon aprovadas com conceito A apresentam aproximadamente 82% e 90% da capacidade de uma nova. Já as aprovadas com conceito C apresentam aproximadamente 65 % e 62 % da capacidade de uma nova. As células aprovadas com conceitos B não foram avaliadas, mas acredita-se que devam apresentar uma capacidade intermediária entre as aprovadas com conceitos A e C.

Observando as curvas de resistência interna das baterias, considerando os ciclos de carga e descarga, seria oportuno sugerir que se investigasse no futuro a possibilidade de uso deste parâmetro nos testes iniciais para aprovação ou rejeição de uma bateria. Tal sugestão está ligada ao fato de que, pelo menos nos estudos conduzidos nesse trabalho, na região de estado de carga médio a baixo, uma bateria boa tende a apresentar valores estáveis resistência interna, enquanto que em uma bateria ruim, os valores característicos da resistência interna tendem a crescer muito mais rapidamente nesta região. Isto poderia reduzir os tempos de teste na etapa 4, bem como a quantidade de energia despendida nele.

Pensando no ciclo de vida das novas baterias que serão constituídas de células avaliadas e aprovadas para reuso, ou mesmo na substituição de células, foram projetados novos invólucros que fossem mais fáceis de montar e

desmontar. O processo de *vacuum forming* permitiu a fabricação de invólucros estruturalmente adequados, porém o fechamento deixa a desejar, pois não é adequado para o uso de sistema de engates que permitam uma conexão segura e ao mesmo tempo viabilizem a desmontagem. Apesar de a termoformagem proporcionar menores custos com ferramental, em grandes quantidades o processo de moldagem por injeção também se torna econômico.

O dimensionamento do *snap-fit* foi feito considerando que, para o engate, somente uma das partes do invólucro se deforma (perna do *snap*), porém, na realidade, a outra parte do invólucro também se deforma distribuindo, assim, o carregamento. Deste modo, a solicitação mecânica não é exclusivamente em uma das partes como considerado e, portanto, a segurança e a qualidade do dimensionamento são ainda maiores. Além disso, pode-se observar que a região mais solicitada é onde as tensões atuantes são compressivas, e como a resistência à compressão do PC/ABS é em torno de 80 MPa, isso corresponde a aproximadamente 50% de segurança.

Uma análise de custo do tratamento dado às baterias no final de suas vidas é importante, mas a consequência do impacto ambiental também deve ser estudada e levada em conta. A dificuldade dessa análise decorre da complexa interação entre os tratamentos dados (reuso, reciclagem, recuperação, e disposição final), o ambiente e a relativamente grande quantidade de incertezas presentes neste tipo de avaliação. Os danos causados ao ambiente podem ser classificados em três categorias: danos à saúde humana (número e duração de doenças); danos à qualidade do ecossistema (efeitos na diversidade de espécies); danos aos recursos (energia supérflua necessária no futuro para a extração de recursos minerais de baixa qualidade).

Por possuírem em sua composição alguns metais pesados altamente tóxicos, tais como mercúrio, cádmio, berílio e chumbo, os resíduos do lixo eletrônico, quando descartados, constituem-se num sério risco para o meio ambiente já que, uma vez liberados, contaminam o solo, o lençol freático, e se queimados poluem o ar, podendo provocar doenças graves, especialmente nos catadores (que sobrevivem de vender os materiais coletados nos lixões), como: danos ao sistema nervoso e sanguíneo (chumbo), danos cerebrais e ao fígado (mercúrio), envenenamento, danos aos ossos rins e pulmões (cádmio), câncer no pulmão (berílio).

O reuso de células de bateria que ainda possuem capacidade deveria ser considerado antes da reciclagem e isso é algo que infelizmente não vem acontecendo no Brasil, onde as baterias que são recolhidas nos postos de coleta são desmontadas na base de “marteladas” sem antes avaliar a possibilidade de reuso. Além disso, a reciclagem envolve a queima dos metais presentes nas baterias através da utilização de fornos industriais que precisam operar em faixas de temperatura acima do ponto de fusão do níquel que é em torno de 1400 °C, também causando assim, impacto ambiental e isso não é mostrado para a sociedade nas propagandas das campanhas de reciclagem.

Os custos envolvidos nas instalações de processos de reciclagem e recuperação são muito elevados. Grande parte dos recursos gastos vai para a construção dos complicados equipamentos de controle, sem contar que empregos são gerados apenas durante sua construção e poucos empregos permanentes são criados durante sua operação.

Para uma análise dos custos envolvidos na avaliação de células para o reuso em escala industrial devem ser consideradas todas as diversas etapas que envolvem o processo: coleta, separação, desmontagem, avaliação e seleção de baterias descartadas.

- **Coleta:** nesta etapa, são contabilizados gastos com transporte das baterias desde os pontos de coleta até o local onde elas serão separadas (depende das distâncias, da quantidade de baterias e da frequência dos transportes).
- **Separação:** nesta etapa as baterias são separadas por tipos e modelos (depende do nível de mistura ou qualidade da pré-seleção feita pelos consumidores, ou seja, se os pontos de coleta ofereciam diferentes compartimentos para diferentes tipos de bateria, ex: comuns, alcalinas, NiMH, Li-Íon, NiCd).
- **Desmontagem:** nesta etapa, estima-se que em uma hora uma pessoa treinada seria capaz de desmontar e retirar as células de aproximadamente 60 baterias (depende do modelo, da quantidade de baterias e o número de trabalhadores envolvidos e da habilidade dos mesmos na execução do serviço).
- **Avaliação:** nesta etapa é realizada a análise do aspecto superficial, medição da voltagem remanescente e também os ciclos de carga e descarga. (depende de mão-de-obra e da quantidade de energia elétrica utilizada, principalmente para os

processos de carga. No Brasil, a tarifa de energia elétrica para grupos de baixa tensão atualmente equivale a 0,13U\$ kWh^{-1}).

- **Seleção:** Nesta etapa são selecionadas células para formarem novas baterias para aplicações diversas. Os critérios utilizados são: a capacidade de serem reutilizadas e os requerimentos das novas aplicações (depende de seleção computadorizada consultando especificações em banco de dados).

O custo da mão-de-obra é muito relativo, pois varia de país para país. Em países onde considerável parcela da população atua no setor informal, a mão-de-obra é barata. Já em países onde a mão-de-obra é cara, é oportuno viabilizar automatização de algumas etapas.

É importante ressaltar que cada vez que uma bateria é descartada uma nova bateria precisa ser fabricada para reposição, ou seja, toda vez que baterias com boa capacidade são queimadas ou mesmo depositadas em aterros sem que sejam devidamente reaproveitadas, precisam ser substituídas. Isso significa dizer que, novamente deve-se extrair a matéria-prima, novamente introduzir um alto consumo de energia (que é um recurso que, em certo grau, possui suprimento limitado) para sua fabricação, gerar novos resíduos durante sua produção, etc. Isso vem reforçar a importância de que ações que visem dar novas utilidades para componentes de aparelhos eletrônicos após sua superação tecnológica, como as apresentadas neste trabalho.

Considerando que uma considerável quantidade de células com capacidade de ser reutilizada está sendo tratada como resíduo, a metodologia desenvolvida neste estudo de doutoramento para avaliação do potencial de reuso mostra-se atual e relevante, já que com seu emprego é possível minimizar os desperdícios econômicos, devido às diversas etapas que envolvem tanto o processo de produção das células (inserção dos eletrodos e separadores enrolados na forma espiral dentro de um tubo de aço niquelado, adição do eletrólito, fechamento, conformação do topo e rotulagem), como os desperdícios ambientais (devido à extração de matéria prima e à contaminação do meio ambiente provocada pelo descarte precoce das mesmas).

6 CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos nesse trabalho permite concluir que:

Os questionamentos realizados nos agentes autorizados, assistências técnicas e magazines indicaram algumas práticas executadas pelo mercado com as baterias. Apesar da maioria dos responsáveis destes estabelecimentos afirmarem que costumam enviar de volta para os fabricantes, viu-se que a proporção maior entre os modelos atuais e antigos das baterias descartadas e doadas para este estudo, era principalmente de NiMH, o que sugere que este recolhimento pelos fabricantes não tem sido sistematicamente praticado.

Com a desmontagem de diversos modelos de diferentes fabricantes de telefones e baterias de celular viu-se que alguns componentes e materiais podem ser reutilizados. Ainda que muitas baterias possam ser consideradas danificadas, pôde-se observar que este fato estava associado à presença de células com defeitos bem como defeitos nas PCI's das baterias o que evidenciou a necessidade do desenvolvimento de uma metodologia para avaliação e reuso dessas células (objetivo deste estudo de doutorado).

A bancada de testes projetada, construída e utilizada durante este trabalho de doutorado, diferencia-se de outros equipamentos de teste conhecidos atualmente justamente pela flexibilidade quanto ao tipo ou modelo de bateria permitindo a avaliação diretamente da célula (o que é de suma importância para a avaliação de baterias descartadas). Ela permite o emprego da quarta etapa do processo desenvolvido neste trabalho para classificação quanto ao potencial para utilização de células de baterias tanto de NiMH e Li-Íon descartadas. Além disso, com suas três saídas, é possível a análise simultânea de até 48 células de NiMH ou 15 de Li-Íon.

Os resultados obtidos com a metodologia de avaliação de células utilizadas foram satisfatórios. Embora as células de muitas baterias tenham sido rejeitadas em diferentes etapas do processo de avaliação pela qual passaram, muitas dessas células mostraram um grande potencial de capacidade para reuso. Após passarem por todas as etapas do processo de avaliação desenvolvido,

aproximadamente 40% das células de baterias de NiMH e 45% das de Li-Íon avaliadas foram aprovadas para reuso.

A metodologia apresentada neste trabalho permitiu selecionar células de baterias descartadas que ainda estavam em condições de serem reutilizadas e mostrou que é possível estabelecer, assim, uma alternativa ambientalmente correta para a diminuição da quantidade desse tipo de lixo eletrônico, e para otimizar a utilização de matéria-prima, já que para cada bateria descartada uma nova bateria precisa ser fabricada para reposição. Alguns exemplos desenvolvidos de aplicação de células com potencial de reuso são apresentados no Apêndice.

O processo de injeção é mais adequado que o termoformagem para a fabricação de invólucros, já que permite que as partes utilizem snap-fits para a montagem e desmontagem além de apresentar menor variabilidade. A qualidade do dimensionamento do snap-fit apresentou uma segurança de aproximadamente 50 % devido à distribuição do carregamento entre a parte superior e a inferior do invólucro, e pelo fato de que na região mais solicitada as tensões atuantes são compressivas.

É urgente que os consumidores e fabricantes de produtos eletrônicos pratiquem ações visando a sustentabilidade e observem que o planeta depende de suas consciências em relação ao seu papel de contribuição na preservação deste ecossistema - que é a terra - e que todos fazem parte dele. Assim, torna-se fundamental, necessária, atual e relevante a aplicação do DfD em projetos de produtos de telefonia celular para viabilizar a criação de indústrias de desmontagem e permitir o reuso, melhorando as condições de avaliação dos respectivos componentes que ainda estejam em bom estado, como as células das baterias.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste estudo de doutorado é possível identificar algumas rotas de sequência para esta temática, a saber:

Rota 1: Empregar as células avaliadas e aprovadas para reuso em baterias para armazenamento de energia produzida por células fotovoltaicas ou por energia eólica.

Rota 2: Estudar novas possibilidades de reuso de componentes dos telefones celulares, por exemplo, os motores “vibra-call” e os LCD’s.

Rota 3: Implementar uma indústria de desmontagem e reaproveitamento de componentes, sistemas e subsistemas de produtos industriais (DfD) através de um plano de negócio com apoio do SEBRAE.

Rota 4: Criar um software com uma ferramenta de seleção de células de baterias utilizando diferentes linguagens de programação como Visual Basic, C++, PHP. Sendo que esta seria formada por um banco de dados contendo as principais características das células (voltagem, dimensões, capacidade, massa). Seria possível fazer uma seleção entrando com alguns parâmetros necessários e possui uma saída com um ordenamento das possibilidades de baterias que cumprem os pré-requisitos [89].

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MURGEL, B.S. **Energia e Meio Ambiente**. Editora Moderna - Coleção Polêmica. 12º Edição. São Paulo, 1995.
2. BOKS, C.; HUISMAN J.; STEVELS A. **Combining economical and environmental considerations in cellular phone design**. In: Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000.
3. MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES
<http://www.mc.gov.br/noticias/2008/cresce-venda-de-celulares-e-brasil-chega-a>
Acessado em 15 de julho de 2009.
4. BARBOZA, M. **Relatório Tendências Setoriais - Telecom e TI**, consultoria Tendências, 2008.
5. JORDAN, C. **Intolerable Beauty - Portraits of American Mass Consumption** Artwork and locations exhibits, Photo Series Gallery, Atlanta, 2005.
6. IDC - INTERNATIONAL DATA GROUP SUBSIDIARY
<http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS21053908>
Acessado em 12 de fevereiro de 2008.
7. SCANIA DO BRASIL - **Catálogo Scania Caminhões para Transporte Rodoviário**, 2008.
8. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES -
Peso Máximo para Veículos de Carga -
<http://www1.dnit.gov.br/Pesagem/SCANIA.asp>
Acessado em 12 de julho de 2008.
9. FISHBEIN, B. **Waste in the Wireless World: The Challenge of Cell Phones**. New York: INFORM, Inc., 2002.
10. EUROPEAN, C.C. **Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on WEEE, and Proposal for a Directive of the European**

Parliament and of the Council on the restriction of the use of certain hazardous substances in EEE. Brussels, 2000.

11. MCLAREN, J.; WRIGHT, L.; PARKINSON, S.; JACKSON, T. **A dynamic life-cycle energy model of mobile phone take-back and recycling.** J Ind Ecol; 3 (1): 77–91, 1999.

12. JUVINALL, R.C. **Fundamentals of Machine Component Design**, John Wiley & Sons, 2ª edição, 1991.

13. MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis** Edusp, São Paulo, 2002.

14. BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.; KNIGHT, W. **Product Design for Manufacture and Assembly.** New York USA: Taylor & Francis Group, 2 ed. 2002.

15. SITE DO LDSM - Laboratório de Design e Seleção de Materiais da UFRGS.
<http://www.ndsm.ufrgs.br>

Acessado em 09 de dezembro de 2007.

16. MOREIRA, S.A. **Educação e Transdisciplinaridade.** Rio de Janeiro: Lucerna, 151p, 2002.

17. PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K. **Projeto na Engenharia – Fundamentos do Desenvolvimento Eficaz de Produtos – Métodos e Aplicações.** Tradução da 6ª edição alemã Ed. Edgard Blücher, 2005.

18. PIETRELLI, L. **Separation Technologies: tools to improve the sustainable development.** In: Rewas, San Sebastian, Espanha, p. 223-229. Sep., 1999.

19. PIERCE, J.J.; WEINER, R.F.; VESILIND, P.A **Environmental pollution and control.** 4 th ed. Chapter 14. p. 177-191, 1998.

20. FLEISCHMANN, M. **Quantitative Models for Reverse Logistics**, Springer, Berlin, p. 11-15, 2001.

21. CATTANACH, R.E. et al. **The handbook of environmental conscious manufacturing – From design & production to labeling & recycling.** IRWIN. P. 51-58. USA, 1995.

22. YOUNG, S.B.; VANDERSBURG, W.H. **Applying environmental life-cycle analysis to materials.** JOM. Apr. 1994.

23. PRB - Population Reference Bureau.

<http://www.prb.org/Articles/2007/623WorldPop.aspx>

Acessado em 22 de outubro de 2007.

24. MARTIN, H.P.; SCHUMANN, H. **Armadilhas da globalização**. Traduzido por: Waldtraut, R.; Sackiewicz, C. 5 ed. São Paulo, Globo, 1999.

25. SCHNEIDER, E.L.; KINDLEIN, W.J.; SOUZA, S.; Malfatti, C.F. **Assessment and reuse of secondary batteries cells**. Journal of Power Sources. v.189, p.1264 - 1269, 2009.

26. GLAVIC, P.; LUKMAN, R. **Review of sustainability terms and their definitions**. Journal of Cleaner Production v. 15, p. 1875–1885, 2007.

27. VEIT, H.; ZOPPAS-FERREIRA, J.; Malfatti, C.; TENORIO, J.A.; BERNARDES A. M. **Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy**. Journal of Hazardous Materials, v. B137, p. 1706-1709, 2006.

28 BERTUOL, D; BERNARDES, A. M.; TENÓRIO, J. **Spent NiMH batteries: Characterization and Metal Recovery through mechanical processing**. Journal of Power Sources, v. 160, p. 1465-1470, 2006.

29. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **NBR 10004 - Resíduos sólidos – Classificação**. Segunda edição. Rio de Janeiro, 2004.

30. BANCO REAL

http://www.bancoreal.com.br/index_internas.htm?sUrl=http://www.bancoreal.com.br/sustentabilidade/o_que_fazemos/praticas_de_gestao/tpl_sustentabilidade_QUE_FAZEMOS_GESTAO_ECOEFICIENCIA_PAPAPILHAS.shtm

Acessado em 15 de setembro de 2008.

31. Vivo

<http://www.vivo.com.br/vamostrocarideias/?WT.ac=Institucional.MenuLateral.RecicleSeuCelular>

Acessado em 19 de março de 2009.

32. Claro

<http://www.claro.com.br/portal/artigo.do?method=showArtigo&channelId=6b89603541203110VgnVCM1000000a08150aRCRD&origem=ConheçaClaro&item=ClaroRecicla>

Acessado em 18 de março de 2009.

33. TIM

http://www.tim.com.br/portal/site/PortalWeb/menuitem.8a1c785c7c3d9742649e1610703016a0/?vgnnextoid=a355210dec9e0110VgnVCM100000a22e700aRCRD&wfe_pweb_oid=9c5b3326d2a3a110VgnVCM100000a22e700aRCRD&wfe_pweb_area=51&wfe_pweb_estado=20&

Acessado em 18 de março de 2009.

34. SUZAQUIM

<http://suzaquim.com.br/PilhasBaterias.htm>

Acessado em 15 de setembro de 2008.

35. Umicore

<http://www.umicore.com.br/quemSomos/manualUmicore/>

Acessado em 18 de março de 2009.

36. BERNARDES, A.M. **Resíduos Sólidos - Material didático da disciplina: “Reciclagem de Materiais Metálicos”** PPGEM da UFRGS, 2007.

37. MARTINS, J.I.A.G. **Destino dos resíduos sólidos e legislação sobre o tema.** Nota Técnica, Dezembro, 2000.

38. ROLNIK, R. **A cidade e a lei. Legislação, política urbana e territórios na cidade de São Paulo;** São Paulo: Studio Nobel, 2007

39. FRY, T.- **Contra uma teoria essencialista de necessidade: algumas considerações para a teoria do design** Revista Design em Foco v. II nº1 Jan./Jun. 2005

40. MARX K. **Grundrisse Harmondsworth,** Penguin Books, p92, 1973.

41. ZHANG, S.; FORSSBERG, E. **Intelligent liberation and classification of electronic scrap.** Powder Technology. V. 105, p 295-301, 1999.

42. SKERLOS, S.J.; BASDERE, S. **Environmental and economic view on cellular telephone remanufacturing.** In: Proceedings Colloquium e-ecological manufacturing. Uni-Edition, Berlim, p. 143-148, 2003.

43. KINDLEIN, W.J.; PLATCHECK, E.R.; SCHAEFFER, L. **Methodology of ecodesign for the development of more sustainable electro-electronic equipments.** In. Journal of Cleaner Production, 2007.

44. PLATCHECK, E.R. **Metodologia de Ecodesign Para o Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis.** Dissertação de Mestrado Profissionalizante em Engenharia Ambiental e Tecnologias Limpas. PPGEM, UFRGS, Porto Alegre, 2003.

-
45. LESKO, J. **Design Industrial – Materiais e Processos de Fabricação**. 1ª Ed. Edgard Blücher, 2004.
46. KINDLEIN, W.J. **Cd Ecodesign – Elementos de Junção**. Apresentado na XIII Feira de iniciação Científica da UFRGS, 2004.
47. SALUSTRI, F.A.; CHAN V. **Design for Assembly**
Disponível em: <<http://deed.ryerson.ca/~fil/t/dfmdfa.html>>
Acessado em 26 março de 2009.
48. WITTENBURG, G. **Life after Death for Consumer Products** Assembly Automation, Vol. 12, No. 2, 1992.
49. KAHMEYER, M.; LEICHT, T. **Dismantling Facilitated** Kunststoffe German Plastics, vol. 81, no. 12, p. 30-32, 1991.
50. SCHMAUS, T.; KAHMEYER, M. **Design for disassembly – challenge of the future**, RI, USA, BDI, DFMA, 1992.
51. BEARDSLEY, B.; PARULIAN, A.; BERNERS, D.; KROLL, E. **Product evaluation for ease of disassembly**, Texas A & M University, 1993.
52. BOOTHROYD, G.; ALTING, L. **Design for assembly and disassembly**, Annals of CIRP, 41(2). Vol. 41 No.2 pp.625-36, 1992.
53. DEWHURST, P. **Design for disassembly**, Boothroyd Dewhurst Inc, 1993.
54. BURKE, D.S.; BEITER, K.; ISHII, K. **Life-cycle design for recyclability**, Design Theory & Methodology. ASME DE- Vol. 42, pp. 325-332, 1992.
55. BONENBERGER, P.R. **The First Snap-Fit Handbook – Creating and Managing Attachments for Plastic Parts**. 2ª Ed. Hanser, 2005.
56. SPAHR, C.T. **Snap-fits for Assembly and Disassembly**, 1991.
57. MCGOVERN, S.M.; SURENDRA, M.G. **A balancing method and genetic algorithm for disassembly line balancing** European Journal of Operational Research, 2005.
58. ASHBY, M.F. **Materials selection in mechanical design**. Second edition Department of Engineering, Cambridge University, England, 1999.
59. VIVA SEM FIO
<http://www.vivasemfio.com/blog/sar-taxa-de-absorcao-especifica-celular-3g/>
Acessado em 9 de março de 2009.
60. MORGAN, L.L. **Estimating the risk of brain tumors from cellphone use: Published case–control studies**. Pathophysiology - ARTICLE IN PRESS, 2009.

61. GREENPEACE

<http://www.greenpeace.org/argentina/contaminacion/basta-de-basura/un-nuevo-flujo-de-residuos-pel/ranking-verde-de-electronicos3>.

Acessado em 17 de março de 2009.

62. SAAR, S.; STUTZ, M.; THOMAS, V.M. **Towards intelligent recycling: a proposal to link bar codes to recycling information**. Resources, Conservation and Recycling. 41 15–22, 2004.

63. ROBÓTICA - Inovações na área: **Aplicação de robôs avançados**. Universidade de Vienna. 5º Seminário Brasil-Áustria de Automação - Palestras técnicas do 3º dia da Feira de Ciência, Tecnologia e Inovação, Globaltech 2005.

64. SCHNEIDER, E.L.; KINDLEIN J.W.; MENEZES, T.L.; MALFATTI, C.F. **Reutilização de Componentes de Celulares Descartados**. 18º CBECIMAT, Porto de Galinhas – Pernambuco, 2008.

65. BASEL, A.N. **Mobile Toxic Waste: Recent Findings on the Toxicity of End-of-Life Cell Phones**. A Report by Basel Action Network (BAN), April 2004.

66. US Dept. of Energy - **Chronic Beryllium Disease Prevention Program, About Beryllium**, <http://tis.eh.doe.gov/be/webdoc1.html-ssi>, 2004.

67. BUCHMANN, I. **Batteries in a portable world – a handbook on rechargeable batteries for non-engineers**. Cadex Electronics Inc. Second edition, 2004

68. LINDEN, D.; REDDY, T.B. **Handbook of Batteries** 3rd Edition - McGraw-Hill, 1995.

69. AMBROSIO, R.C.; TICIANELLI, E.A. **Baterias de Níquel-Hidreto, uma Alternativa para as Baterias de Níquel-Cádmio**. Quím. Nova, v24, 2001.

70. Sercomtel - Introdução as baterias recarregáveis modernas

http://www.fisica.uel.br/filmat/baterias_principios.html

Acessado em 6 de maio de 2008.

71. HOWELL, D.; DUONG, T.; DEPPE, J.B.; WEINSTOCK, I. **U.S. Department of Energy's Materials Research for Advanced Lithium Ion Batteries. Material Matters** Vol. 3 No. 4, p. 100-102, 2008.

72. SERCOMTEL - Introdução à baterias recarregáveis modernas
http://www.fisica.uel.br/filmat/baterias_principios.html.

Acessado em 07 abril de 2008.

-
73. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente **Resolução Nº 257**, de 30 de junho de 1999.
74. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente **Resolução Nº 401**, de 04 de novembro de 2008.
75. US Environmental Protection Agency - EPA, Office of Solid Waste. **Chemical Ranking Report for the RCRA PBT List Docket**, Sept. 30, 1998.
76. FURTADO, J. S. **Baterias esgotadas: legislações & modelos de gestão**. Relatório elaborado para o Ministério do Meio Ambiente do Brasil, fev. 2004.
77. BERNARDES, A.M.; ESPINOSA, D.C.R.; TENÓRIO, J.A.S. **Recycling of batteries: a review of current processes and technologies**. Journal of Power Sources, vol.130, p. 291-298, 2004.
78. PORTAL AMBIENTE BRASIL
<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base>.
Acessado em 17 de outubro de 2007.
79. AHMED, F. **The battery-recycling loop: a European perspective**, Journal of Power Sources vol. 59, p. 107-111, 1996.
80. EDWARDS, W.H.; HARRISON, A.I.; WOLSTENHOLME, T.M **Conductance Measurements in Relation to Battery State of Charge** – INTELEC, 1999.
81. SHINYAMA, k.; MAGARI, Y; AKITA, H.; KUMAGA, E.; NAKAMURA, H. **Investigation in Storage Characteristics of NiMH Batteries During Cycling**. J. Power Sources, v. 143, 2005.
82. FENG, F.; NORTHWOOD, D.O. **Self-discharge Characteristics of a Metal Hydride Electrode for NiMh Rechargeable Batteries**. Int. J. Hydrogen Energy.v. 30, 2005.
83. HUET, F. **A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries**, J. Power Sources, vol. 70, no. 1, pp. 59–69, Jan. 1998.
84. RODRIGUES, S.; MUNICHANDRAIAH, N.; SHUKLA, A.K. **A review of state of- charge indication of batteries by means of a.c. impedance measurements**, J. Power Sources, vol. 87, no. 1/2, pp. 12–20, Apr. 2000.
85. COLOEMAN, M.; LEE, C.K.; ZHU, C.; HURLEY, W.G. **State of charge determination from EMF Voltage Estimation: Using Impedance, terminal**

voltage and current, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54 no. 5, pp. 2550-2557, October 2007.

86. MALFATTI, C. **Baterias - Material didático da disciplina: “Materiais para Produção e Armazenamento de Energia”** PPGEM da UFRGS, 2008.

87. SCHOOL OF COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING

<http://www.cse.unsw.edu.au/~cs4411/Tools/Batteries/Chemistr.html>

Acessado em 29 de setembro de 2008.

88. GRANTA DESIGN **The Cambridge Material Selector (CES) Software**, Cambridge, 2006.

89. SILVA, F.P.; VERGANI, L.; KINDLEIN, W.J. **Desenvolvimento de Bancos de Dados como Ferramenta de Auxílio ao Design de Novos Produtos. 7°**

Congresso de Pesquisa & Desenvolvimento em Design, Paraná, 2006.

APÊNDICE A - Questionário sobre circulação e destino de baterias

Razão social:

Endereço:

Nome de fantasia:

Ramo de atividade:

- Assistência técnica
- Agentes autorizados
- Grandes redes

Atuam como ponto de coleta:

- sim
- não

Quantidade de baterias coletadas por mês:

- 1 a 10
- 11 a 20
- 21 a 50
- 51 a 100
- 101 a 200
- 201 a 300

Periodicidade da coleta destas baterias:

- mensal
- trimestral
- semestral
- anual

Relatar como é feito o envio destas baterias aos fabricantes.

APÊNDICE B – Análise das Células Via Microscopia Eletrônica de Varredura

Com objetivo de visualizar os componentes presentes dentro das células, foram feitos cortes da seção transversal das células de baterias aprovadas com conceito A e de células rejeitadas dos modelos Nokia modelos BMS-3, BMC-3 e BL-5C, para retiradas de amostras e observação via microscopia eletrônica de varredura. A Figura B1 mostra uma célula sendo cortada. As seções transversais das células das baterias Nokia BMS-3, BMC-3 e BL-5C, cortadas para serem examinadas no MEV, são mostradas na Figura B2 e a Figura B3 mostra uma montagem esquemática mostrando as camadas dentro de uma célula da bateria modelo Nokia BMS-3.



Figura B1 - Bateria Nokia modelo BL-5C sendo cortada para retirada de uma amostra da seção transversal.



Figura B2 – Seção transversal da célula da bateria Nokia BMS-3 em A, Nokia BMC-3 em B e Nokia BL-5C cortadas para serem examinadas no MEV.

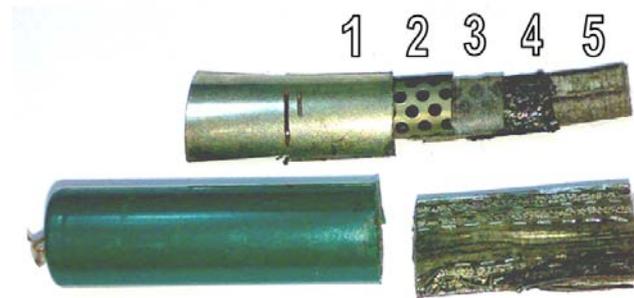


Figura B3 - Montagem esquemática da estrutura interna de uma células cilíndrica de NiMH mostrando os componentes internos em camadas. 1: invólucro metálico; 2: ânodo; 3: separador; 4: cátodo; 5: separador.

A seguir, são apresentados os resultados referentes às micrografias feitas no MEV das seções transversais das amostras retiradas de células aprovadas com conceito A das baterias de NiMH Nokia modelo BMS-3 e de Li-Íon Nokia modelo BL-5C. Também é mostrada uma comparação entre células da baterias Nokia BMC-3 sendo uma aprovada com conceito A e outra rejeitada.

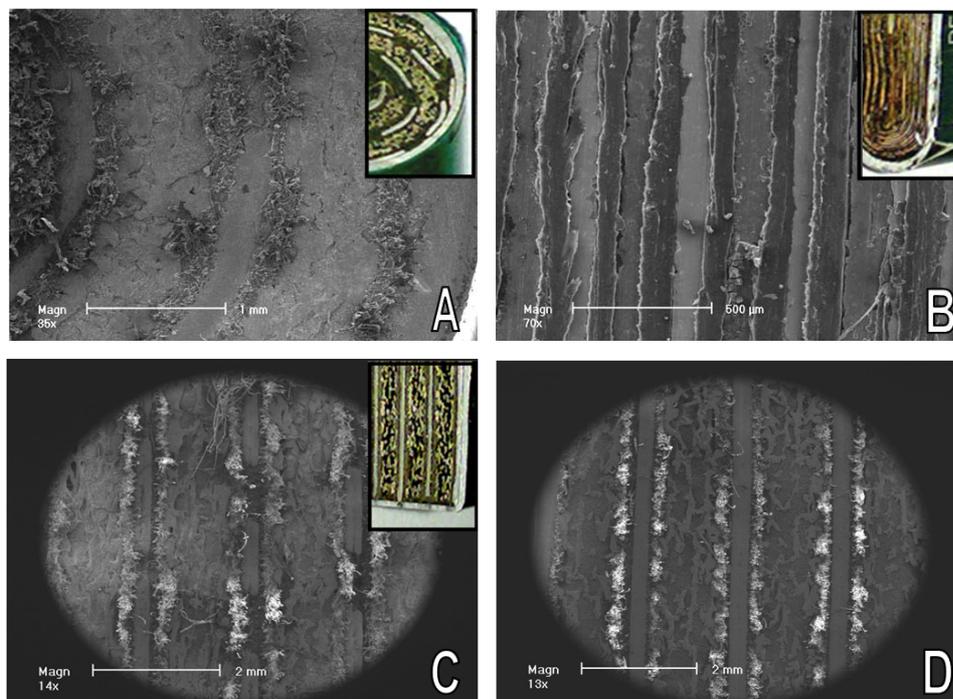


Figura B4 - Micrografias das seções transversais das baterias Nokia modelo BMS-3 em A, modelo BL-5C em B, modelo BMC-3 aprovada em C e rejeitada em D.

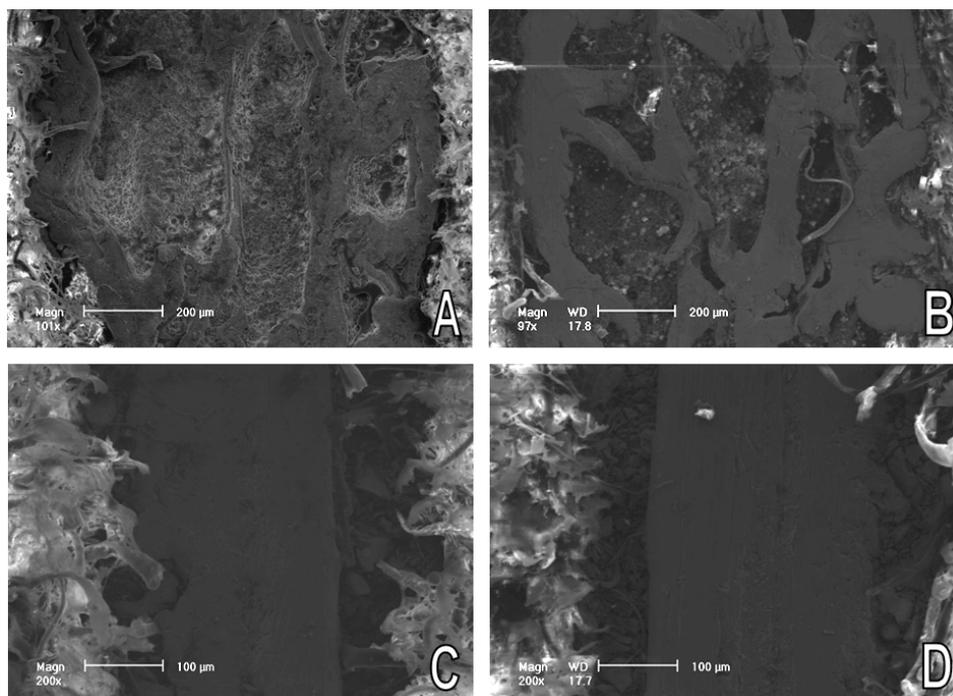


Figura B5 - Micrografias com maior aumento das seções transversais da bateria Nokia modelo BMC-3: eletrodo positivo de níquel das células aprovada em A e da rejeitada em B. Eletrodo negativo de liga metálica da célula aprovada em C e da rejeitada em D.

As micrografias, obtidas por microscopia eletrônica de varredura, das seções transversais dos modelos de baterias de NiMH e de Li-Íon permitiram visualizar melhor os ânodos, cátodos e separadores das mesmas. A partir da análise das seções transversais das células do modelo BMC-3 (Figura B5), pode-se observar que não há diferença de morfologia entre uma célula classificada como rejeitada e ou classificada como aprovada com conceito A. Isso indica que as alterações morfológicas não evidenciarão a rejeição de uma célula visto que isso estaria associado ao consumo das espécies responsáveis pela conversão de energia química em energia elétrica.

APÊNDICE C – Catálogo com Informações de Alguns Modelos de Baterias

Tabela C1 - Fotos e informações de alguns modelos de baterias de NiMH.

Marca	Modelo	Foto (ext.)	Dimens. Externas (mm)	Foto (int.)	Dimens. células (mm)	Volume células (mm ³)	Massa (g)	Capac. Inf. (mAh)	Capac. Calc. (mAh)
Nokia	BBH -1H		259 x 55,9 x 19,6		42,4 x 16,9	9511,09	28,4	-	1807
Nokia	BBH - 1S		101 x 55,9 x 9,0		47,9 x 16,5 x 6,2	4979,21	17,7	-	946
Nokia	BMS-3		103 x 45,0 x 13,2		66,8 x 10,5	5666,09	18,9	1000	1077
Nokia	BMC-3		53,2 x 38,4 x 8,9		35,6 x 16,4 x 8,3	4904,26	16,2	900	932
Nokia	BMC-2		53,2 x 38,4 x 6,9		35,2 x 16,4 x 5,9	3487,96	12,46	640	663
Ericsson	BKB 193 104 4,3V		111 x 46,0 x 17,2		43,3 x 14,1	6857,34	22,5	1200	1303
Ericsson	BKB 193 085		110 x 46,3 x 15,4		44,6 x 10,3	3636,23	11,4	500	691
Ericsson	BKB 193 (123-105)		111,4 x 46 x 8,9		47,5 x 16,4 x 5,9	3972,90	17,9	800	755
Ericsson	BKB 193 104 4,8V		111 x 46,0 x 17,2		42,8 x 14,1	6778,15	22,7	1200	1288
Siemens	V30145-K1310-X222		53 x 36,7 x 10,3		42,6 x 10,1	3480,97	12,9	600	661

Tabelas C2 - Fotos e informações de alguns modelos de baterias de Li-Íon.

Marca	Modelo	Foto (ext.)	Dimens. Externas (mm)	Foto (int.)	Dimens. células (mm)	Volume células (mm ³)	Massa (g)	Capac. Inf. (mAh)	Capac. Calc. (mAh)
Nokia	BLC-2		52,4 x 36,7 x 7,5		47,6 x 33,7 x 6,5	10205,44	29,9	950	990
Nokia	BL-6C		53,0 x 34 x 6,3		50,2 x 33,9 x 6,3	11061,57	23,9	1070	1073
Nokia	BL-5C		53,0 x 34 x 5,2		50,2 x 33,9 x 5,2	8849,26	19,5	850	858
Siemens	V30145-K1310-X215		50,1 x 34,2 x 6,5		47,3 x 30,2 x 5,4	7249,63	21,6	650	703
Siemens	V30145-K1310-X250		52,1 x 36,9 x 8,1		47,73 x 29,8 x 6,2	7860,05	17,2	700	762
Motorola	SNN5571 A		53,2 x 35,6 x 9,9		46,8 x 33,7 x 9,1	12131,05	38,9	-	1177
Motorola	SNN5749 A		56,1 x 36 x 5,9		50 x 34 x 5,3	9593,10	21,4	920	931
LG	LGIP - 411A		47,1 x 33,9 x 4,8		41,7 x 33,9 x 4,4	7302,13	14,4	750	708
LG	LGIP - G830		54,3 x 34,1 x 4,6		48,9 x 33,8 x 4,4	8338,43	17,6	830	809
Sony Ericsson	BKB193 174/11		53,5 x 32,7 x 6,6		47,4 x 29,5 x 4,6	6683,40	14,7	-	648

As Tabelas C1 e C2 listam o volume e a capacidade calculada entre outras informações de baterias de NiMH e de Li-Íon respectivamente mais comuns entre as recolhidas e desmontadas neste trabalho. Estes dados são úteis para o projeto de reuso das mesmas, pois nem todos os modelos de baterias informam o valor da capacidade de suas células.

APÊNDICE D - Reuso de Células em Sistemas de Iluminação

Foram reutilizadas células aprovadas em um protótipo de uma luminária e em um protótipo de uma luz de emergência compacta. Dentre as vantagens tecnológicas sobre as lâmpadas tradicionais, a grande eficiência luminosa dos LEDs motivou a escolha dos mesmos como fontes de luz nestes protótipos. A seguir, é apresentada a descrição de como os mesmos foram projetados e construídos.

Projeto iluminador com LEDs

Foi projetado um iluminador para filmadora que utiliza 27 LEDs de luz branca de 7500mCd distribuídos em 3 conjuntos de 9 cada e ligados em paralelo. Como a corrente consumida por cada um desses LEDs é da ordem de 15mA, a corrente necessária para alimentar o conjunto é de aproximadamente 405 mA. Assim, para a seleção das células da bateria, os requisitos necessários foram: possuir uma tensão entre 3,5 e 4V e capacidade de pelo menos 1400mAh para uma autonomia de mais de 3h. Como a bateria iria ficar externa ao equipamento, neste caso, não houve restrição dimensional.

Como uma pequena variação de tensão nas pilhas pode implicar uma grande variação na corrente dos LEDs, e conseqüente grande perda de luminosidade, para manter constantes a voltagem e corrente de funcionamento, utilizou-se um circuito regulador de corrente, que fornece a voltagem necessária, mantendo constante a corrente de alimentação. A Figura D1 mostra o projeto mecânico do iluminador. Primeiramente o circuito foi montado e testado em uma *proto-board*, e posteriormente, foi feita a montagem definitiva do circuito utilizando uma placa de cobre furada.

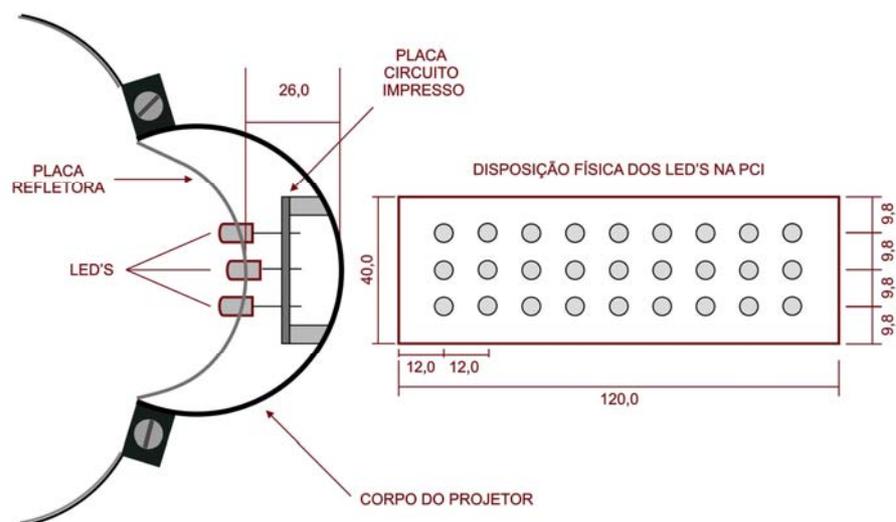


Figura D1 - Projeto mecânico do iluminador com LEDs.

A Figura D2 mostra o iluminador com LEDs e sua bateria formada por duas aprovadas para reuso de Li-Íon marca Siemens modelo V30145-K1310-X250. Como as células utilizadas foram aprovadas com conceito A e as mesmas foram associadas em paralelo, a capacidade da bateria resultante ficou em aproximadamente 1250 mAh, garantindo uma autonomia capaz de alimentar o iluminador por um tempo ligeiramente superior a três horas.



Figura D2 - Iluminador com LEDs e sua bateria composta por duas células de Li-Íon marca Siemens modelo V30145-K1310-X250.

Protótipo de luz de emergência compacta

Foi projetada uma luz de emergência compacta para ser ligada na rede elétrica em 110 / 220 V e acender um conjunto de dez LEDs automaticamente

quando faltar energia elétrica. A bateria foi projetada de modo a utilizar 4 células de NiMH avaliadas e aprovadas para reuso de 1000 mAh modelo Nokia BMS-3. Para baixar o custo, reduzir o peso e o tamanho, foi utilizado um divisor de tensão resistivo de baixa potência capaz de recarregar a bateria em 24h.

No projeto do protótipo foram incluídos ainda: uma chave de liga / desliga para permitir seu transporte e/ou armazenamento por períodos prolongados, e um pulsador de teste que permite visualizar o estado dos LEDs e da bateria.

A Figura D3 mostra o protótipo de luz de emergência desligado em A, ligado em B, e sua bateria projetada de modo a reutilizar 4 células de NiMH marca Nokia modelo BMS-3 avaliadas e aprovadas para reuso em C. A capacidade da bateria resultante ficou em aproximadamente 820mAh, garantindo uma autonomia que permite alimentar a luz de emergência por um tempo superior a 15 horas.



Figura D3 - Protótipo de luz de emergência: desligado em A, ligada em B, e aberto mostrando suas 4 células de NiMH em C.

APENDICE E - Reuso de Células em Fontes de Alimentação Portáteis

Considerando-se a enorme quantidade de equipamentos eletrônicos portáteis, como máquinas fotográficas digitais, telefones celulares, *mini games*, mp3 *players*, entre outros, a possibilidade de terem-se fontes portáteis capazes de suprir a energia de qualquer um destes aparelhos, empregando células de baterias recarregáveis descartadas, que foram avaliadas e aprovadas para reuso, mostrou-se bastante interessante. Isso motivou o desenvolvimento de dois protótipos de fontes portáteis. A seguir são descritas como as mesmas foram projetadas e construídas.

Fonte de alimentação para caixas de som

Para tornar portátil um par de caixas de som para computador, que são aparelhos eletrônicos normalmente fabricados para serem alimentados na rede elétrica em 110/220V, foi projetada uma fonte com células de bateria avaliadas e aprovadas para reuso, capaz de ampliar as restrições de sua finalidade de uso, ou seja, de ser alimentada exclusivamente pela rede elétrica.

Para alimentar as caixas, considerou-se que para uma potência de 2W, ela apresente um consumo de aproximadamente 240 mAh. Assim, a bateria foi projetada de modo a reutilizar sete células de NiMH marca Nokia modelo BMC-3 aprovadas com conceito A, ligadas em série. Para prover a carga das baterias, foi escolhido um transformador bi-volt com secundário de 6 Vca e 100 mA. Para controlar a corrente de carga da bateria, foi utilizado um dobrador de tensão que exerce duas funções: fornecer a Vcc necessária para a alimentação da bateria e regular a Icc das mesmas.

Foi incluído, ainda, um resistor de proteção para o transformador, para o caso em que a bateria fosse totalmente descarregada evitando, assim, sua sobrecarga quando ligada novamente. Também foi incorporado um LED para indicação de “fonte ligada”, permitindo visualizar seu estado.

A Figura E1 mostra a fonte de alimentação para caixas de som de computador funcionando em A, e aberta mostrando seu interior e sua bateria projetada de modo a utilizar 7 células aprovadas para reuso de NiMH marca Nokia modelo BMC-3, em B. Como foram utilizadas células aprovadas com conceito A, a capacidade deste modelo de célula, que quando nova era de 900 mAh, foi reduzida para aproximadamente 740mAh. Ainda assim, é suficiente para garantir uma autonomia que permite alimentar as caixas de som por um tempo ligeiramente superior a três horas.

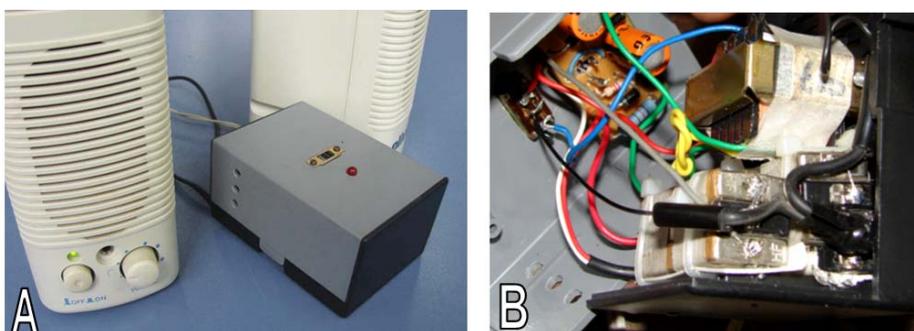


Figura E1 - Fonte para caixas de som de computador funcionando em A, e aberta mostrando sua bateria composta por 7 células de NiMH do modelo BMC-3 em B.

Fonte de com saída USB

Foi projetada uma segunda fonte com um circuito integrado (CI) incorporado capaz de proporcionar uma regulagem mais precisa da voltagem de saída. Essa nova fonte destina-se a alimentar e até carregar aparelhos eletrônicos de até 5W de potência em 5V, utilizando uma porta de saída padrão USB.

A bateria foi projetada de modo a reutilizar um conjunto de 7 células de NiMH marca Ericsson modelo BKB 123 105 aprovadas com conceito A. A bateria desta fonte poderá ser carregada a partir da instalação elétrica de um carro, ou utilizando um carregador convencional de 12Vcc (até 5A), dispondo, para isso, de uma entrada com *Jack P2*.

Foi incorporada no projeto da fonte: uma chave para ligar a saída USB e um LED verde que acende quando a mesma estiver ligada, bem como um LED vermelho que acende quando ela estiver sendo alimentada pela entrada P2.

A Figura E2 mostra a fonte em funcionamento alimentando um telefone celular em A, e aberta mostrando seu interior com sua bateria projetada de modo a utilizar 7 células de NiMH marca Ericsson modelo BKB 193 (123-105), 900mAh, em B. Do mesmo modo que na fonte anterior, foram utilizadas células aprovadas com conceito A, cuja capacidade, quando nova, era de 900 mAh, também foi reduzida para aproximadamente 740 mAh, mas que ainda assim garante uma autonomia capaz de alimentar, por exemplo, um mp3 player de aproximadamente 0,3W com consumo aproximado de 90mAh por um tempo ligeiramente superior a nove horas.

Esta fonte, com saída USB, permite que, com a utilização de diferentes adaptadores USB seja possível alimentar vários tipos de aparelhos eletrônicos.

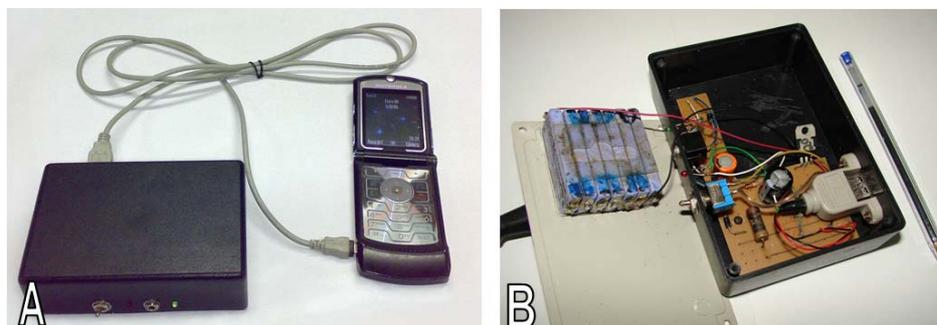


Figura E2 - Fonte em funcionamento em A, e aberta mostrando sua bateria formada por 7 células de NiMH do modelo BKB 193 (123-105) em B.

APÊNDICE F – Produção Bibliográfica / Participações em Eventos

Artigos completos publicados em periódicos

SCHNEIDER, E.L., KINDLEIN JR., W., SOUZA, S., MALFATTI, C.F. Assessment and reuse of secondary batteries cells. Journal of Power Sources. , v.189, p.1264 - 1269, 2009

Trabalhos publicados em anais de eventos (completo)

SCHNEIDER, E. L., KINDLEIN JR., W. Recuperação e Reutilização de Baterias de Celular em Equipamentos Eletrônicos em Geral In: II Seminário sobre Tecnologias Limpas, 2007, Porto Alegre. Anais do II Seminário sobre Tecnologias Limpas, 2007.

Trabalhos publicados em anais de eventos (resumo)

SCHNEIDER, E.L., KINDLEIN JR., W., MENEZES, T.L., MALFATTI, C.F. Reutilização de Componentes de Celulares Descartados” no 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECIMAT, Porto de Galinhas – Pernambuco, 2008.

Apresentação Oral de Trabalho / Palestras

Lixo Eletrônico: Estudo de caso em tratamento dado para baterias de celular. 2º Conferência Municipal de Meio Ambiente, 2008.

Lixo Tecnológico: Um problema a ser encarado! 4º Encontro de Tecnologia da Informação e Comunicação, 2007.

Recondicionamento de Baterias Recarregáveis: uma Alternativa para o Energy Design em Produtos Eletrônicos. Palestra para o Curso Design de Produto da Feevale, 2007.

Recondicionamento de baterias de celular. Resíduos Sólidos, Responsabilidades de todos nós. Dia Interamericano de Limpeza e Cidadania, 2007.

Trabalhos em Andamento

Foi entregue à Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico - SEDETEC – UFRGS, a fim de dar início ao pedido de depósito de patente, o relatório de Invenção, tanto processo de avaliação, como da bancada de testes e aberto o processo no Protocolo Geral da UFRGS sob nº 23078.031681/09-06.

Foi feita a inscrição para participação do Prêmio Fiema na Categoria: Tecnologia ambiental na 4ª Fiema Brasil – Feira Internacional de Tecnologia para o Meio Ambiente, abril 2010.

GLOSSÁRIO

Ânion: Íon no eletrólito com carga negativa.

Ânodo: O eletrodo em uma célula eletroquímica onde ocorre oxidação. Durante a descarga, o ânodo é o eletrodo negativo da célula. Durante a carga, a situação se inverte e o ânodo passa a ser o eletrodo positivo.

Bateria: Uma ou mais células eletroquímicas eletricamente conectadas em uma associação série e/ou paralelo para fornecer os requerimentos de voltagem de funcionamento e o nível de corrente, podendo incluir monitores, controles e outros componentes auxiliares (fusíveis, diodos), invólucro, terminais e identificações.

Cátion: Íon no eletrólito com carga positiva.

Capacidade: a quantidade total de ampéres hora (Ah) que pode ser retirada de uma pilha ou uma bateria completamente carregada sob condições específicas de descarga.

Capacidade Disponível: A capacidade total (em ampéres hora) que será obtida, a partir de uma célula ou a bateria, a taxas de descarga definidas ou outras condições de funcionamento.

Capacidade em Ampéres hora: A quantidade de energia elétrica medida em Ampéres hora (Ah) que pode ser fornecida por uma pilha ou bateria sob condições específicas.

Capacidade de Retenção: A fração da capacidade disponível da bateria sob condições específicas de descarga, após ter sido armazenado por um determinado período de tempo.

Carga: A conversão de energia elétrica, fornecida sob a forma de corrente de uma fonte externa, em energia química dentro de uma pilha ou bateria.

Carregamento: Um termo utilizado para designar carga indicando a densidade de corrente em uma bateria.

Célula: Fonte de energia elétrica por conversão direta de energia química. A célula é a unidade eletroquímica básica de uma bateria e é constituída por um conjunto de eletrodos, separadores, eletrólito, invólucro e terminais.

Ciclo: A descarga e posterior (ou anterior) carga de uma bateria secundária, de modo que a sua condição original seja restaurada.

Ciclo de Serviço: Um ciclo de trabalho caracterizado por sequências de carga e descarga frequentes e geralmente profundas.

Ciclo de Vida: O número de ciclos em condições específicas, que estão disponíveis em uma bateria secundária, antes que ela deixe de cumprir os critérios especificados quanto ao desempenho.

C Rate: A taxa de carga ou descarga, em ampéres, expressa como um múltiplo da capacidade nominal em ampéres hora.

Descarga: A conversão da energia química de uma pilha ou bateria em energia elétrica.

Descarga Profunda: Retirada de pelo menos 80 % da capacidade nominal de uma bateria.

Descontrole Térmico (*Thermal Runaway*): Condição em que uma bateria em carga (ou descarga) irá superaquecer e se degradar, através da geração interna de calor causado por correntes de sobrecarga (ou sobredescarga) ou outras condições excessivas.

Efeito Memória: Fenômeno no qual uma célula, operado em ciclos sucessivos de recarga, sem acontecer antes, a descarregada completa. Isto causa na bateria a “perda” da energia restante armazenada, que se torna indisponível.

Eficiência em Ampéres Hora: A razão de eficiência entre a saída de uma pilha ou bateria secundária, medida em ampéres hora, em relação à entrada necessária para restaurar o estado inicial de carga, em condições específicas.

Eletrodo: O local, área ou local em que ocorrem os processos eletroquímicos.

Eletrólito: O meio que fornece o mecanismo de transporte de íons entre os eletrodos positivos e negativos de uma célula.

Energia Específica: A razão da produção de energia de uma pilha ou bateria em relação ao seu peso (Wh/kg).

Envelhecimento (*Aging*): Perda permanente da capacidade, devido, quer à utilização repetida ou à passagem do tempo.

Estado de Carga (*State of Charge - SOC*): A capacidade disponível em uma bateria, expressa em percentagem da capacidade nominal.

Faraday: Um equivalente grama de matéria quimicamente alterado em cada eletrodo de uma célula para cada 96.494 Coulombs.

Força Eletromotriz (*FEM*): Diferença de potencial entre dois eletrodos em um meio específico.

Impedância Interna A oposição ou resistência de uma pilha ou bateria para uma corrente alternada de frequência específica.

Íon: Uma partícula em solução, com uma carga negativa ou positiva.

IR: A voltagem que é o produto da resistência elétrica (R) de uma pilha ou bateria com a corrente (I). O valor é o produto da resistência em Ohms e a corrente em ampéres.

Material Ativo: O material nos eletrodos de uma célula ou bateria que faz parte das reações eletroquímicas de carga ou de descarga.

Paralelo: Termo usado para descrever a associação de pilhas ou baterias em que todos os terminais de mesma polaridade estão ligados entre si. Conexões paralelas aumentam a capacidade da bateria resultante.

Ponto Médio de Voltagem (*Midpoint Voltage*): A voltagem de uma bateria durante a descarga no meio do caminho entre a carga máxima e a voltagem final.

Potencial de Eletrodo: A voltagem desenvolvida por uma única placa, positiva ou negativa contra um eletrodo de referência padrão, tipicamente o eletrodo de

hidrogênio padrão. A diferença algébrica de tensão dos dois eletrodos é igual a voltagem da pilha.

Profundidade de Descarga: A razão entre a quantidade de eletricidade (geralmente em Ampéres hora) retirada de uma pilha ou bateria em uma descarga em relação à sua capacidade nominal.

Prazo de validade: O período de armazenamento sob condições especificadas no qual uma célula ou a bateria ainda mantém a capacidade de dar um desempenho especificado.

Recombinação de oxigênio: O processo pelo qual o oxigênio gerado na placa positiva durante a carga reage na placa negativa.

Resistência interna: A oposição ou a resistência ao fluxo de uma corrente elétrica dentro de uma pilha ou bateria; a soma das resistências iônica e eletrônica dos componentes da célula.

Separador: material espaçador eletronicamente não condutor, permeável a íons, que impede o contato eletrônico entre os eletrodos de polaridade oposta na mesma célula.

Série: Termo usado para descrever a associação de pilhas ou baterias em que o terminal positivo de uma está ligado ao terminal negativo da outra, e assim por diante. Conexões em série aumentam a voltagem da bateria resultante.

Sobrecarga: A corrente forçada através de uma bateria após todo o material ativo ter sido convertido para o estado carregado. Em outras palavras, a continuação da carga depois de ter se alcançado 100% do estado de carga.

Sobredescarga: A descarga além do ponto onde a capacidade total da bateria já foi obtida.

Sobrevoltagem: A diferença de potencial entre o potencial de equilíbrio de um eletrodo e do eletrodo sob a polarização imposta por uma corrente.

Tensão Elétrica de Circuito Aberto: A diferença de voltagem entre os terminais de uma célula ou a voltagem quando o circuito está aberto (sem condição de carga).

Tensão Elétrica de Funcionamento: A voltagem típica ou faixa de tensões de uma bateria durante a descarga.

Vida: Para baterias recarregáveis é a duração de um desempenho satisfatório, medido em anos ou em número de ciclos de carga/descarga (ciclo de vida).

Voltagem de Corte: A voltagem da bateria em que a descarga é finalizada. Também chamado de voltagem final.

Voltagem Nominal: A voltagem de operação característica de uma bateria.

Voltagem Final: A voltagem prescrita em que a descarga (ou carga, no caso de voltagem final de carga) de uma bateria pode ser considerada completa.