

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE QUÍMICA



**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**SEPARACIÓN Y RECICLAJE DE BATERÍAS EN EL RELLENO INDUSTRIAL
DE BLUMENAU, BRASIL. COMPARACIÓN CON LA SITUACIÓN DE COSTA
RICA.**

REALIZADO POR:

JULIANA MADRIGAL ARAYA

Director: Prof. Dr. Ing. Luis G. Romero Esquivel. - ITCR

Orientador: Prof. Dr. Ing. Vinicyus R. Wiggers.- FURB

Enero, 2013. Cartago.

DEDICATORIA

A mis sobrinos que representan las nuevas generaciones que heredarán el mundo que estamos administrando. Por ellos me comprometo a cada día luchar para dejarles un planeta mejor de como lo encontré.

¡Herédales a tus hijos vida!

Juliana Madrigal Araya

AGRADECIMIENTOS

A mi superior por darme la vida, a quien debo el mérito de todas y cada una de mis conquistas.

A mi familia, especialmente a Ester Araya por todas sus oraciones de madre y por creer en mí a lo largo de estos cinco años de esfuerzo, a Elizabeth Marín por toda la ayuda incondicional cuando más la necesité. Gracias a mis padres, a mis hermanos y a sus familias, por estar a mi lado siempre.

A mis amigos de Costa Rica y Brasil por tantas emociones compartidas, me han dado la fuerza para salir adelante en los momentos difíciles y disfrutar de este proceso.

A la Federação Universitaria Regional de Blumenau – FURB por aceptar el intercambio universitario, por recibirme con tanta consideración y optimismo, especialmente al profesor Sérgio Cabral y a Micheli Volpi por toda su ayuda.

Al Instituto Tecnológico de Costa Rica – ITCR, a Merlin Mata y Paula Ulloa de Relaciones Internacionales por tramitar el intercambio y brindar orientación, a Karla González, a Nidia Campos y a Marta Richmond por su gran apoyo, así como a los departamentos donde ellas laboran: Trabajo Social, Financiero Contable y Vicerrectoría de Vida Estudiantil respectivamente.

Del departamento de ingeniería ambiental del ITCR, agradezco a la coordinadora Ing. Liliana Gaviria y a Adriana Cerdas. Especialmente al profesor Luis Romero, por su dedicada orientación en el proyecto y gran ayuda al llegar a Brasil.

A la empresa Momento Engenharia Ambiental por la oportunidad de desarrollar mi trabajo en la empresa, a la Ingeniera Anne-Mery Piseta y a Geanderson Riveiro, así como a todas las personas de la empresa que me brindaron su amistad y apoyo en estos meses, haciéndome sentir como en casa.

Del departamento de Ingeniería Química de la FURB, al profesor Vinicyus por orientarme para encaminar el proyecto de manera objetiva y a la profesora Rita por su asesoría.

Al Ministerio de Ciencia y Tecnología – MICIT por su apoyo económico en la pasantía, principalmente al Señor Gerardo Fuentes.

CONTENIDO

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
LISTA DE TABLAS.....	6
LISTA DE CUADROS	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE ABREVIATURAS	8
RESUMEN.....	9
ABSTRACTS.....	10
Capítulo 1 – INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos.....	14
Capítulo 2 – MARCO CONCEPTUAL	14
2.1 Definición pilas y baterías.....	14
2.2 Funcionamiento de las baterías	15
2.3 Clasificación de las baterías	16
2.3.1 <i>Por el estado del electrolito</i>	16
2.3.2 <i>Por la reversibilidad del proceso de generación</i>	17
2.3.3 <i>Por sus formas</i>	17
2.3.4 <i>Por sus componentes internos</i>	17
2.3.5 <i>Clasificación recomendada</i>	20
2.4 Toxicología de los componentes de las baterías	22
2.5 Gerenciamiento de baterías	23
2.5.1 <i>Reciclaje</i>	23
2.5.2 <i>Tratamiento</i>	26
2.6 Procesos de separación de sólidos.....	28
2.6.1 <i>Tamizado</i>	28
2.6.2 <i>Imantación</i>	29
2.6.3 <i>Sedimentación</i>	30
2.7 Legislación aplicable a baterías.....	30
2.7.1 <i>Legislación brasileña referente a baterías</i>	31

2.7.2	<i>Legislación costarricense referente a baterías</i>	35
2.8	Situación del gerenciamiento de baterías en Brasil	37
2.8.3	<i>Tratamiento de baterías en la empresa MEA</i>	38
2.9	Situación del gerenciamiento de baterías en Costa Rica	40
Capítulo 3	– METODOLOGÍA	43
3.1	Determinación de la composición de los cargamentos de baterías	43
3.1.1	<i>Organización inicial</i>	43
3.1.2	<i>Muestreo del sistema</i>	44
3.1.3	<i>Clasificación práctica</i>	45
3.2	Método más adecuado para tratar y reciclar cada tipo de baterías	47
3.3	Separación mecánica de los diferentes tipos de baterías	47
3.3.1	<i>Método de tamizado</i>	48
3.3.2	<i>Método de gravimetría</i>	49
3.3.3	<i>Método de imantación</i>	50
3.3.4	<i>Método de sedimentación</i>	50
3.4	Investigación de la situación de tratamiento de baterías en Costa Rica	50
Capítulo 4	– RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
4.1	Composición de los cargamentos de pilas y baterías	52
4.1.1	<i>Baterías de los contenedores con Pila Mixta</i>	54
4.1.2	<i>Baterías almacenadas en la CTRB</i>	55
4.2	Rutas de reciclaje de cada tipo de baterías	56
4.2.1	<i>Reciclaje de pilas secas por hidrometalurgia</i>	57
4.2.3	<i>Reciclaje de baterías de Níquel por pirometalurgia</i>	57
4.2.3	<i>Almacenamiento de pilas botón</i>	58
4.2.4	<i>Logística reversa de baterías de Litio</i>	59
4.2.5	<i>Recuperación de baterías de plomo ácido</i>	60
4.2.6	<i>Macro encapsulamiento de baterías no identificables</i>	60
4.3	Separación mecánica de los diferentes tipos de baterías	62
4.3.1	<i>Método de tamizado</i>	64
4.3.2	<i>Método de gravimetría</i>	67
4.3.3	<i>Método de imantación</i>	69
4.3.4	<i>Método de sedimentación</i>	70

4.4 Comparación situación Costa Rica y Brasil	71
Capítulo 5 – CONCLUSIONES.....	73
Capítulo 5 – RECOMENDACIONES	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
ANEXOS / APÉNDICES.....	81
ANEXO A. Técnica de Macro encapsulación en testigos de hormigón con aditivo impermeabilizante propuesta por Ortiz, 2009	81
APÉNDICE A. Cálculos del aumento de la vida útil de la célula 1B	83
APÉNDICE B. Cálculos de la eficiencia de los tamizados.....	85
APÉNDICE C. Cálculos de la propuesta macro encapsulamiento de baterías en bloques de concreto	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Contenedores almacenados en la CTRB por un periodo de cinco meses.	54
Tabla 2. Resultados de la clasificación de baterías de los contenedores calificados como Pila Mixta.	55
Tabla 3. Composición total de los ingresos del residuo industrial “Pilhas e baterias” en la CTRB, código 520.....	55
Tabla 4. Diferentes tipos de baterías encontrados en cada una de las Clases establecidas (Sección 3.1.3).	63
Tabla 5. Índices de rechazo y de cernido en el tamizado.	64
Tabla 6. Porcentajes de recuperación de Clases en los procesos de tamizado desde el punto de vista del Rechazo.	65
Tabla 7. Porcentajes de recuperación de Clases en los procesos de tamizado desde el punto de vista del Cernido.	65
Tabla 8. Masas de las diferentes marcas de formato AA encontradas en el Rechazo 3.....	68
Tabla 9. Distancias máximas (mm) de atracción de pilas AA a al imán de 10 cm de diámetro.	69
Tabla 10. Masas de resultados de cernido y rechazo de cada tamizado.....	85
Tabla 11. Evaluación económica de encapsulamiento en bloques en la CTRB.....	87

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Aplicaciones y componentes de las baterías portátiles.....	18
Cuadro 2. Principales efectos a la salud y peligrosidad de los metales pesados.	20
Cuadro 3. Límites máximos de concentración permitida de metales pesados en agua.	30
Cuadro 4. Concentraciones máximas de metales pesados en baterías según la Resolución de CONAMA no 401.	32

Cuadro 5. Residuos de baterías generados por construcción de aparatos y suministros eléctricos (fuente generadora código 839).....	36
Cuadro 6. Tamices empleados en el método tamizado.	49
Cuadro 7. Ingresos mensuales (toneladas) de "pilhas e baterias" código 520 en la CTRB de los últimos siete años.	52
Cuadro 8. Componentes principales de las baterías de Litio.....	59
Cuadro 9. Indicadores del gerenciamiento de baterías secas de Costa Rica y Brasil.....	71
Cuadro 10. Composición de la mezcla para conformar Bloques de Hormigón con aditivo impermeabilizante.	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Consumo promedio de baterías en Brasil por año.	11
Figura 2. Modelo de funcionamiento de la Célula de Daniell.....	15
Figura 3. Formas de las baterías portátiles.	17
Figura 4. Etapas de los programas de reciclaje de baterías.	26
Figura 5. Técnica de macroencapsulación de pilas en bloques de cemento.....	28
Figura 6. Método de imantación.	30
Figura 7. Logística Reversa post consumo.....	34
Figura 8. Residuos encapsulados en la Célula 1B de la CTRB.....	39
Figura 9. Célula 1B de la CTRB.	40
Figura 10. Transporte de baterías almacenadas.....	44
Figura 11. Organización de las baterías almacenadas en la CTRB.	44
Figura 12. Metodología de muestreo para conocer las baterías de los ingresos.....	45
Figura 13. Separación manual de baterías según	46
Figura 14. Muestra secundaria seleccionada.	48
Figura 15. Ingresos de "pilhas e baterias " en la CTRB en los últimos años.	53
Figura 16. Acondicionamiento de los ingresos de pilas y baterías.....	53
Figura 17. Composición total de los ingresos "Pilhas e baterias" en la CTRB, código 520.	56
Figura 18. Componentes de las pilas Zinc-Carbono (A) y Alcalinas de Mn (B).	57
Figura 19. Macroencapsulamiento de baterías no identificables en la CTRB.....	61
Figura 20. Contenido de la muestra secundaria	62
Figura 21. Tamizado 1.	66
Figura 22. Tamizado 2.	66
Figura 23. Tamizado 3.	67
Figura 24. Método de imantación empleado.	69
Figura 25. Método de sedimentación.	70
Figura 26. Vista frontal del testigo de Hormigón.....	82
Figura 28. Modelo de Encapsulamiento propuesto por Ortiz.	82
Figura 28. Macroencapsulamiento de baterías en bloques de concreto en la CTRB.	87

LISTA DE ABREVIATURAS

ABINEE: Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CTRB: Central de Tratamento de Resíduos de Blumenau

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

EPA: Environmental Protection Agency

EPBA: European Portable Battery Association

FAEMA: Fundação Municipal do Meio Ambiente de Blumenau

FATMA: Fundação do Meio Ambiente Governo Estadual de Santa Catarina

IEA: International Energy Agency

LRO: Logística Reversa Obrigatória

LR: Logística Reversa

MEA: Momento Engenharia Ambiental

NBR: Normas Brasileiras

PNRS: Política Nacional de Resíduos sólidos

PEAD: Polietileno de Alta Densidad

PRESOL: Programa de Residuos Sólidos de Costa Rica

TCLP: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

RESUMEN

Considerando los efectos negativos por la disposición inadecuada de baterías al ambiente, como fuente de contaminación con metales pesados, fue desarrollado un estudio sobre las posibles formas de tratamiento y separación de las baterías tratadas en el relleno industrial de Blumenau en Brasil, operado por la empresa Momento Engenharia Ambiental, que inicialmente pretendía sustituir la macro encapsulación de baterías por programas de logística reversa como herramienta del reciclaje. Se determinó la composición de los cargamentos de baterías de ingreso, separando una muestra en seis Clases inicialmente por método manual y después, a escala laboratorio fueron practicados ensayos de tamizado, gravimetría, imantación y sedimentación. Los resultados determinaron que el 60% de las baterías corresponde a pilas secas primarias reciclables por proceso hidrometalúrgico, el 22% a baterías de ión litio que son objeto de logística reversa debido a que pueden ser donadas a empresas dedicadas al reciclaje de electrónicos; el 15% corresponde a las recargables de níquel que pueden ser recicladas por pirometalurgia y 2% se encuentran oxidadas, de manera que deben continuar siendo encapsuladas. Se determinó modificar la técnica actual de encapsulamiento en estañones por encapsulamiento en bloques de concreto que son útiles en la construcción civil; estas técnicas fueron propuestas debido a la ausencia de programas de logística reversa en la región. En los métodos de separación se obtuvo que el método de tamizado fue el más adecuado para la semi separación de baterías según su tamaño, la gravimetría y sedimentación no presentaron buenos resultados y la imantación permitió separar sólo las baterías no herrumbradas. Al comparar la situación de Brasil y Costa Rica, se determinó que presentan índices de recuperación de baterías de 1,17% y 8% respectivamente, con encarecidas y pocas opciones de reciclaje; además las baterías secas se encuentran en la lista de residuos peligrosos aún no reglamentados en Costa Rica. Se propone la sustitución de la técnica de macro encapsulación de pilas y baterías, implementando metodologías de reciclaje y logística reversa según cada Clase previamente separada, para aumentar la vida útil del relleno y mejorar el desempeño ambiental de la empresa.

Palabras clave: batería, pila, reciclaje, logística reversa, tratamiento.

ABSTRACTS

Considering the negative effects of improper disposal of batteries to the environment as a source of contamination with heavy metals was developed a study about the possible forms of treatment and separation of batteries treated in the industrial landfill of Blumenau, operated by the Momento Engenharia Ambiental enterprise, who initially would pretend to replace the battery macro encapsulation currently practiced by reverse logistics programs. Was determined battery shipments composition entering the landfill, separating a sample into six classes by manual method initially and then in scale laboratory by screening, gravimetric, magnetism and sedimentation tests. The results determined that 60% of the batteries corresponds to primary dry cells that are recyclable by hydrometallurgy, 22% to lithium ion batteries, which that are the subject of reverse logistics because they can be donated to companies that recycle electronic equipments, 15% corresponds to the rechargeable nickel batteries that can be recycled by pyrometallurgy and 2% are rusty, for this type was proposed encapsulation in concrete blocks that are useful in the civil construction. These techniques have been proposed due to the absence of reverse logistics programs in the region. In the separation methods was obtained that the screening method is more suitable for batteries semi separation according to size, the gravimetric and the sedimentation methods aren't showed good results and the magnetization allowed to separate only batteries not rusted. Moreover was compared the Costa Rican situation with the Brazilian situation, the results shows that both countries have down recuperation percents bellow 10 per cent of dry batteries, but Costa Rica is worse that Brazil because it's only 1,7 per cent. So proposes the substitution of the macro encapsulation technique by recycling and implementing methodologies of reverse logistic, previously separated each type of batteries, to increase the useful life of the landfill and to improve the environmental performance of the company.

Key words: battery, cell, recycle, reverse logistic, encapsulation, separation.

Capítulo 1 – INTRODUCCIÓN

El uso de aparatos electrónicos portátiles ha venido aumentando considerablemente en los últimos años y con ello se ha incrementado el consumo de pilas y baterías para el funcionamiento de los mismos (1).

Las pilas son dispositivos que transforman energía química en energía eléctrica, el conjunto de pilas constituye una batería (2). Ambos sistemas contienen metales pesados dentro de sus componentes, que son sustancias tóxicas para el ser humano y el ambiente (3). Al ser dispuestas en vertederos, contaminan el suelo, las aguas subterráneas y los cuerpos de agua; viéndose comprometida la calidad ambiental y la salud de la población (4) (5).

Aunque hay tendencias a disminuir las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en las baterías (6), en la actualidad continúan siendo un residuo peligroso según la norma NBR 10004 de la Asociación Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) sin embargo, estos residuos son comúnmente depositados en los desechos domésticos (7). Cada batería o pila dispuesta de forma inadecuada, contamina un área promedio de un metro cuadrado, pero el tiempo de degradación es de más de mil años (4).

Según datos de la Asociación Brasileira de la Industria Eléctrica y Electrónica (ABINEE en portugués) en Brasil se producen 800 millones de unidades de baterías portátiles anualmente, pero el consumo total es de 910 millones (8). El consumo promedio es de 6 pilas por habitante al año, donde cerca de un 80% son del Zinc-Carbón según se muestra en la Figura 1 (9).

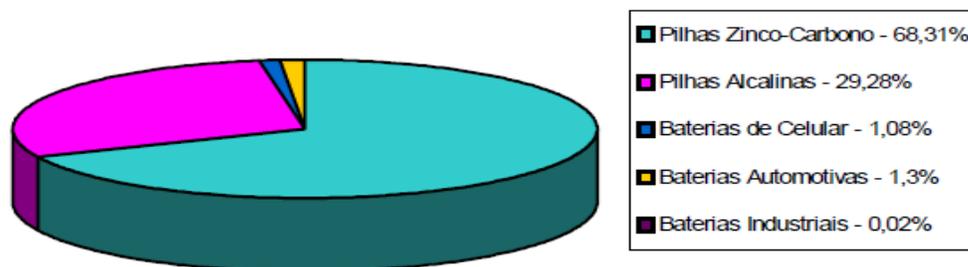


Figura 1. Consumo promedio de baterías en Brasil por año.
Fuente: SCHARF, 2000.

Según la ABNT en la norma NBR 10004, las pilas y baterías son clasificadas como residuos peligrosos por presentar riesgo a la salud pública y al ambiente (10), deben ser manipuladas y almacenadas de acuerdo a las condiciones establecidas según la NBR 12235 (11). Además la ley 12305 establece que los vendedores de pilas y baterías deben recibir las de los clientes una vez agotadas energéticamente, implementando la logística reversa en el proceso productivo hasta darles un destino final adecuado (12). Sin embargo, los órganos ambientales desconocen la existencia de programas locales para tal fin (13).

La situación se complica aún más porque uno de los principales problemas para el reciclaje y la gestión adecuada de este residuo es la gran variedad de formas, tamaños y composición química (14). Por ejemplo en cuanto a composición química las baterías más comunes son de Zinc-Carbón, Alcalinas de Manganeso, Níquel-Cadmio, Níquel-Hidruro Metálico, Ión Litio y Plomo ácido (8).

Adicionalmente, los procesos de reciclaje de pilas y baterías fueron desarrollados para trabajar solamente un tipo específico, debido a que la contaminación de la chatarra puede causar daño al proceso e impedir la recuperación de los metales (14). Esto motivó la idea de efectuar una colecta selectiva de baterías, que tuvo su inicio a partir del año 2000; no obstante, los problemas para el reciclaje son actuales, pues falta estructura para la colecta, y pocas empresas se dedican a esta tarea (6), además no existen planes intersectoriales para la implementación de esta herramienta.

Los principales sistemas de reciclaje consisten en técnicas hidrometalúrgicas y pirometalúrgicas (15), en las que un gran desafío que se enfrenta es la separación adecuada según sus componentes. Por otro lado, los sistemas de tratamiento consisten en solidificación, incineración y disposición en rellenos (16).

En el caso de la ciudad de Blumenau del estado de Santa Catarina en Brasil, las baterías recogidas de los puntos de colecta, son enviadas a la Central de Tratamiento de Residuos de Blumenau (CRTB), operada por la empresa Momento Engenharia Ambiental (MEA). El material tratado en la CRTB, proviene de los escasos programas de colecta selectiva y está compuesto por diferentes tipos de baterías portátiles, o sea, hay una mezcla de diversos productos con composición química, formas y pesos bastante distinta una de la otra (14).

En la CTRB se emplea la técnica de macroencapsulamiento como mecanismo de estabilización de residuos peligrosos no compatibles desde hace 13 años (17). Dicha técnica consiste en encapsular las baterías dentro de estañones que son tapados con concreto, aislando el residuo del ambiente externo. Sin embargo, en la MEA existe la necesidad mejorar el gerenciamiento de este residuo. Para eso, inicialmente las baterías deben ser separadas en Clases para su respectivo procesamiento, ya sea dentro de la empresa mediante tratamiento interno o bien, fuera de ella mediante rutas de logística reversa, para su debido reciclaje.

En Costa Rica la cantidad de baterías secas de desecho anual es de 6 800 toneladas (1,7 Kg por persona al año) y a nivel de país presenta grandes problemas para el tratamiento y disposición adecuada de baterías secas, ya que este residuo está en la lista de los desechos peligrosos no reglamentados (18), por otro lado las iniciativas de colecta selectiva de baterías son pocas, debido a que existe solamente una empresa que se dedica a gestionarlas de manera segura, para lo cual se debe pagar una tasa poco accesible (\$4000 por tonelada) para enviarlas a los Estados Unidos donde finalmente son recicladas (19) (20).

En este trabajo se propone un método mecánico de separación y las posibles vías de reciclaje para cada una de las Clases de baterías portátiles que ingresan en la CTRB. Esto con el fin de mejorar el desempeño ambiental de la empresa, así como aumentar la vida útil del relleno industrial, a la vez que se explora un nuevo campo y opción de negocios, siendo una empresa pionera en Santa Catarina en tratamiento de residuos industriales. Finalmente, se hace una comparación con la situación actual de Costa Rica en relación a la legislación y las opciones de tratamiento de pilas y baterías.

1.1 Objetivo General

Proponer un método de separación mecánica, así como las posibles vías de reciclaje para las diferentes Clases de baterías portátiles que ingresan en la CTRB como sustitución de la técnica de macro encapsulación actualmente practicada, paralelamente comparar la situación brasileña con la de Costa Rica en la gestión de este residuo.

1.2 Objetivos Específicos

1. Determinar los tipos de baterías tratadas en la CTRB.
2. Identificar la ruta de reciclaje y tratamiento más adecuado para cada Clase de baterías que ingresan en la CTRB.
3. Definir un método de separación mecánica de las diferentes Clases de baterías de la CTRB.
4. Comparar la situación brasileña con la situación actual de Costa Rica referente a gestión de baterías de desecho.

Capítulo 2 – MARCO CONCEPTUAL

2.1 Definición pilas y baterías

Por definición una pila o célula es un sistema o dispositivo que convierte energía química en energía eléctrica mediante reacciones de oxido-reducción (1) está formada por dos electrodos: el ánodo (polo negativo) y el cátodo (polo positivo) sumergidos en un electrolito (21) (22). Los electrodos son constituidos por metales potencialmente peligrosos, los electrolitos pueden ser ácidos o bases dependiendo del tipo de pila, además en las pilas pueden ser encontrados plástico, papel/cartón y acero (23).

Una batería define un conjunto de pilas dispuestas en serie o en paralelo, para producir el voltaje deseado (1). En la práctica, la población no hace distinción entre los términos “batería” y “pila” (16) (21). En el presente trabajo será adoptado el término batería para referirse a pilas y baterías en general, pues la clasificación determinada se basa en los componentes internos de éstos sistemas, teniéndose dentro de cada clasificación tanto pilas, como baterías.

2.2 Funcionamiento de las baterías

Las baterías existentes en el mercado funcionan bajo el mismo principio, la energía liberada durante una reacción de oxido-reducción es transformada directamente en energía eléctrica (1) (24). Durante esta operación, el cátodo es reducido por la absorción de los electrones liberados por la oxidación del ánodo (1). En la medida que los electrones son producidos en el ánodo, son usados en un circuito externo (por ejemplo, la incandescencia de un flash), donde liberan su energía (7) según el modelo de la Célula de Daniell introducida en 1836 como se muestra la Figura 2.

Basic Principles of a Daniell Cell (Battery)

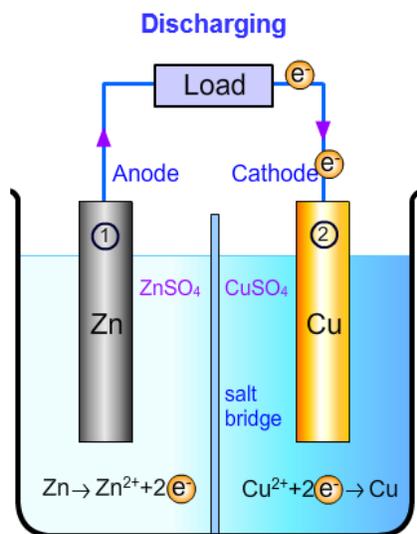


Figura 2. Modelo de funcionamiento de la Célula de Daniell.

Fuente: Universidad de Cambridge, 2005.

En este modelo explica que los electrolitos están separados uno del otro por un puente de sal o de una membrana porosa, que permite a los iones de sulfato pasar y transportar la corriente iónica por los bloques metálicos. En el lado izquierdo de la Figura 2 se muestra la oxidación del zinc generando electrones y del lado derecho la reducción del cobre donde los electrones son consumidos (25).

En el ánodo: $Zn \rightarrow Zn^{2+}(aq) + 2e^{-}$ Electricidad generada = 0.76 Volts

En el cátodo: $Cu^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cu$ Electricidad generada = 0.34 Volts

Así el potencial total para esta célula es de 1,10 Volts.

La célula de Daniell es una batería, pero no es práctica para la portabilidad. Actualmente se ha cambiado el uso de dos electrolitos diferentes por baterías de forma redox (25).

En el estado completamente cargado, hay un exceso de electrones en el ánodo (por lo que es negativo) y un déficit en el cátodo (por lo que es positivo). Durante la descarga, los electrones fluyen desde el ánodo al cátodo en el circuito externo y se produce una corriente. La diferencia de potencial eléctrico entre el cátodo y el ánodo conduce a los electrones en el circuito externo, eso se denomina fuerza electromotriz (fem) (25). Una vez que todo el material activo en el cátodo se ha reducido y/o todo el material anódico activo ha sido oxidado, el electrodo ha sido efectivamente utilizado y la batería no puede suministrar más energía, de manera que pueden ser eliminados o reciclados si es una batería primaria, o recargada si se trata de una batería recargable (25).

2.3 Clasificación de las baterías

Las baterías pueden ser clasificadas tanto por el estado del electrolito, por la reversibilidad del proceso de generación de energía, por sus formas, así como por los componentes internos (14) (23) (26) (27).

2.3.1 Por el estado del electrolito

Existen dos categorías de baterías: húmedas y secas de acuerdo al estado de agregación de su electrolito. En las secas o semisólidas, el electrolito se encuentra en forma de pasta, gel, o cualquier tipo de matriz sólida, las más comunes son de Zinc-Carbono y las Alcalinas de Manganeseo, por lo general tienen electrolitos alcalinos (23).

En cuanto a las baterías húmedas, el electrolito se encuentra en estado líquido y en general es ácido. Las baterías húmedas más comunes son las de Plomo-ácido o grandes baterías automotoras (23). Este trabajo se enfoca principalmente en las baterías portátiles, no se profundiza en las grandes baterías automotoras, ya que éstas son recuperadas y recicladas en su totalidad debido a la viabilidad económica del proceso (28).

2.3.2 Por la reversibilidad del proceso de generación

Las baterías pueden ser primarias (no recargables) o secundarias (recargables). En las primarias la reacción química se lleva a cabo en una sola dirección, es decir, irreversiblemente y termina cuando toda la energía química del sistema fue consumida. En el caso de baterías secundarias, la reacción química es reversible, pero pueden ser recargadas por una fuente de energía externa (7).

2.3.3 Por sus formas

Las especificaciones de la Comisión Internacional de Energía (IEA en inglés) establecen un sistema de clasificación general de baterías, por grupos según se muestra en la Figura 3, siendo el formato “AA” el más usado. (29)

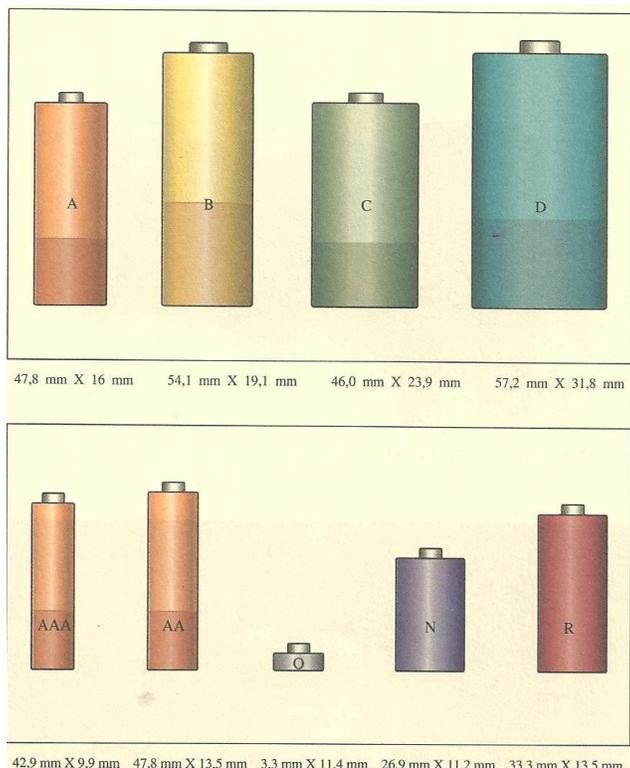


Figura 3. Formas de las baterías portátiles.
Fuente: IEA, 2011.

2.3.4 Por sus componentes internos

Según los componentes internos (electrodos y electrolito), las baterías pueden ser clasificadas según lo presentado en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Aplicaciones y componentes de las baterías portátiles.

Tipo de batería	Principales componentes	Usos/ Forma
Zn-C (Leclanché) 	<p>Ánodo: zinc.</p> <p>Cátodo: dióxido de manganeso.</p> <p>Electrolito: cloruro de amonio.</p>	<p>Usos: aparatos pequeños que requieren poca energía como aparatos radios, relojes de pared.</p> <p>Forma: cilíndrica, de diversos tamaños.</p>
Zinc-Carbono de alto desempeño <i>(heavy-duty o long-life)</i> 	<p>Ánodo: zinc.</p> <p>Cátodo: dióxido de manganeso.</p> <p>Electrolito: pasta de cloruro de zinc</p>	<p>Usos: aparatos pequeños que requieren poca energía como radios y relojes de pared.</p> <p>Forma: cilíndrica de distintos tamaños.</p>
Alcalinas de Manganeso 	<p>Ánodo: zinc en polvo.</p> <p>Cátodo: dióxido de manganeso (MnO₂).</p> <p>Electrolito: hidróxido de potasio/sodio (Medio alcalino).</p>	<p>Usos: grabadoras, linternas, cámaras fotográficas, juguetes mecanizados.</p> <p>Forma: cilíndrica de diversos tamaños, rectangular y de botón.</p>
HgO-Zn	<p>Ánodo: polvo de zinc amalgamado.</p> <p>Cátodo: óxido de mercurio</p> <p>Electrolito: potasio e hidróxido de zinc.</p>	<p>Usos: aparatos auditivos, cámaras, instrumentos eléctricos, equipamientos acústicos, mini calculadoras, transmisores, juegos electrónicos.</p> <p>Forma: botón.</p>
Ag₂O-Zn 	<p>Ánodo: zinc amalgamado en polvo.</p> <p>Cátodo: óxido de plata y grafito.</p> <p>Electrolito de hidróxido de potasio/ sodio.</p>	<p>Usos: aparatos auditivos, cámaras, instrumentos eléctricos, equipamientos acústicos, mini calculadoras, transmisores, juegos electrónicos.</p> <p>Forma: botón.</p>
Zn-Aire	<p>Ánodo: Zinc</p> <p>Cátodo: carbón activado, donde el oxígeno se torna electroquímicamente activo.</p> <p>Electrolito: hidróxido de potasio.</p>	<p>Usos: aparatos auditivos.</p> <p>Forma: botón.</p>

<p>Litio</p>	<p>Ánodo: litio metálico (potencial electroquímico más alto).</p> <p>Cátodo: dióxido de manganeso.</p> <p>Electrolito: varios compuestos orgánicos y soluciones salinas</p>	<p>Usos: relojes, calculadoras, juegos de bolso.</p> <p>Forma: botón y cilíndrico.</p>
<p>Ni-Cd</p> 	<p>Ánodo: cadmio.</p> <p>Cátodo: níquel</p>	<p>Usos: teléfonos inalámbricos, celulares, etc.</p> <p>Forma: botón o cilíndrico.</p>
<p>Ni-MH</p> 	<p>Ánodo: liga MH: níquel, vanadio, titanio y niobio.</p> <p>Cátodo: níquel más voluminoso.</p>	<p>Usos: En aparatos electrónicos como cámaras digitales.</p> <p>Forma: prima y cilíndrico en tamaño AA.</p>
<p>Ión Litio</p> 	<p>Grafito Litio Óxido de cobalto</p>	<p>Usos: computadoras portátiles y celulares.</p> <p>Forma: cilíndrica, concha prismática, de Aluminio bordes redondeados y prismática de concha de acero.</p>
<p>Plomo ácido</p>	<p>Ánodo: plomo metálico</p> <p>Cátodo: óxido de plomo</p> <p>Electrolito de ácido sulfúrico y sellado con un revestimiento de polipropileno usado.</p>	<p>Usos: aplicaciones parecidas a las baterías de Ni-Cd.</p> <p>Forma: pequeñas baterías: cilíndrica y prismática.</p>

Fuente: Braz, 2001; Environmental Canadá, 1991; Aguiluz *et al.*, 2006; Martinez, 2007.

En la mayoría de ellas, el cátodo es un agente oxidante, generalmente un óxido metálico. El ánodo es constituido por un metal que sufre corrosión en varios grados en el electrolito (7).

2.3.5 Clasificación recomendada

La Asociación Europea de Baterías Portátiles (EPBA en inglés) propone el reciclaje de las pilas para recuperar los metales que éstas contienen (27). No obstante, antes de llevar a cabo la etapa de reciclaje de éstas, es necesario clasificarlas según sus componentes químicos (15). La clasificación puede ser realizada manualmente, automática o semiautomáticamente en los siguientes tipos:

Pilas alcalinas de manganeso y pilas de cinc-carbón.

Baterías de níquel-cadmio y de níquel metal hidruro.

Baterías recargables de ión litio.

Baterías de plomo-ácido.

Pilas botón.

Además de los electrodos y el electrolito mencionados en cada uno de los sistemas del Cuadro 1, en las baterías se encuentran otros metales en concentraciones mucho menores, éstos tienen la función de inhibir reacciones indeseadas en el dispositivo (7). Los metales pesados empleados en baterías tanto como componentes principales, así como en cantidades traza se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Principales efectos a la salud y peligrosidad de los metales pesados.

Metal	Efectos a la salud	Peligrosidad
Cadmio*	Cáncer Disfunciones digestivas Problemas pulmonares y en el sistema respiratorio	Incompatible con agentes oxidantes fuertes, nitratos y HNO ₃ , en contacto con éstos provoca incendios y explosiones. En compuestos como el Clorato y el Bromato puede explotar sobre la acción del calor.
Plomo*	Anemia Disfunción renal Dolores abdominales (cólico, espasmo y rigidez) Encefalopatía (somnolencia, disturbios mentales, convulsión, coma) Neuritis periférica (parálisis) Problemas pulmonares Teratogénico	Masa de sólidos que no presenta riesgo al ser almacenado adecuadamente. En compuestos como el clorato y el bicromato pueden causar explosión sobre la acción del calor.
Cobalto	Lesiones pulmonares y en el sistema respiratorio Disturbios hematológicos	Es un metal estable, no presenta riesgos al ser almacenado adecuadamente.

	Posible carcinogénico humano Lesiones e irritaciones en la piel Disturbios gastrointestinales Efectos cardíacos	
Cromo*	Cáncer en el sistema respiratorio Lesiones nasales y perforación del diafragma y perforaciones en la piel Disturbios en el hígado y riñones, puede ser letal; disturbios gastrointestinales	En fragmentos finos presenta peligro de incendio. Es incompatible con carbonatos, bases fuertes y ácidos minerales.
Litio	Dolor de garganta Calambres y dolor abdominales. Náuseas Shock o colapso Vómitos Edema pulmonar	Reacciona violentamente con el agua liberando gas H ₂ . Altamente inflamable. Debe ser manipulado en condiciones especiales por ser altamente corrosivo.
Manganeso	Disfunción cerebral y en el sistema neurológico Disfunciones renales, hepáticas y respiratorias Teratogénico	Incompatible con ácidos fuertes, fósforo y agentes oxidantes fuertes. Peligro de explosión sobre el calor.
Mercurio*	Congestión, pérdida de apetito, indigestión Dermatitis Disturbios gastrointestinales (con hemorragia) Elevación de la presión arterial Inflamación en la boca y lesiones en el aparato digestivo Lesiones renales Disturbios neurológicos y lesiones cerebrales Teratogénico, mutagénico y posible carcinogénico	Envenenamiento por vapores tóxicos, especialmente al ser calentado, incompatible con ácidos fuertes.
Níquel	Cáncer Lesiones en el sistema respiratorio Disturbios gastrointestinales Alteraciones en el sistema inmunológico Dermatitis Teratogénico, genotóxico, y mutagénico	Es estable en forma compacta. En forma de polvo y humo, es altamente inflamable. Incompatible con aluminio, Cloruro de Aluminio, p-dioxinas, Hidrogeno, Metanol, no metales, oxidantes y compuestos del Azufre. Reacciona violenta con solventes inflamables, Hidracina y pos-metálicos (especialmente Zn, Al y Mn).
Plata	Argiria (Decoloración de la piel y otros tejidos) Dolores estomacales y disturbios digestivos Problemas en el sistema respiratorio Necrosis de la médula ósea, hígado y	Las sales de plata son incompatibles con ácidos fuertes y bases fuertes.

	riñones, lesiones oculares	
Zinc	Alteraciones hematológicas Lesiones pulmonares y en el sistema respiratorio Disturbios gastrointestinales Lesiones en el páncreas	No es tóxico en estado puro. Gases liberados por el calentamiento del metal, o por reacciones químicas, pueden causar irritación.

Fuente: ASTDR, 2007; EPA, 2012; WHO, 2002.

*Esos metales están considerados en la Lista TOP de la USEPA, entre las 20 sustancias más peligrosas a la salud y el ambiente: Cd, Cr, Hg, Pb (EPA, 2012).

2.4 Toxicología de los componentes de las baterías

Las baterías son sistemas muy inestables, así los metales pesados son empleados en pocas cantidades en los sistemas de pilas y baterías como inhibidores de reacciones indeseadas (27). La mayoría de los metales pesados son esenciales para el buen funcionamiento de los organismos vivos en concentraciones traza, pero potencialmente tóxicos en cantidades más elevadas, o en determinadas combinaciones químicas (30).

Los electrodos de las baterías son altamente corrosivos, la corrosión es el deterioro de los metales por un proceso electroquímico, dando como resultado la formación de Óxido de Hierro (Fe(OH)₃, comúnmente conocido como herrumbre. Este proceso se debe al ataque de un material por el medio que le rodea con la consiguiente pérdida de masa y deterioro de sus propiedades ocasionando así el derrame de los materiales contenidos dentro de la batería (31), de esta manera los metales pesados son liberados al ambiente.

Una pila puede tardar siglos en descomponerse, sin embargo los metales pesados que contiene nunca se degradan (30). Cuando las baterías entran en contacto con la humedad, agua, calor u otras sustancias químicas, sus componentes tóxicos tienden a derramarse, contaminando suelo y agua que posteriormente, alcanza la cadena alimenticia por medio de la irrigación agrícola o por consumo directo (4).

Los metales pesados pueden ser bioacumulados y causar daños irreversibles a la salud y al ambiente. Cuando un elemento potencialmente tóxico es absorbido por el organismo humano en grandes concentraciones, puede causar daños a su estructura penetrando en las células y alterando su funcionamiento, al causar inhibición de las actividades enzimáticas ocasionando así, los efectos a la salud mencionados en el Cuadro 2 (4).

La toxicidad de un metal, así como su disponibilidad, está relacionada con factores como: fórmula química del metal en el ambiente, capacidad de biotransformación en subproductos más o menos tóxicos, vías de introducción en el organismo (inhalar, oral y dérmica), la emisión al ambiente, hasta la aparición de los síntomas de la intoxicación (32) (4).

2.5 Gerenciamiento de baterías

Según la jerarquía de residuos sólidos (3), se debe priorizar el reciclaje de residuos, implementando el tratamiento y la disposición final solo en los casos que no se cuente con tecnología para reciclaje (33) (3). Se mencionan los métodos de reciclaje y disposición final existentes en gestión de pilas y baterías de desecho.

2.5.1 Reciclaje

La tecnología para reciclaje de residuos de las baterías como lo son el cadmio, mercurio y plomo es cara y reciente, por lo que son poco conocidas actualmente (4). Estos métodos son basados en técnicas metalúrgicas, pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas para la recuperación de los metales que componen la baterías (15). Estos procesos requieren una etapa previa de separación de baterías por tipo, dado que no existen métodos universales de reciclaje para todas las baterías (16).

2.5.1.1 Mineralurgia

En este método las pilas y baterías son molidas, el hierro de la carcasa es retirado por medio de separación magnética. En ese proceso ocurre la concentración de la fracción de hierro metálico que después será conducido a un proceso de reciclaje hidrometalúrgico o pirometalúrgico (34).

2.5.1.2 Pirometalurgia

El proceso pirometalúrgico es realizado a altas temperaturas (900° C), en hornos cerrados, imposibilitando el riesgo de contaminación al ambiente (4). Este proceso involucra la transformación y separación de los componentes a partir de tratamiento térmico del residuo en medio reductor (combustión con coque) y separación de metales volátiles (16). En esta técnica, básicamente se obtienen las placas de níquel que se usan en la producción de acero;

por otro lado se separa el plástico y el electrodo restante de cadmio que se somete a un proceso térmico a 900 °C, donde se produce la evaporación de Cd, es recuperado posteriormente por condensación. Como residuo se obtiene hierro y níquel, que son enviados a la industria del acero para la fabricación del mismo (15) (35).

2.5.1.3 Hidrometalurgia

La ruta de la hidrometalurgia utiliza agua y algunos componentes químicos para una lixiviación ácida o básica para solubilizar los metales como plomo, cadmio y mercurio presentes en la pila y en la chatarra de las baterías, seguidamente los metales son recuperados de la solución a través de diferentes procesos como precipitación, electrolisis y extracción líquido-líquido para su posterior uso en la industria metalúrgica (34), (4) (15).

Este proceso presenta ventajas como ausencia de emisiones de difícil control, pureza de metales, costes de implantación, explotación y consumo energético menores que los sistemas pirometalúrgicos y recuperación de los metales que contienen las pilas (15). Las etapas principales de este proceso se describen a continuación:

Trituración de baterías

Primeramente es necesaria una etapa de molienda, donde se triture la masa de baterías. En esta etapa las baterías pasan por una trituradora de cuchillas para obtener el material cortado, el objetivo de esta etapa es evitar el trabajo manual de abrir las baterías solamente, no convertirlas en polvo, así lo más conveniente es que las partes metálicas queden de aproximadamente 2 cm² de superficie (36).

Separación metálica de metales férricos

En esta etapa se separan las partes ferromagnéticas con la ayuda de imanes. El imán más apropiado es contra flujo (cross belt), por ser diseñados específicamente para opciones de reciclaje, ya que remueve todos los materiales férricos de la mezcla con otros reciclables (36).

Las partes metálicas aquí separadas podrán ser enviadas a reciclaje, para eso debe realizarse un lavado con agua para garantizar que estos metales no estén contaminados con metales pesados.

Separación de plásticos

En esta etapa se separan los plásticos por medio de flotación. Se coloca el material triturado en agua, sin la materia férrica que fue previamente separada, los componentes de densidades más bajas es decir los plásticos, subirán a la superficie donde serán separados, dejando los electrodos en solución (36). Los plásticos separados, pueden ser enviados a reciclaje para lo cual deben ser debidamente lavados para eliminar la contaminación con metales pesados.

Lixiviación ácida

Con la disolución de las etapas anteriores, se tiene el zinc, carbono y dióxido de manganeso disueltos en agua, listos para el tratamiento químico. Este tratamiento se realiza en un reactor agregando ácido sulfúrico (H_2SO_4) 1:50 ácido: agua, la mezcla se deja en reposo por dos horas, con agitaciones cada 30 minutos para facilitar disolución del zinc en el ácido sulfúrico. Se coloca calor a la mezcla a una temperatura de $90^\circ C$ para evitar la ebullición del material, por un periodo de 30 minutos (23). La mezcla se deja en reposo hasta alcanzar la temperatura ambiente y después es filtrada.

Cristalización

La fase líquida obtenida es reducida a su cuarta parte, aplicando calor a $80^\circ C$, después de eso es dejada en reposo para la formación de cristales, donde va a ser posible obtener $ZnSO_4$ (23).

Solidificación

El residuo de MnO_2 se encuentra en la fase sólida resultante de la filtración, éste puede ser inertilizado mediante el proceso de solidificación por vitrificación. Se obtiene como resultado un agregado leve (material expandido o espuma de vidrio) que puede ser

empleado en concretos donde tiene características como aislante acústico y poco peso, que pueden ser ventajosas (23).

2.5.1.4 Importancia del reciclaje de baterías

Al reciclar baterías, éstas dejan de ser enterradas y de ocupar un espacio que puede ser mejor aprovechado. Además de eso, las sustancias de valor económico son aprovechadas (15), cumpliendo así, con el principio de protección ambiental del desarrollo sostenible (37).

Las etapas para el reciclaje de baterías se muestran en la Figura 4, donde el primer paso para la implantación de ese proceso es el establecimiento de un programa de colecta selectiva de las baterías, en conjunto con la proporción de información al consumidor final (38).

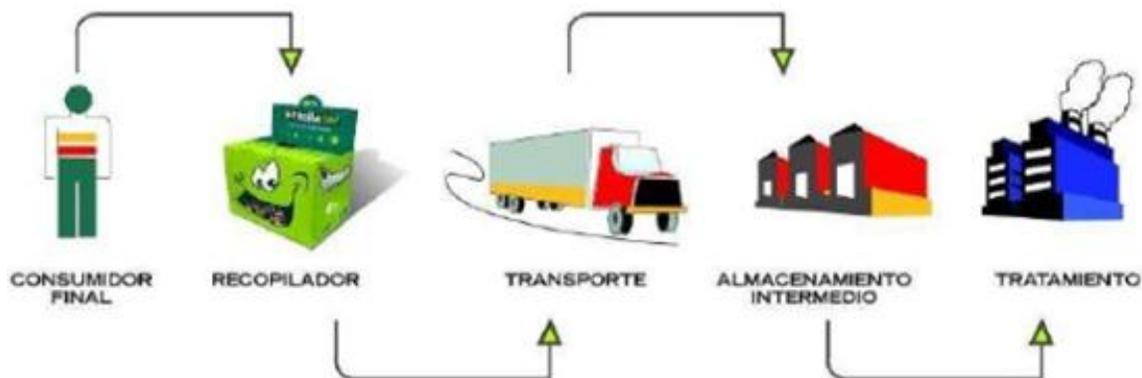


Figura 4. Etapas de los programas de reciclaje de baterías.
Fuente: Schuler *et al.*, 2009.

2.5.2 Tratamiento

Debido a los altos costos económicos de los procesos mencionados, los métodos más usados para el tratamiento de baterías de desecho, son métodos cuyo objetivo principal es asegurar el residuo de manera que no afecte a la salud pública, ni al ambiente. Las prácticas de tratamiento y disposición final son incineración, solidificación y disposición en rellenos (15).

2.5.2.1 Incineración

Según la NBR 11175 la incineración de residuos peligrosos es el proceso de oxidación a altas temperaturas que destruye o reduce el volumen o recupera metales o sustancias (39).

El tiempo mínimo de residencia de los sólidos debe ser de 30 minutos en horno rotativo y de 60 minutos en incinerador de cámara fija, la temperatura de combustión de la primera cámara debe ser de 1000° C y la temperatura mínima de quema de los gases en la salida de la post combustión debe ser de 1200° C (39).

Si este proceso tuviera como único objetivo la destrucción térmica de este desecho, no se solucionaría el problema, puesto que los metales pesados permanecen en las cenizas y se tendría un nuevo residuo al cual dar estabilización (16), además, parte de ellos puede volatilizar contaminando la atmósfera (6).

2.5.2.2 Estabilización/Solidificación (E/S)

Cuando la tecnología para el reciclado de componentes de las baterías no está disponible o involucra costos muy altos, se utilizan procesos físico-químicos para disminuir significativamente la movilidad de los metales pesados. Este tipo de técnicas consiste en la estabilización por agregado de agentes químicos que forman compuestos insolubles con los metales, el encapsulamiento con cemento es un ejemplo de solidificación de residuos peligrosos (16).

Ortiz en el año 2009 realizó una propuesta de macro encapsulación de baterías en Perú, dicha técnica está basada en la conformación bloques de concreto con aditivo impermeabilizante (Figura 5), el que en su interior contiene una celda cúbica con 1,7 kg de residuo de baterías de desecho(16). Los bloques de material encapsulado pueden ser usados en lugar de los molones o basílicas para muros de contención dentro del relleno (33). En el Anexo 1 se detalla la conformación de estos bloques.



Figura 5. Técnica de macro encapsulación de pilas en bloques de cemento.

Fuente: Ortiz, 2009.

2.5.2.3 Disposición en rellenos

La disposición de baterías en rellenos, solamente es permitida si se trata de rellenos de seguridad específicos para residuos peligrosos (39). Las baterías contienen metales pesados no biodegradables, que afectarían la calidad de los efluentes proveniente de la degradación de los desechos orgánicos en los rellenos, matando los microorganismos que son responsables por el tratamiento biológico en el proceso de tratamiento de los lixiviados (6).

2.6 Procesos de separación de sólidos

Como fue mencionado en la sección 2.5.1, para el reciclaje de baterías, es necesaria una previa separación por tipos (16). Los métodos de separación pueden ser manuales, mecánicos o automáticos. En el caso de los residuos industriales, el método manual puede dejar de ser eficiente por tratarse de grandes cantidades. Los posibles métodos mecánicos de separación de mezclas metálicas son el tamizado, la imantación, la gravimetría y la sedimentación.

2.6.1 Tamizado

El tamizado es un método físico para separar mezclas de sólidos, es un proceso de separación de sólidos en función del tamaño de las partículas. Consiste en hacer pasar una mezcla de partículas sólidas de diferentes tamaños por un tamiz o colador. Las partículas de menor tamaño pasan por los poros del tamiz (cernido) atravesándolo y las grandes quedan retenidas por el mismo (rechazo) (40).

La eficiencia del tamizado se calcula desde el punto de vista del cernido, como del punto de vista del rechazo (40), de la siguiente forma:

Índice de cernido

$$I_c = \frac{C}{A} \times 100$$

Índice de Rechazo

$$I_r = \frac{R}{A} \times 100$$

Así,

$$I_c + I_r = 100$$

Donde:

A: masa de material procesado (Alimentación)

C: masa del cernido

R: masa del rechazo

Recuperación desde el punto de vista del Rechazo,

$$E_R = \frac{F_R}{F_A} \times 100$$

Recuperación desde el punto de vista del Cernido,

$$E_C = \frac{F_C}{F_A} \times 100$$

Donde:

E_R: Eficiencia del Rechazo

F_R: Porción de cada Clase en el Rechazo

F_A: Porción de cada Clase en la Alimentación total

E_C: Eficiencia del Cernido

F_C: Porción de cada Clase en el Cernido

2.6.2 Imantación

Este método se basa en las propiedades magnéticas de algunos materiales. Se emplea para separar mezclas en donde uno de sus componentes es magnético. Los materiales que tienen propiedades electromagnéticas conocidas son el hierro, cobalto y sus aleaciones comúnmente se llaman imanes (41). Los imanes atraen los metales féreos como se muestra en la Figura 6, es decir, aquellos que tienen como elemento base el hierro (42).



Figura 6. Método de imantación.
Fuente: Marín, Isasi Josefa, 2010.

2.6.3 Sedimentación

Es un método de separación por densidades, se utiliza una corriente de agua que arrastra los materiales que son más livianos, a través de una mayor distancia, pero aquellos que resulten más pesados se irán depositando; de esta manera es que se genera una separación de los componentes de acuerdo a lo pesado que dichos elementos sean. Este método utiliza el agua como un instrumento de separación de los sólidos, donde las partículas menos densas (más livianas) van a flotar y más densos (pesados) quedarán en el fondo del recipiente (40).

2.7 Legislación aplicable a baterías

Según la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (EPA), las baterías son consideradas desechos peligrosos, reglamentados por las normas para residuos universales (*Universal Waste*). Menciona las condiciones de almacenamiento y gestión de pequeñas y grandes cantidades de baterías (3).

La EPA determina límites máximos para las concentraciones de metales pesados para no causar trastornos a los seres vivos que se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Límites máximos de concentración permitida de metales pesados en agua.

Metal pesado	Límite máximo permisible
As	0.05 mg/l
Cd	10 µg/l
Cr	0.05 mg/l
Cu	1.0 µg/l
Hg	144 ng/l
Ni	632.0 µg/l
Pb	50.0 µg/l

Zn	5.0 µg/l
-----------	----------

Fuente: EPA, 2012.

El Procedimiento de Lixiviación para Caracterizar la Peligrosidad de un residuo (TCLP en inglés) es un ensayo normalizado adoptado por la EPA para caracterizar un residuo como peligroso, así como para evaluar la eficacia de un proceso de estabilización. El ensayo simula la acción de los ácidos orgánicos que deberían formarse por la descomposición de los residuos domésticos en un relleno sanitario (3).

El ensayo consiste en triturar el residuo o material estabilizado para obtener partículas inferiores a 9,5 mm. El material triturado se mezcla con el líquido de extracción de ácido acético a un pH de 4,5 con una relación de líquido-sólido 20:1, y se agita en un extractor rotativo durante 18-24 h a 30 rpm y 22° C. El extracto de la prueba de lixiviación se analiza en busca de constituyentes peligrosos (metales pesados en este caso) para identificar si superan los valores de la norma (3).

La EPA establece el siguiente orden de mayor a menor prioridad en la jerarquía de gestión de residuos (*Solid Waste Management Hierarchy*) (3):

1. Reducción en la fuente y reúso
2. Reciclaje y compostaje
3. Recuperación de energía
4. Tratamiento
5. Disposición final

2.7.1 Legislación brasileña referente a baterías

En Brasil la NBR 10 004 (10), clasifica los residuos como peligrosos (Clase 1) y no peligrosos (Clase 2): según esta norma, las pilas y baterías pueden ser clasificadas como residuos peligrosos por presentar riesgo a la salud pública, provocando mortalidad, incidencia de enfermedades o acentuando sus índices, riesgo al ambiente, si su manipulación fuera inadecuada.

Cualquier residuo que presente una o varias características de peligrosidad: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, patogenicidad o radiactividad es

considerado residuo peligroso y debe ser tratado o dispuesto de acuerdo a las condiciones especiales. Las baterías con código F042 son calificadas como residuo tóxico y corrosivo según la NBR 10 004 (10).

La Ley estadual de Santa Catarina no11 347 del 2000, las pilas y baterías, después de su utilización y/o agotamiento energético, deberán ser entregadas por los usuarios, a los establecimientos que las comercializan o red de asistencia técnica autorizada, para transferir a los fabricantes o importadores para que éstos adopten, directamente o por medio de terceros, los procedimientos de reutilización, reciclaje, tratamiento o disposición final ambientalmente adecuada (43).

La Resolución de CONAMA no 401 establece los límites máximos de algunos metales en baterías (Cuadro 4). Además se entiende que las pilas y baterías de tipo Zinc-Manganeso, Alcalino-Manganeso que esté bajo esos límites, podrán ser descartadas junto con los desechos domésticos y enviadas a los rellenos sanitarios, pues no son consideradas como residuos peligrosos (39).

Cuadro 4. Concentraciones máximas de metales pesados en baterías según la Resolución de CONAMA no 401.

Formato	Límite máximo permitido
Zn- C y Alcalina Formato: Botón	0,0005% en peso de Hg
	0,002% en peso de Cd
Zn- C y Alcalina Formato: Cilíndrica o cuadrada	2,0% en peso de Hg
	0,1% en peso de Pb
Plomo ácido	0,005% en peso de Hg
	0,010% en peso de Cd

Fuente: CONAMA 401, 2008.

La ABNT 12 235 fija las condiciones obligatorias para el almacenamiento de los residuos sólidos peligrosos de forma a proteger la salud pública y el medio ambiente, en la cual menciona que estos residuos deben ser almacenados en contenedores, deben mantenerse tapados en todo momento y éstos a su vez estar en condiciones de limpieza que garantice evitar la reacción de los componentes del recipiente con el residuo (11). Se aplica al almacenamiento de todos los residuos Clase 1 definidos según la NBR 10004.

La ley no 12 305 establece la Política Nacional de Residuos Sólidos, donde las pilas y baterías son objeto de Logística Reversa Obligatoria (LRO), de manera que los expendedores de este producto, deben recibir del cliente una vez agotadas, para darles destino correcto (12).

La ley no 12 305 define la logística reversa como un instrumento de desarrollo económico y social caracterizado por un conjunto de acciones, procedimientos y medios destinados a viabilizar la colecta y la restitución de los residuos sólidos al sector empresarial, para reaprovechamiento, en su ciclo o en otros ciclos productivos, u otra destinación final ambientalmente adecuada (12).

La logística reversa abarca los flujos que se inician en los puntos de consumo de los productos y terminan en los puntos de origen. Tiene como finalidad el retorno del producto, envases o materiales a su fabricante para destinar para ser reprocesados, reciclados o destinados correctamente (44), agregando valor de diversas naturalezas a las empresas: económico, ecológico, legal, logístico, de imagen, corporativa, entre otros. (45).

La logística reversa representa una importante herramienta para el desarrollo sostenible de la industria, reduciendo costos en el proceso productivo y contribuyendo para la disminución en la extracción de materias primas y en el descarte inadecuado de productos que presentan elevado grado de toxicidad (44). La Figura 7 representa el proceso productivo (a) y la logística reversa (b) establecida en la ley 12 305.

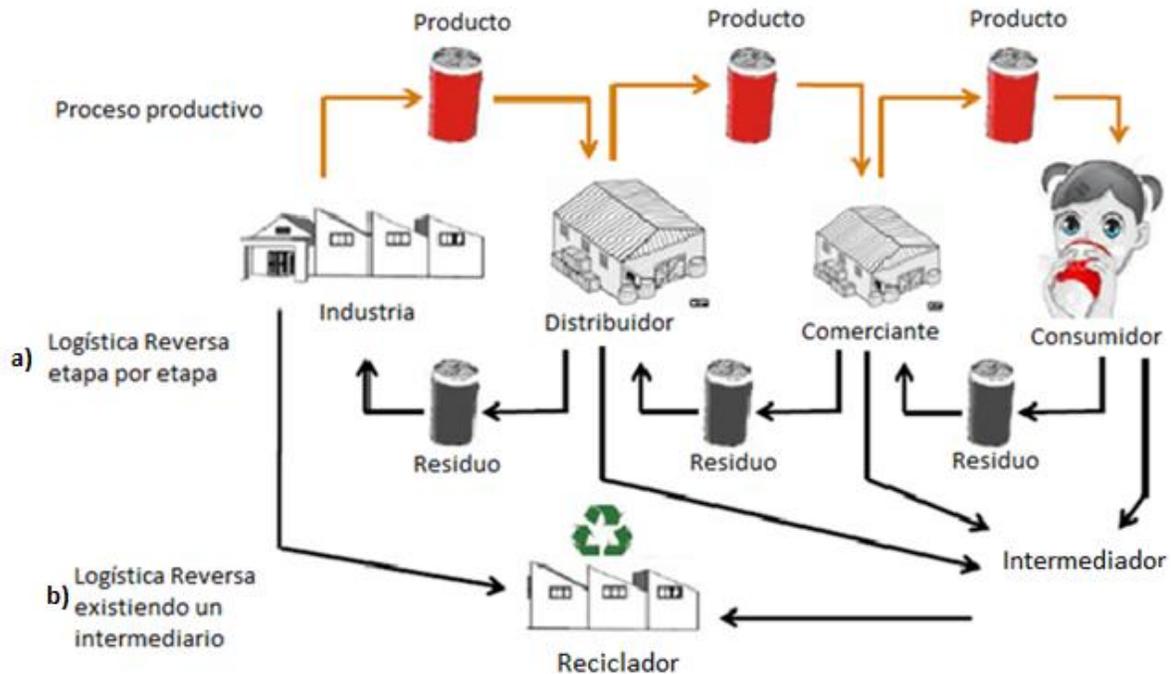


Figura 7. Logística Reversa post consumo.

Los órganos ambientales locales tanto la Fundação Municipal do Meio Ambiente - FAEMA como órgano del municipio de Blumenau, como Fundação Estadual do Meio Ambiente - FATMA, desconocen la existencia de programas de logística reversa tanto en el municipio, como en el estado de Santa Catarina.

La FAEMA comenta que es una herramienta deficiente, ya que para su adecuada implementación es necesario que sean tomadas medidas desde el inicio del proceso productivo por los grandes productores, de manera que aseguren la recuperación y reciclaje final las baterías una vez agotadas energéticamente (13).

Actualmente, la legislación brasileña establece que el consumidor final debe entregar las baterías de desecho en los puestos de venta, sin embargo, el consumidor no está informado al respecto. Por otra parte, la gran mayoría de los mercados incumplen consciente o inconscientemente con esa exigencia. Por otro lado los órganos ambientales no pueden exigir el cumplimiento de la LR, debido a la carencia de opciones de reciclaje existentes a nivel local.

2.7.2 Legislación costarricense referente a baterías

Según el Reglamento sobre el Manejo de Basuras de Costa Rica (Decreto Ejecutivo no. 19049-S de 20 de junio de 1989 y sus reformas), las baterías son consideradas residuos peligrosos debido a sus características de toxicidad y corrosividad (48).

En el Plan de Residuos Sólidos (PRESOL) se menciona que en Costa Rica el manejo y disposición adecuada de los residuos peligrosos, es un grave problema, ya que el transporte y manipulación de estos residuos habitualmente no se realiza correctamente y el país no cuenta con ninguna planta de tratamiento de residuos peligrosos (20).

Las baterías secas y húmedas se encuentran en el listado de residuos no legislados, junto con muchos otros residuos peligrosos, de ahí que actualmente no están siendo tratados y además son mezclados con los residuos domiciliarios con el consecuente potencial de contaminación e impacto en la salud humana al terminar, en muchos casos en botaderos a cielo abierto o directamente en ríos o quebradas (20).

En la actualidad no se dispone en el país de ninguna celda especial para la disposición final de estos residuos. Por lo que es necesaria la construcción de rellenos para tal fin que cumplan con las características técnicas suficientes para considerarse una adecuada disposición final de residuos peligrosos (20).

En relación al transporte de residuos peligrosos, Costa Rica cuenta con legislación aplicable a nivel nacional y a nivel internacional (Convenio de Basilea). No obstante, no se asegura el transporte seguro de este tipo de residuos debido a la ausencia de fiscalización. En el convenio de Basilea de transporte internacional de desechos tóxicos, es posible separar y enviar al país de origen del fabricante, las pilas como componentes peligrosos que son (49).

El Reglamento de Rellenos Sanitarios ubica a las baterías como residuos especiales por ser considerados desechos Domésticos Peligrosos, los cuales podrán ser dispuestos en el relleno sanitario, con previo tratamiento o neutralización que los haga asimilables a desechos ordinarios o inocuos, en las celdas para desechos ordinarios y prohíbe la disposición de desechos especiales potencialmente incompatibles en una misma celda o frente de trabajo (19).

Según el Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos Electrónicos no. 35933-S, las baterías de computadoras portátiles, de teléfonos celulares y unidades de suministro ininterrumpido de energía (UPS) son enlistadas como residuos electrónicos (19).

Se define Residuos electrónicos como aquellos residuos que se derivan de aparatos electrónicos tanto de uso doméstico como comercial. Se consideran parte de estos residuos los componentes, subconjuntos y consumibles que forman parte del producto (55).

Se crea el Sistema Nacional para la Gestión de Residuos Electrónicos (SINAGIRE) como mecanismo por el cual se impulsa la gestión integral de los residuos electrónicos, mediante la interacción de los diferentes actores públicos y privados que intervienen, cuyo fin es definir el marco de acción para una efectiva y eficiente gestión integral de los residuos electrónicos asegurando la protección de la salud de la población y del ambiente (55).

El reglamento N° 35933-S establece que estos residuos deben ser separados de la corriente de residuos ordinarios, los productores deberán informar a los consumidores finales sobre los procesos de gestión integral de residuos electrónicos y acerca de los sitios de recolección autorizados, así como los consumidores finales son responsables de entregar los residuos electrónicos en los puntos de recolección autorizados (55).

Por otra parte el Reglamento sobre las características y el listado de los desechos peligrosos industriales, ubica los residuos de baterías del Cuadro 5 como desechos generados por fuentes específicas (18).

Cuadro 5. Residuos de baterías generados por construcción de aparatos y suministros eléctricos (fuente generadora código 839).

Código	Tipo de residuo
P107	Lodos de tratamiento de aguas residuales en la producción de baterías de níquel-cadmio.
S242	Producción de desechos de las baterías de níquel-cadmio
S243	Producción de desechos de las baterías zinc-carbono
S244	Producción de desechos de baterías alcalinas
S245	Baterías de desechos y residuos de los hornos de la producción de baterías de mercurio
S246	Baterías de desecho de la producción de baterías de plomo ácido

S159	Acumuladores de plomo
S201	Acumuladores de níquel-cadmio
L043	Ácidos de acumuladores
S202	Baterías de mercurio

Fuente: Reglamento sobre las características y el listado de los desechos peligrosos industriales, 1998.

Según el Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos Industriales no 27001-MINAE, algunos componentes de las baterías se encuentran enlistados en los diferentes grupos de Desechos Peligrosos Industriales:

- Grupo 1. Fluidos Alcalinos corrosivos de baterías
- Grupo 2. Acido de baterías
- Grupo 3. Metales como Al, Li, Zn
- Grupo 5. Litio e hidruro metálico

2.8 Situación del gerenciamiento de baterías en Brasil

Brasil ha tenido éxito en la práctica de la logística reversa de ciertos residuos como por ejemplo de embalajes de agro tóxicos. En este caso la logística reversa se fundamenta en registrar con el número de identidad a la persona que efectúa la compra, quien posteriormente deberá entregar dicho embalaje para realizar una nueva compra (13).

En cuanto a pilas y baterías la Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS en portugués) establece que las pilas y baterías son objeto de logística reversa obligatoria, sin embargo ésta es una herramienta poco implementada. Existen programas de logística reversa de baterías portátiles, algunos de esos programas son “*Papa Pilhas*” en el estado de Goiás, “*ABINEE recolhe pilhas*” en São Paulo y el programa “*Ciclo Sustentável Philips*”, sin embargo esos programas aceptan solamente baterías de uso doméstico, por lo que las cantidades industriales que ingresan en la CTRB continúan siendo un residuo de difícil gerenciamiento (13).

Suzaquim, empresa ubicada en el estado de São Paulo, es la única empresa licenciada para reciclaje de baterías en Brasil. En esta empresa las pilas y baterías son reprocesadas para obtener sales y óxidos metálicos que posteriormente, son utilizados en las industrias de coloración cerámica, vidrios, tintas e industrias en general (46).

En el 2012 el costo del reciclaje para una tonelada de baterías era de R\$990, lo que equivale a \$481, sin incluir tasas de transporte (46). Además de los gastos de reciclaje, el transporte de baterías es problemático, al tratarse un residuo peligroso, es muy pesado, encarece los costos para la empresa Momento Engenharia Ambiental, sobre todo considerando que Suzaquim está localizada a 6521 km de distancia de Blumenau.

2.8.3 Tratamiento de baterías en la empresa MEA

La empresa MEA, se dedica desde el año 1999 a dar tratamiento y disposición a los residuos del sector industrial de la región de Blumenau. Es una empresa pionera en Santa Catarina como una central de tratamiento de residuos, como también por su capacidad de implementar nuevas y avanzadas tecnologías para el tratamiento de los residuos sólidos industriales.

En la MEA son tratados tanto los residuos peligrosos (Clase 1), como los no peligrosos (Clase 2). Existen residuos sólidos Clase I como: baterías, sustancias químicas específicas, cristalería de laboratorio y medicamentos vencidos (47), que requieren de una forma especial de tratamiento por tener sustancias que pueden presentar incompatibilidad al ser mezclados con otros residuos, en la MEA estos residuos son encapsulados.

El proceso de encapsulación consiste en almacenar los residuos dentro de contenedores de plástico de 200 L, llenando los últimos 10 cm del estañón con una capa de concreto. Esos estañones (Figura 8) con el materia encapsulado son depositados en la Célula 1B (Figura 9).



Figura 8. Residuos encapsulados en la Célula 1B de la CTRB.

La Célula 1B es una excavación del relleno industrial, está impermeabilizada con plástico PEAD de espesor de 2 mm y bajo techo donde son colocados los residuos encapsulados. El volumen total de la célula es de casi 2475 m³ y de 225 m², fue construida en el año 1999 cuando la empresa fue fundada. La cantidad de material encapsulado actualmente es variable, aproximadamente una tonelada por mes (47).

La vida útil de la Célula 1B es de 13 años, se estima que a finales de diciembre de 2012 estará llegando a su capacidad límite, después de haber cumplido su función será construida otra célula con las mismas dimensiones de 1B, para continuar la disposición de los residuos encapsulados, además deberán efectuarse obras y mantenimiento post cierre, durante por lo menos los próximos 30 años (47).



Figura 9. Célula 1B de la CTRB.

Es de interés de la MEA mejorar el gerenciamiento de las pilas y baterías que ingresan a la CTRB provenientes del sector industrial, cambiando la técnica de macro encapsulamiento por programas de logística reversa, donde las mismas puedan ser recicladas.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, las opciones de reciclaje son escasas y muy distantes. Por otro lado, la MEA cuenta con recursos y estructura necesarios para realizar reciclaje de baterías dentro de la CTRB. Así la empresa MEA pasaría a ser parte activa de la logística reversa, como intermediador y/o reciclador final según se muestra en la Figura 8.

2.9 Situación del gerenciamiento de baterías en Costa Rica

Para el año 2013, se distinguen en la parte de gestión de residuos electrónicos la empresa SOLIRSA S.A. localizada en la Uruca y el CTTM operado y administrado por el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Además, en el ITCR se ha venido realizando investigación en manejo, gestión y tratamiento de residuos peligrosos (50) (51) (52) (53) (54).

Según el Reporte de Materiales del 2006, con respecto a baterías secas fue estimado un consumo de 1,7 kg por persona al año, y una cantidad similar de baterías secas usadas (alrededor de 6 800 toneladas al año). Para este residuo no hay tratamiento ni disposición final adecuada (20).

Actualmente en Costa Rica no existe ninguna empresa pública o privada que realice reciclaje de baterías secas. Tampoco se detecta que quienes venden pilas de Ni-Cd para teléfonos inalámbricos, de herramientas y de otros artículos recargables reciban las de desecho (20).

La única empresa conocida en la labor de gerenciamiento de baterías portátiles es Servicios Ecológicos, la cual brinda servicios de recolección, manejo y disposición final adecuada de desechos reciclables, a partir del 2009. Esta empresa exporta el material a los Estados Unidos, donde AERC Recycling Solutions se encarga de reciclar y disponer adecuadamente dichos desechos. El proceso final consiste en triturar las baterías y separar el material ya triturado en cada uno de sus componentes para su reciclado: metales ferrosos, no ferrosos y metales pesados (56).

Para el año 2012 la Soluciones Ecológicas cobraba por el tratamiento de desechos de pilas \$4.00 por kilo para las pilas cilíndricas (\$4000 por tonelada) y \$15.00 por kilo para pilas de botón, dicho costo debe ser cubierto por el generador del mismo.

La cantidad de baterías de Costa Rica recicladas por esta vía es de 80 toneladas anuales (20) que son enviadas a la empresa AERC Recycling Solutions en los Estados Unidos quien se encarga de reciclar y disponer adecuadamente dichos desechos. El proceso final consiste en triturar las baterías y separar el material ya triturado en cada uno de sus componentes para reciclado: metales ferrosos, no ferrosos y metales pesados (56).

El PRESOL menciona que la solución es crear un relleno de seguridad o celdas de seguridad en los “rellenos sanitarios” de mayor tamaño mientras no se tenga una mejor opción para disponer las baterías. Este tipo de rellenos son de alto costo de construcción y mantenimiento, pues las celdas para la disposición final tienen una base impermeabilizada, aisladas del suelo con geotextiles y otros materiales, pozos con controles de lixiviados y de

emanaciones (20), sin embargo esta opción aún no está en funcionamiento, pues las baterías son descartadas junto con los desechos domésticos.

En cuanto a las baterías húmedas en Costa Rica existe un sólido mercado de reuso de partes de automóviles que contienen baterías húmedas. A nivel nacional se conocen dos recuperadoras de plomo que se dedican a la recolección y reprocesamiento de las grandes baterías húmedas (automotoras), debido a que el plomo que contienen es de alto valor en el mercado.

Capítulo 3 – METODOLOGÍA

Para el desarrollo del estudio se contó con un galerón desocupado dentro del relleno industrial operado por la empresa Momento Ambiental en la ciudad de Blumenau de Brasil, además se tuvo a disposición el laboratorio de aguas, así como la maquinaria y herramientas de la CTRB.

En este capítulo se mencionan los diferentes métodos empleados para cumplir los objetivos propuestos, de manera que se clasifica en cuatro secciones a saber: determinación de composición de cargamentos en la CTRB, posibles vías de reciclaje para cada Clase de baterías, métodos de separación según las Clases y comparación de la situación brasileña con la costarricense en lo que a baterías secas portátiles se refiere.

3.1 Determinación de la composición de los cargamentos de baterías

Se inició por conocer los ingresos y las procedencias de los residuos registrados en MEA con código 520 con el nombre de “Pilhas e Baterias” desde el año 2006. Para eso se consultó el histórico de ingresos, así como de los clientes actuales que tienen contrato con la empresa MEA para tratar este residuo.

Además, fueron monitoreados los ingresos de cargamentos de ingreso en la CTRB, esto con el fin de conocer el estado y el acondicionamiento de las baterías recibidas en la empresa.

3.1.1 Organización inicial

Las baterías almacenadas estaban acondicionadas en 25 contenedores de 150 y 200 L de PEAD, en el galpón de residuos incompatibles y fueron transportadas con un montacargas a un lugar adecuado en otro galpón que se encontraba desocupado en la CTRB. Los contenedores fueron organizados en grupos de 4 sobre plataformas para facilitar su movilización según se muestra en la Figura 10 y 11.



Figura 10. Transporte de baterías almacenadas.



Figura 11. Organización de las baterías almacenadas en la CTRB.

Algunos contenedores tenían tipos específicos de baterías, de manera que se identificaron de la siguiente manera:

- Pila mixta: aquellos que contenían pilas y baterías de todo tipo mezcladas.
- Baterías de Ni-Cd y Ni-MH: Aquellos que contenían baterías de teléfonos inalámbricos.
- Li-ión de computador: Solamente baterías provenientes de computadoras portátiles.
- Li-ión de celular: Para los casos que el contenido era únicamente de baterías de celular.

3.1.2 Muestreo del sistema

Cada estación fue pesado en una báscula industrial de plataforma para trabajo pesado de 2000 kg de capacidad de lectura. Además fueron identificados con etiquetas desde B1 hasta

B25, con el número asignado, el contenido y la capacidad teórica de cada una. Se empleó la siguiente metodología de muestreo (Figura 12):

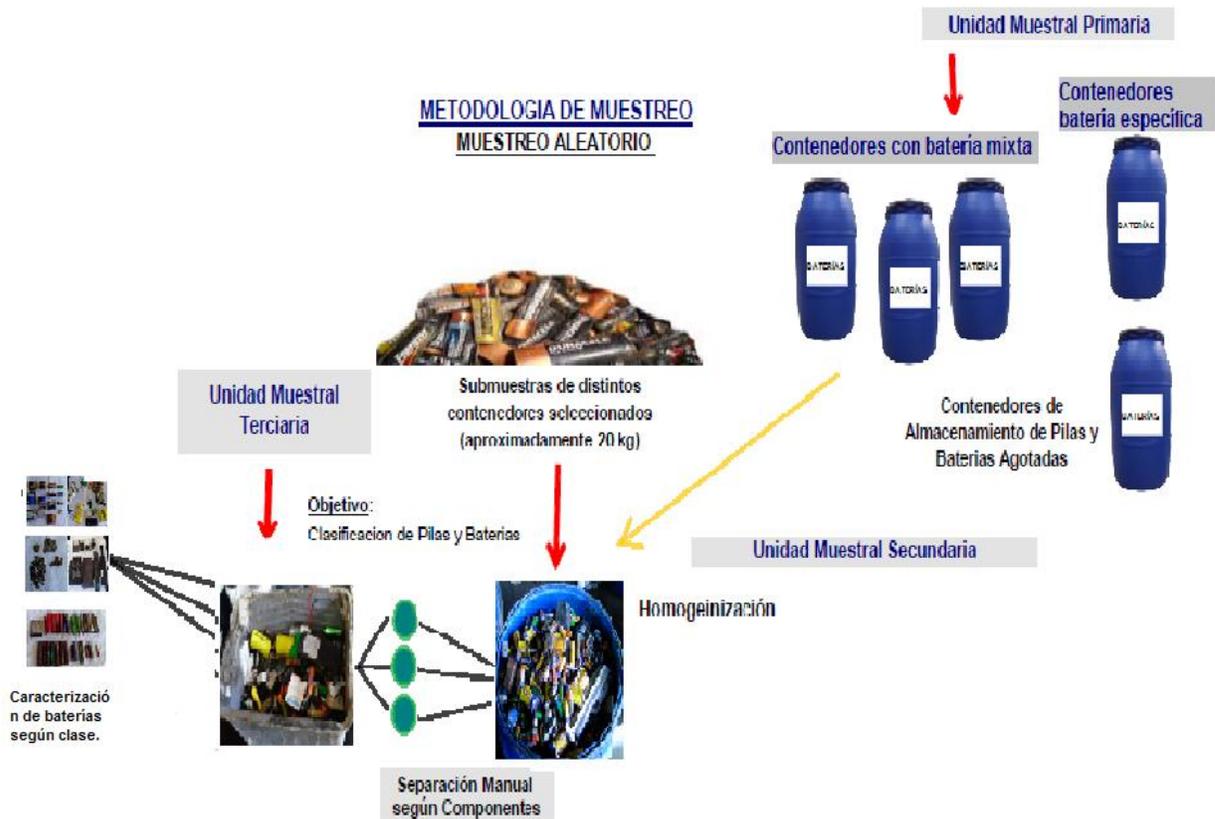


Figura 12. Metodología de muestreo para conocer las baterías de los ingresos.

Se recolectó una muestra compuesta de 20 Kg en un balde, extrayendo un kilogramo de cada estación identificado como Pila Mixta para determinar los tipos de baterías existentes dentro de esa mezcla, y posteriormente, la composición de las baterías almacenadas en la CTRB.

3.1.3 Clasificación práctica

Se realizó una clasificación práctica de la muestra seleccionada, la separación fue realizada manualmente (Figura 13), observando la lectura de las baterías, dicha separación se basó en la clasificación recomendada por la EPBA (15) conforme es sugerido en la Sección 2.3.5, de la siguiente manera:

Clase 1. Baterías comunes primarias: en esta clasificación se incluyen la totalidad de las baterías primarias, todas las que sean del tipo (Zn-C), *heavy duty/ long life* (Cl-Zn), Alcalinas / Alcalino Manganeseo (Mn).

Clase 2. Recargables de níquel: En esta clasificación se colocaron las de tipo Ni-Cd y Ni-MH en todas sus presentaciones.

Clase 3. Pilas botón: se incluyen todos los tipos de baterías en formato botón, las de Óxido de plata - Zinc ($\text{Ag}_2\text{O-Zn}$), las de Oxido de Zinc- Aire (Zn-Aire) y las de Óxido de Mercurio - Zinc (HgO-Zn).

Clase 4. Baterías litio: incluye la totalidad de las baterías de computadoras portátiles y la mayor parte de las baterías de celular. Además se incluyen las pilas primarias de Litio (Li), ya que existen y no se deben mezclar con las otras debido a que el litio es muy reactivo (7).

Clase 5. Baterías de plomo-ácido: Esta clasificación es específica para baterías automotoras recargables y en caso de aparecer pilas primarias.

Clase 6. No identificadas: Aquellas pilas y baterías que no es posible identificar, por diferentes razones, sea porque están oxidadas, porque la lectura está en algún idioma oriental o la lectura está ausente.



Figura 13. Separación manual de baterías según

3.2 Método más adecuado para tratar y reciclar cada tipo de baterías

Se procedió a realizar una búsqueda de información de las técnicas de reciclaje de baterías según las Clases establecidas, para eso se consultaron libros y estudios existentes en la biblioteca de la Universidad Regional de Blumenau – FURB. Por otra parte se realizó una búsqueda detallada en internet haciendo uso de diferentes herramientas como Google Académico, Scopus y Scielo, para filtrar la información, buscando por las siguientes palabras claves: battery recycling, batteries and cells, primary cells, secondary cells.

En el caso de las baterías no reciclables, fue seguido el principio de encapsulamiento de baterías en bloques de concreto propuesto por Ortiz, 2009 (16), con la variante que el largo fue duplicado para cumplir con el estándar dos bloques utilizados en la empresa. Se elaboraron dos moldes de madera con dimensiones de 20x40x20 cm, además se conformaron estructuras armadas de varilla de hierro de 10x20x10 cm reforzada con varilla como división en el medio de la estructura para dar resistencia a los bloques y cumplir con lo recomendado por Ortiz como si fueran dos bloques unidos.

Se realizó la mezcla en una proporción 1:1,5:2,5 de cemento, arena, agua, con uso de una mezcladora fue agitado para obtener una mezcla homogénea. En el proceso de agitación, se le agregó aditivo Sika como impermeabilizante.

Se procedió a colocar cinco centímetros de la mezcla preparada, luego fueron colocados los dos grupos de 1,7 Kg de baterías en cada bloque y fueron completados con la mezcla.

Posteriormente se dejaron en reposo durante 24 horas y fueron curados en agua.

3.3 Separación mecánica de los diferentes tipos de baterías

De la muestra de 20 Kg, fue separada una submuestra de baterías para realizar los ensayos de separación mencionados en la Sección 2.8, dicha porción correspondía a 6347,73 g (Figura 14), esta vez intentando incluir en ese balde la mayor variedad de baterías posible existente en la muestra.



Figura 14. Muestra secundaria seleccionada.
Fuente: La autora, 2012.

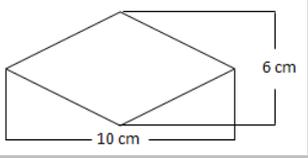
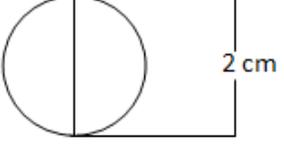
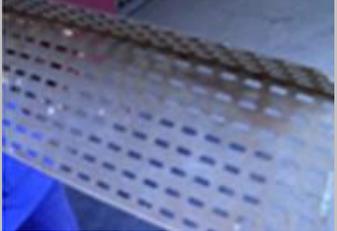
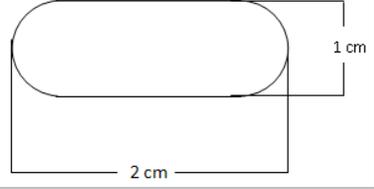
Esos 6347,73 g también fueron separados manualmente según las seis Clases establecidas inicialmente, además se observaron y contabilizaron los diferentes formatos encontrados.

3.3.1 Método de tamizado

Se consiguieron tres láminas metálicas con orificios de diferentes tamaños y formas, que fueron empleadas como tamices, se hizo pasar la muestra de 6424,37 g por los tamices en el orden desde A hasta C, esto con el fin de saber cuáles tipos de baterías podrían ser filtrados con cada uno de los tamices.

La porción de la muestra fue pasada primero por el tamiz A, el Cernido 1 fue pasado por la por el tamiz B, finalmente, el Cernido 2 resultante fue pasado por el tamiz C. Las dimensiones y características de las láminas se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Tamices empleados en el método tamizado.

Tamiz	Dimensiones (cm)	Formato	Dimensiones del orificio
A	61 x 48		
B	58 x 60		
C	53 x 20		

3.3.2 Método de gravimetría

Este método fue empleado para pilas con el mismo tamaño y forma, para identificar si existe diferencia significativa entre sus pesos. Las pilas que presentan mismo formato en varias Clases, son las AA.

Se utilizó una balanza granataria electrónica modelo ARD 110 marca *Adventures OHAUS*, un total de 15 baterías con formato AA existentes en la muestra de 6 424,37 g, este formato existe en 3 de las 6 Clases establecidas en la Clase 1, 2 y 6 por lo que fueron pesadas cinco de cada una de esas Clases. Con el fin de determinar si existe una diferencia significativa entre las masas de las pilas de las diferentes Clases, de manera que permita una separación por diferencia de pesos.

3.3.3 Método de imantación

Este método fue empleado para pilas con el mismo tamaño y forma, para identificar si existe diferencia significativa en la fuerza electromagnética de los diferentes tipos. Por lo tanto, se trabajó nuevamente con las pilas de formato AA.

Las pilas con formato AA presentes en la muestra fueron sometidas a la fuerza de atracción de un imán redondo de 10 cm de diámetro y se midió la distancia máxima a la cual cada pila era atraída.

Se dibujó una línea en una hoja, en esa línea fue colocado el borde del imán, después se marcó el punto de distancia máxima a la cual cada una de las pilas fue atraída por el imán. Se hicieron 10 mediciones para 10 pilas diferentes.

3.3.4 Método de sedimentación

Este método fue empleado para pilas con diferente tamaño y forma, para identificar si existe diferencia significativa entre sus densidades que permita separar algún de los tipos por flotación.

Se tomó las pilas de diferentes formatos presentes en el último rechazo, debido a que ahí se encontraban las baterías más livianas de todos los tipos. Fueron colocadas en 280 g de pilas en 500 ml de agua destilada, en un beaker de 1 000 ml, la mezcla fue agitada con una espátula. Posteriormente se dejó en reposo por 30 minutos, esto con el fin de identificar si alguna de las baterías presentan una diferencia de densidades suficiente que le permita ser separada de las demás.

En este caso fueron colocadas en agua solamente aquellas pilas que estaban herméticamente cerradas y que sus componentes internos no iban a contaminar el agua empleada, ni reaccionar con los componentes de las otras pilas.

3.4 Investigación de la situación de tratamiento de baterías en Costa Rica

Se consultó la legislación de Costa Rica referente a residuos sólidos, así como otros documentos legales de importancia en el país en temática de residuos, a fin de enmarcar la situación de este tipo de desechos. Los documentos revisados se enlistan a continuación:

- Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos 2010-2021.
- Reglamento de Manejo de Basuras.
- Plan de Residuos Sólidos Costa Rica (PRESOL)
- Reporte de materiales 2006.
- El reglamento de rellenos sanitarios, el Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos Electrónicos N° 35933-S.
- El Reglamento sobre las Características y el Listado de los Desechos Peligrosos Industriales.
- Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos Industriales N°27001-MINAE.
- Convenio de Basilea

Por otro lado se realizó una búsqueda sobre empresas que se dediquen al tratamiento y disposición de baterías secas en Costa Rica, donde se encontró la empresa Servicios Ecológicos S.A ubicada en Ciudad Colón, la misma se encarga de la manipulación y la exportación de este residuo. Se realizó una consulta a Servicios Ecológicos con el propósito de conocer el proceso y cantidades que se trabajan.

A partir de eso se realizó un diagnóstico de la situación actual y cómo podría mejorar el gerenciamiento de baterías en Costa Rica.

Capítulo 4 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se destacan los resultados obtenidos conforme la metodología descrita en el capítulo 3. De esta forma se describe la composición de los cargamentos, las rutas de logística reciclaje y los métodos de separación para las pilas y baterías que se procesan en la CTRB.

4.1 Composición de los cargamentos de pilas y baterías

Al revisar el histórico de ingresos de baterías en la CTRB, se identificó que las cantidades son muy variables tanto en los últimos años (Figura 15), como en los ingresos mensuales del último año (Cuadro 7). En el año 2006 se recibieron 16,2 toneladas, la cantidad recuperada disminuyó en un 75% para el año 2007 y se mantuvo constante los siguientes dos años se mantuvo constante, para los años 2010 y 2011 las cantidades se incrementaron nuevamente para octubre del 2012 ya fueron superados los ingresos del año anterior, por lo que de manera general los residuos que llegan a la CTRB están aumentando y se espera que con la PNRS aumenten considerablemente en los próximos 30 años (47).

Cuadro 7. Ingresos mensuales (toneladas) de "pilhas e baterias" código 520 en la CTRB de los últimos siete años.

Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	Total
Año													
2006	0,08	11,8	0,29	0,08	0,00	1,7	0,38	0,11	0,56		0,57	0,59	16,2
2007	0,16	0,54	0,34	0,12	0,38	0,5	0,07	0,35	0,64	0,23	0,08	0,56	3,97
2008	0,05	0,00	0,41	0,04	1,25	0,06	0,07	0,3	0,38	0,02	0,35	0,43	3,36
2009	0,42	0,18	0,94	0,05	0,14	0,17	0,38	0,12	0,74	0,39	0,14	0,65	4,3
2010	0,04	0,52	2,75	0,13	0,43	0,22	0,53	0,34	2,63	0,44	3,14	0,94	12,1
2011	0,34	0,36	0,21	1,77	1,33	0,12	0,33	0,85	0,18	0,59	2,08	0,43	8,57
2012	0,66	0,64	0,35	0,55	0,94	0,27	3,89	1,46	0,99	0,02			9,75
Total	1,75	14,03	5,27	2,74	4,47	3,04	5,65	3,52	6,12	1,69	6,35	3,59	58,2

Fuente: Momento Engenharia Ambiental, 2012.

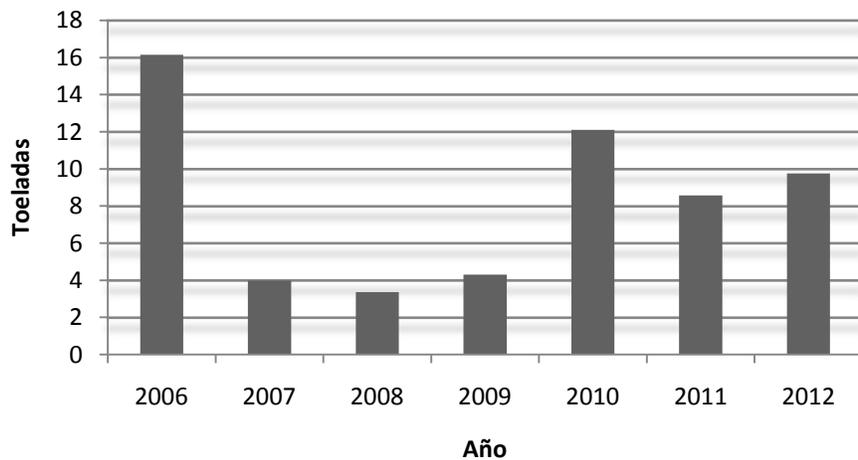


Figura 15. Ingresos de "pilhas e baterías " en la CTRB en los últimos años.
Fuente: Momento Engenharia Ambiental, 2012.

En el monitoreo de los cargamentos de ingresos de baterías a la CTRB, se determinó el ingreso de gran cantidad de baterías de diferentes tipos. Además se encontró que en muchos cargamentos el acondicionamiento no es seguro según lo establecido en la NBR 12235, estando depositados en sacos, bolsas plásticas, papel e incluso en contenedores con residuo de otros productos químicos que podrían reaccionar con los componentes de las baterías (Figura 16).



Figura 16. Acondicionamiento de los ingresos de pilas y baterías.

Las baterías de los 25 contenedores, cinco de ellos tenían tipos específicos de baterías, éstos deben mantenerse separadas y motivar a los clientes de la empresa a no mezclar las baterías en cuanto sea posible. Veinte de los contenedores almacenaban pilas y baterías de todos los tipos mezcladas (Pila Mixta) conforme se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Contenedores almacenados en la CTRB por un periodo de cinco meses.

Código	Volumen teórico (L)	Contenido	Masa (Kg)
B1	200	Pila mixta	290,4
B2	200	Pila mixta	328,6
B3	200	Pila mixta	317,0
B4	200	Pila mixta	297,8
B5	200	Pila mixta	288,8
B6	200	Pila mixta	216,0
B7	200	Pila mixta	210,2
B8	200	Pila mixta	277,6
B9	200	Pila mixta	306,8
B10	200	Pila mixta	178,8
B11	200	Pila mixta	175,2
B12	100	Pila mixta	173,6
B13	100	Pila mixta	131,0
B14	100	Pila mixta	162,4
B15	100	Pila mixta	176,2
B16	100	Pila mixta	176,0
B17	100	Pila mixta	145,2
B18	100	Pila mixta	145,0
B19	100	Pila mixta	132,2
B20	100	Pila mixta	157,2
Subtotal			4286,0
B21	200	Ni-Cd y Ni-MH	187,4
B22	200	Li-ión de computador	187,4
B23	200	Li-ión de computador	233,4
B24	200	Li-ión de computador	195,0
Subtotal			615,75
B25	50	Li-ión de celular	51,6
Total			5140,7

4.1.1 Baterías de los contenedores con Pila Mixta

Mediante una evaluación más detallada de la clasificación pila mixta de la Tabla 1 se determinó que la mayoría (70%) corresponden al tipo primarias de la Clase 1 de baterías

comunes (Tabla 2) según fue establecido en la sección 3.1.3. El tiempo de separación de la muestra de 20 Kg fue de dos horas, trabajando solamente una persona.

Tabla 2. Resultados de la clasificación de baterías de los contenedores calificados como Pila Mixta.

Clasificación	Clase	Masa (Kg)	%
Primarias	Clase 1. Baterías comunes primarias	14,4	71,95%
Secundarias	Clase 2. Recargables de níquel	2,805	14,02%
Secundarias	Clase 3. Pilas botón	0,076	0,38%
Secundarias	Clase 4. Baterías recargables de ión litio	2,238	11,19%
Secundarias	Clase 5. Baterías de plomo-ácido	0,000	0,00%
Secundarias	Clase 6. No identificadas	0,492	2,46%
Total		20,001	100,00%

4.1.2 Baterías almacenadas en la CTRB

Los 20 contenedores con Pila Mixta, correspondían al 84% del total de las baterías almacenadas en la CTRB. Considerando el contenido de los otros cinco estañones que almacenan un solo tipo de baterías, se determinó la composición total de las baterías almacenadas (Tabla 3). Se asume que esta composición es la composición total de las pilas y baterías procesados en la CTRB (Figura 18).

Tabla 3. Composición total de los ingresos del residuo industrial “Pilhas e baterias” en la CTRB, código 520.

Clase	Masa (Kg)
Clase 1. Baterías comunes	3083,78
Clase 2. Recargables de níquel	788,444
Clase 3. Pilas botón	16,231
Clase 4. Baterías recargables de ión litio	1146,938
Clase 5. Baterías de plomo-ácido	0,000
Clase 6. No identificadas	105,436
TOTAL	5140,829

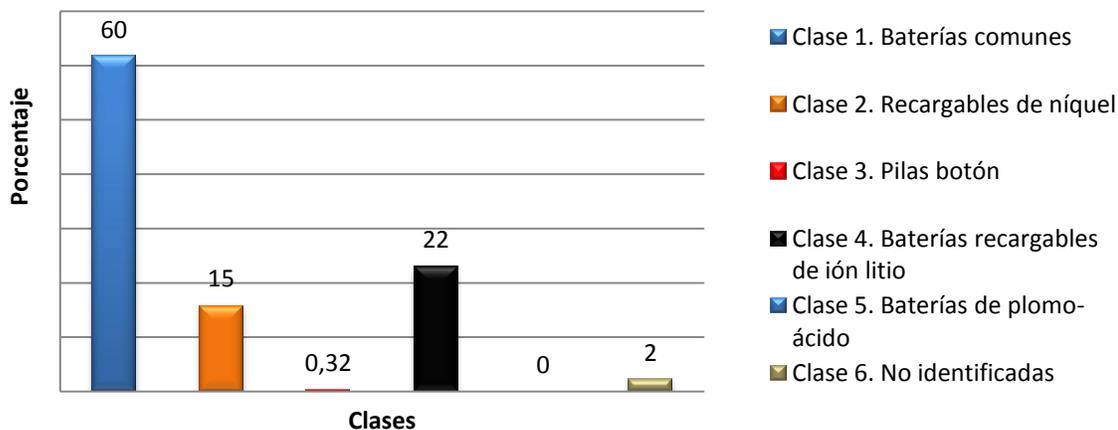


Figura 17. Composición total de los ingresos “Pilhas e baterias” en la CTRB, código 520.

Por lo tanto, según el objetivo propuesto, se determinó que la composición de las pilas y baterías que se tratan en la CTRB, es de 60% de pilas de Zinc-Carbono y Alcalinas; 15% de baterías de Níquel-Cadmio y Níquel Hidruro Metálico, 0,32% pilas botón, 22% baterías de Ión Litio y 2% que no es posible identificar.

4.2 Rutas de reciclaje de cada tipo de baterías

En el proceso de investigar las técnicas de reciclaje existentes para reciclar pilas y baterías, se encontró que éstas no pueden ser recicladas juntas, pues los diferentes componentes que poseen contaminan los metales a recuperar, por lo que deben ser separadas (27). La información existente sobre reciclaje de baterías es escasa y poco específica, ya que los pocos métodos existentes están patentados (15).

En esta sección se sugieren algunas técnicas implementadas en España para reciclar las baterías (15), de acuerdo a cada Clase establecida en la sección de Clasificación Práctica apartado 3.1.3. Se detalla el método para reciclaje de las baterías Clase 1, debido a que representa la mayor cantidad en las baterías tratadas en la CTRB (60%). Para las demás Clases se menciona el método resumidamente.

4.2.1 Reciclaje de pilas secas por hidrometalurgia

Las pilas secas primarias representan el 60% del total de baterías que se tratan en la CTRB, lo que corresponde a más de tres toneladas actualmente almacenadas.

Los metales más importantes a recuperar de las baterías de Zinc-Carbono y Alcalinas pertenecientes a la Clase 1, son 17 % de Fe, 20% de Mn y 18% de Zn (14) estos valores en porcentaje de masa. Los componentes se muestran en la Figura 19.



Figura 18. Componentes de las pilas Zinc-Carbono (A) y Alcalinas de Mn (B).
Fuente: Wolff, 2001 (23)

Se propone el método hidrometalúrgico para recuperar los metales mencionados Fe, Mn y Zn, debido a las ventajas que representa para la empresa MEA, entre ellas que es simple y permite llegar a la separación total de los metales, no genera emisiones gaseosas y requiere bajos costos de implementación. La desventaja principal es que genera agua residual contaminada con ácidos y metales pesados, sin embargo dentro de la CTRB este tipo de efluentes son tratados por el proceso de solidificación de lodos aplicando arcilla y Cal el espacio llamado “Baia de solidificação” y finalmente dispuestos en el espacio del relleno industrial destinado para los residuos peligrosos (Relleno Clase I).

4.2.3 Reciclaje de baterías de Níquel por pirometalurgia

Las baterías de Níquel corresponden al 15% del total de baterías tratadas en la CTRB, por ser recargables representan una cantidad menor a las anteriores. Estas baterías están

compuestas de aproximadamente 30% de Fe, 15% de Cd y 30% de Ni (14). El Níquel es uno de los metales más valiosos en según la LME (London Metal Exchange) (57).

Las baterías recargables de Níquel-Cadmio y Níquel-Hidruro Metálico, pueden ser recicladas juntas o por separado por proceso pirometalúrgico.

Uno de los principales inconvenientes de estas tecnologías es que requieren gran cantidad de energía (900° C) para la evaporación del Cd (15). Esas temperaturas son alcanzadas en el incinerador que opera en la MEA totalmente equipado con purificación de los gases de salida. A pesar que ese incinerador es empleado para la destrucción de los residuos provenientes de los servicios de salud, podría aprovecharse esas temperaturas para la recuperación del cadmio.

Este proceso presenta ventajas dentro de la empresa MEA ya que permite recuperar metales valiosos, generando cantidades mínimas de residuos líquidos, La pureza de recuperación del Cd es del 99,95%, siendo reutilizado para fabricar nuevas pilas o baterías de níquel-cadmio (17).

4.2.3 Almacenamiento de pilas botón

Las pilas botón aunque muy contaminantes, son muy pequeñas, por lo que se necesitan grandes cantidades para generar un volumen importante. Deben ser separadas y almacenadas adecuadamente según la norma NBR 12.235 y posteriormente enviadas a alguna empresa para su reciclaje y recuperación final de la plata y el mercurio.

En este trabajo no se proponen opciones de reciclaje para esta Clase de baterías, ya que representan solamente el 0,32% del total tratados en la CTRB.

Las pilas de botón con ánodo de óxido de mercurio e las de óxido de plata, pueden ser recicladas. Existen instalaciones que procesan el mercurio y la plata separadamente o en conjunto (58).

El proceso de recuperación del mercurio se basa en la destilación. Cuando ambos tipos son procesadas en conjunto, es utilizado el proceso de destilación donde la plata permanece en el residuo (58). La cantidad de mercurio presente en la batería de óxido de mercurio es de 30% en peso, y por lo tanto altamente valioso para ser reciclado (7).

También es posible la separación de metales de las baterías de plomo y de plata, conjuntamente, por un proceso térmico (7). La viabilidad económica de la recuperación de la plata y del mercurio es favorecida por el alto precio de estos metales en el mercado.

4.2.4 Logística reversa de baterías de Litio

Los principales componentes de las baterías de litio se encuentran en el siguiente Cuadro 8.

Cuadro 8. Componentes principales de las baterías de Litio.

Componente	% em peso del componente em la pila
Acero inoxidable	70-80
Monofluoruro de carbono	6-12
Carbonato de polipropileno	2-6
Polipropileno	2-6
1,2- dimetoxietano	2-4
litio	1-3

Fuete: Medina, 2008

El reciclaje de baterías de litio se basa en una etapa de selección de baterías, seguida de la trituración convencional de las mismas, por métodos mecánicos, disolución de las baterías en ácido clorhídrico al 30% a 85° C por 45 minutos y filtración. Siguiendo una etapa de precipitación con Carbonato de sodio y secado para recuperar carbonato de litio formado (59).

Este tipo de baterías forman parte de los componentes electrónicos, los cuales son 100% reciclables por tener un alto valor en el mercado, por lo que existen muchas empresas y asociaciones dedicadas a la recuperación de electrónicos para reciclaje.

Se propone implementar logística reversa para esta Clase de baterías, realizando separación y donación para la asociación RECICLAVALE de la ciudad de Itajaí. La cooperativa RECICLAVALE es una asociación autónoma (60) que se encarga encaminar los diferentes materiales como resultado del desensamble de los componentes electrónicos, retira del ambiente y separa para reciclaje más de 5 toneladas por mes de basura electrónica en la región (60).

Como se mencionó en la sección 4.1, con respecto a la composición de las baterías que ingresan en la CTRB, la Clase 4 corresponde a 1,147 toneladas que han sido acumuladas en cinco meses, lo que representaría el 22 % del total de las baterías que no se estarían

enterrando en el relleno industrial de la MEA. Al implementar logística reversa de este residuo, la empresa MEA solamente tendría los costos de transporte desde la MEA en Blumenau hasta la RECICLAVALE en Itajaí, que corresponde a una distancia de 61,2 km.

4.2. 5 Recuperación de baterías de plomo ácido

En los residuos almacenados en la central, no se encontró ninguna batería de plomo ácido, esto se debe a que son valiosas en el mercado por la gran cantidad de plomo que contienen (63%) son 100% reciclables, debido a que es más barato el reciclaje del plomo, que la extracción del plomo primario (61). En Brasil es necesario importar cerca del 40% al 100% del plomo que consume (61) (62), por eso la búsqueda del reciclado de esta Clase de baterías es alta.

La logística reversa de las baterías de plomo ácido funciona adecuadamente, la gran mayoría de los fabricantes no acepta vender baterías sin la correspondiente devolución de la batería obsoleta.

En caso de que aparezcan en la CTRB, deben ser adecuadamente almacenadas en locales cubiertos y cerrados para impedir la dispersión del material particulado y vapores ácidos (61). Posteriormente, deben ser enviadas a descontaminar en las recuperadoras de plomo más cercanas, implementando logística reversa de esta Clase de baterías.

Se sugiere el envío de este tipo de baterías a la empresa Baterías ERBS en la ciudad de Butuverá, ciudad vecina de Blumenau que se encarga de reprocesarlas y paga aproximadamente R\$1,5 por Kg de baterías, eso corresponde a \$0,75/Kg . El proceso reciclaje que ERBS realiza se basa también en la técnica pirometalúrgica, primeramente empleando la separación de los componentes de las baterías, para su posterior fundición en hornos rotativos donde se obtiene plomo y escoria (28).

4.2.6 Macro encapsulamiento de baterías no identificables

Este grupo de baterías no puede ser identificado (Clase 6) por presentar estado de corrosión, imposibilitando su reciclaje. Debe atenderse el siguiente orden según la jerarquía de residuos, dando un tratamiento adecuado.

Se sugiere continuar practicando la técnica de inmovilización de esta Clase de baterías, por medio de la macro encapsulación. No obstante, mejorar dicha técnica según lo propuesto por Ortiz, 2009 (16), quien propone el macro encapsulamiento de baterías en bloques de concreto que posteriormente pueden ser empleados en la construcción civil (ver apartado 2.7.2.2 y Anexo 1).

En la CTRB se realizó el encapsulamiento de baterías basándose en lo propuesto por Ortiz, 2009, con algunas variaciones del método, esto para cumplir con el estándar de las dimensiones de bloques utilizados en el relleno de 20x40x20 cm según se muestra en las Figuras 19 y 28.

De manera que se elaboraron dos bloques del doble de largo de los construidos por Ortiz, pero respetando la conformación de la estructura interna del bloque. Además se le hizo una variación a los lados menores de los moldes, que permita encajar los bloques a la hora de emplearlos en la construcción de los muros de contención.

En el Apéndice C se muestra la evaluación económica de este método, se determinó un costo de R\$61 (\$30) para encapsular una tonelada de baterías, en comparación con el antiguo método de encapsulamiento en estañones que se tenía un costo de R\$290 (\$145), el encapsulamiento en bloques es 400% más barato y por lo tanto, más rentable de practicar.



Figura 19. Macroencapsulamiento de baterías no identificables en la CTRB.

Con la implementación de las técnicas anteriormente mencionadas se evitaría continuar generando un pasivo ambiental en la célula 1B, aumentando así su vida útil. En el Apéndice 1 se muestran los cálculos de aumento de la vida útil de la célula 1B, se tiene que se aumentaría en 10 meses la vida útil de la Célula 1B, si no se realizara macro encapsulación de baterías, eso refleja 11, 13 m³ que estarían libres en la Célula 1B y han sido ocupados por 572 contenedores de pilas y baterías macro encapsuladas.

De las seis Clases de baterías, se propone implementar logística reversa para las Clases 4 y 5, de litio y plomo respectivamente, pues existen opciones locales de reciclaje externas a la empresa MEA. Las Clases 1 y 2 que corresponden a pilas secas primarias y secundarias, involucran el desarrollo de sistemas para la recuperación de los metales, las cuales no se profundizaron en este estudio. Una alternativa viable en la empresa MEA es el uso de la técnica de macro encapsulación de baterías en bloques de cemento, lo cual permitiría dar una utilidad al material encapsulado y reducir el uso de la célula 1B. Además es casi cinco veces más barata que la antigua macro encapsulación en estaciones de plástico (Ver apéndice C)

4.3 Separación mecánica de los diferentes tipos de baterías

Esta etapa fue realizada tomando aproximadamente 6, 75 Kg de la muestra inicial de 20 Kg. Mediante separación manual, se obtuvo gran diversidad de tamaños, formatos y colores en cada una de las Clases (Figura 20).



Figura 20. Contenido de la muestra secundaria .

A partir de las baterías debidamente separadas, fueron agrupados los diferentes formatos existentes en cada Clase y se enlistaron las variedades encontradas (Tabla 4).

Tabla 4. Diferentes tipos de baterías encontrados en cada una de las Clases establecidas (Sección 3.1.3).

Clase	Formatos encontrados / Característica importante	Unidades
Clase 1	AA	2
	AAA	3
	Cuadrada 9V	2
	D	3
	C	3
	Pequeña 12V	1
Clase 2	Baterías blancas de diferentes tamaños y formatos	13
	Baterías amarillas de diferentes tamaños y formatos	5
	Baterías verdes de diferentes tamaños y formatos	11
	Baterías negras AA	2
	De celular	19
	AA con una banda naranja en el borde	6
Clase 3	Botón con orificios	8
	Botón tipo moneda diámetro 3 cm	1
	Botón altura de 3 mm	5
	Diminutas	94
Clase 4	De computador	4
	De celular	20
	AA	2
Clase 6	Oxidadas formato AA	7
	Sin lectura formato AA	5
	Sin lectura formato AAA	3
	Sin lectura formato 12V	2

Como puede observarse en la Tabla 4, se identificó que los formatos D, C, cuadrada de 9V que existen únicamente en esa Clase 1.

En la Clase 2, se identificó que las baterías conformadas por la agrupación de 2 o 3 pilas, unidas por un plástico y con un cable saliendo de la envoltura que es de color uniforme: verde, blanco o amarillo, sólo existen en esta Clase.

Además, las pilas AA y AAA encontradas en esta Clase, su gran mayoría, presenta una banda naranja en el borde, ya sea en su polo positivo o negativo, lo cual podría permitir

separar la Clase 2 de las demás Clases que presentan este formato, mediante un método óptico que identifique dicha banda naranja.

Las baterías de celular encontradas en la Clase 2, son pocas y bastante más pesadas que las de los celulares actuales, por lo que probablemente están en desuso en la tecnología actual.

También en la Tabla 4 se observa que en la Clase 3 existen varios formatos y composición en las baterías botón, continúan siendo más pequeñas y livianas que todas las demás baterías por lo que no es difícil su separación manual.

Por su parte en la Clase 4, se encontraron la totalidad de las baterías de computadoras portátiles, que son las de mayor tamaño y peso. Además de las de celular en su gran mayoría, con pesos mucho más leves que las encontradas en la Clase 2. Por lo que se afirma que hay una gran variedad de formatos diferentes dentro de cada Clase.

Una vez identificadas las cantidades y tipos de baterías presentes, se realizaron ensayos de separación por métodos físicos, con el objetivo de encontrar características en común que permitan diseñar un método para la separación mecánica para dar a cada tipo de batería el destino correspondiente. Los resultados se discuten en las secciones siguientes.

4.3.1 Método de tamizado

Al utilizar la separación por el método del tamizado descrito en la sección 3.3.1 y las formulas de la sección 2.8.1 se calculó los porcentajes de rechazo y cernido para cada uno de los tres tamizados según se muestra en la Tabla 5, las masas y la muestra de cálculo se encuentran en el apéndice 2.

Tabla 5. Índices de rechazo y de cernido en el tamizado.

	Tamizado 1		Tamizado 2		Tamizado 3	
	Rechazo	Cernido	Rechazo	Cernido	Rechazo	Cernido
Ir	43%		61%		95%	
Ic		57%		39%		5%

En este trabajo la eficiencia de separación de cada Clase en los tres tamizados es importante desde el punto de vista del rechazo y desde el punto de vista de cernido solamente del tamizado 3. Debido a que en el tamizado 2 y 3 la alimentación fue el cernido del tamizado

anterior, así $R1+R2+R3+C3=A$. En las siguientes Tablas 6 y 7 se muestra la eficiencia en cada uno de los tres tamizados.

Tabla 6. Porcentajes de recuperación de Clases en los procesos de tamizado desde el punto de vista del Rechazo.

Clase	Tamizado 1	Tamizado 2	Tamizado 3
1	0	73	27
2	0	55	45
3	0	0	0
4	84	16	0
5	0	0	0
6	0	7	93
Total	42,96	34,66	21,25

Tabla 7. Porcentajes de recuperación de Clases en los procesos de tamizado desde el punto de vista del Cernido.

Clase	Tamizado 1	Tamizado 2	Tamizado 3
1	100	27	0
2	100	45	0
3	100	100	100
4	16	0	0
5	0	0	0
6	100	93	0
Total	57,38	22,38	1,13

En el Rechazo 1 se obtuvo la totalidad de las baterías de computadores portátiles que corresponden al 84% de las baterías Clase 4 según la Tabla 6, lo cual representa la mayoría de la Clase 4 puede ser separada con la criba empleada según se muestra en la Figura 21.



Figura 21. Tamizado 1.

En la Figura 22 se puede observar que en el rechazo 2, se encontró la totalidad de las baterías de celular, que representan la porción restante de las baterías de la Clase 4 (16%) según Tabla 6, que no fueron rechazadas en el tamizado 1. Además en este segmento se encontró la totalidad de las pilas cuadradas 9V, C y D de la Clase 1 (73%) según la Tabla 6 y la Figura 22. También se encontraron las baterías de Ni-Cd de colores amarillo, blanco y verde que pueden ser fácilmente identificables para ser separadas manualmente.



Figura 22. Tamizado 2.

En el rechazo 3 se encontró la totalidad de las pilas de tamaño AA y AAA que corresponden a la Clase 1, a la Clase 2 y a la Clase 6, con porcentajes de eficiencia de

separación de 27, 45 y 93% de cada Clase respectivamente, no obstante por ser del mismo formato, estas tres Clases quedan juntas, obligando a emplear otro método auxiliar para su definitiva separación.

En el cernido 3 se obtuvo la totalidad de las baterías tipo botón establecidas como Clase 3 100% según se muestra en la Tabla 7 y la Figura 23, siendo esta lámina adecuada para separar este tipo de pilas.



Figura 23. Tamizado 3.

Así, la lámina A fue adecuada para separar las baterías de ión Litio. La lámina B fue adecuada para separar las baterías de celular, así como otras de tamaño medio de Zinc-Carbón y Ni-Cd que, a su vez pueden ser fácilmente separadas entre sí por método manual por su formato y color característicos. La lámina C fue adecuada para separar las baterías de tipo botón que son el tipo más difícil de seleccionar manualmente. Además permitió separar la totalidad de las pilas AA y AAA que corresponden a tres Clases, por lo que es necesario otro método auxiliar para la separación total de este formato.

De la manera que fueron usadas las láminas, comenzando el tamizado por el tamiz mayor, las pilas de botón que son las más finas, pasaron y se perdieron algunas por su diminuto tamaño. Eso podría superar invirtiendo el orden de los tamices.

4.3.2 Método de gravimetría

Empleando baterías del mismo tamaño y forma, conforme sección 3.3.2 se encontraron 15 unidades de formato AA de composición variada como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Masas de las diferentes marcas de formato AA encontradas en el Rechazo 3.

Marca/ Estado	Clase	Composición	Masa (+0,05)g
Panasonic	1	Zn-C	17,39
Vinnie	1	Zn-C	17,34
Rayovac	1	Zn-C	18,98
EASTPOWER	1	Heavy duty	14,66
Duracell	1	Alcalina de manganeso	23,97
Rayovac		Alcalina de manganeso	24,00
GP 2500	2	Ni-MH	30,54
SONY	2	Ni-MH	27,56
Cyber-shot	2	Ni-MH	28,97
Panasonic	2	Ni-Cd	19,76
ELGIN	2	Ni-Cd	19,33
Goldentime	2	Ni-Cd	18,03
Estado de oxidación	6	--	17,17
Estado de oxidación	6	--	18,78
Estado de oxidación	6	--	18,00
Estado de oxidación	6	--	17,30
Estado de oxidación	6	--	18,10
Estado de oxidación	6	--	18,50

En los resultados obtenidos, se notó que las pilas de Ni-MH son las más densas con masas cerca de 30 g, sin embargo, las de Ni-Cd que también pertenecen a la Clase 2 tienen masas por debajo de 20 g, en el intervalo donde se encuentran los pesos de las pilas tipo Zn-C de la Clase 1. De las Clase 1, la pila más densa fue la Alcalina.

Los resultados muestran, que pilas del mismo tipo muestran una densidad diferente según la marca, así como pilas de diferente composición pueden mostrar igual densidad. Lo que interfiere a la hora de realizar separación por método gravimétrico. Resultados similares han sido reportados en estudios desarrollados en la Universidad de São Paulo (14).

Este método de separación sería eficiente para separar solamente las pilas de Ni-MH, que son las que presentan un peso suficientemente diferenciado, cercano a los 30g, contrario a los pesos de Ni-Cd y Zn-C próximos a 20g.

4.3.3 Método de imantación

Tras realizar las mediciones de las distancias de atracción de las pilas hacia el imán, conforme lo descrito en la sección 3.3.3 (Figura 24), se obtuvieron los resultados de la Tabla 9.

Tabla 9. Distancias máximas (mm) de atracción de pilas AA a al imán de 10 cm de diámetro.

Medición	Clase	Marca/condición	Distancia de atracción (mm).
1	C2	Super	18
2	C2	Cybershot	13
3	C1	Goldentime	20
4	C1	Panasonic	17
5	C1	Duracel	12
6	C6	Oxidada	5
7	C6	Oxidada	3
8	C6	Oxidada	3
9	C6	Oxidada	1
10	C6	Oxidada	0



Figura 24. Método de imantación empleado.

De las mediciones con imán se obtuvo que las pilas Clase 1 y Clase 2 presentan distancias máximas de atracción hacia el imán, dentro del mismo rango de 13 a 20 mm. Además presentaron menor fuerza de atracción, son aquellas que presentan un alto grado de corrosión. Esto se debe a que los materiales ferrosos que son atraídos por la imantación se encuentran en la carcasa de la pila y en las pilas de Clase 6 la carcasa está destruida casi en

su totalidad. Lo anterior se explica porque el hierro es atraído por el imán, pero el óxido de hierro (herrumbre) ya no presenta esa propiedad (31).

El estado de oxidación en la baterías imposibilita el reciclaje de los metales y es riesgoso por la peligrosidad de sus componentes internos. En estos casos pueden haberse derramado los componentes internos, con la posibilidad de reaccionar con componentes del recipiente y los componentes de las otras baterías. Las baterías que presenten este estado deben ser separadas y tratadas mediante alguna técnica de solidificación lo antes posible.

Por lo tanto, el método de imantación es adecuado para separar las pilas y baterías que se encuentran en estado adecuado para ser recicladas.

4.3.4 Método de sedimentación

Durante el ensayo de sedimentación en agua descrito en la sección 3.3.4, no se obtuvo ninguna diferencia de la fase inicial, todas las baterías presentaron mayor peso específico que el agua (Figura 25). Lo cual era de esperar debido a que debido a que los componentes de las baterías son metales más densos que el agua, se sedimentan y quedan en el fondo sin posibilidad de flotar. Así, este método no es adecuado para separar ninguna de las Clases establecidas.



Figura 25. Método de sedimentación.

De los métodos de separación empleados: tamizado, gravimetría, imantación y sedimentación, se obtiene que no hay ningún método que permita una separación total para las pilas y baterías, cualquier método empleado siempre va a necesitar el acompañamiento del método manual. De los métodos empleados, el tamizado fue el que presentó mejores resultados, este procedimiento permitió separar algunas Clases de acuerdo al tamaño. De manera que el empleo de la técnica de tamizado es la más eficiente como primera etapa de separación, además con el monitoreo de un responsable capacitado, por proceso manual pueden ser fácilmente separadas las Clases que no sea posible separar totalmente por los orificios de los tamices.

4.4 Comparación situación Costa Rica y Brasil

Con base en la las secciones 2.7, 2.8, 2.9 y 3.4, se realiza un Cuadro comparativo mostrando aspectos de gerenciamiento de baterías tanto en Costa Rica como en Brasil, tomando en cuenta factores como costos y métodos de tratamiento empleados, además la cantidad total recuperada de baterías y la legislación aplicable específicamente sobre baterías según se muestra en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Indicadores del gerenciamiento de baterías secas de Costa Rica y Brasil.

País	Toneladas anuales de baterías secas	Tratamiento existente	Costo (\$)	% de Recuperación	Índice de generación (Kg/persona/año)	Legislación específica de baterías
Brasil	182 000	Reciclaje/ Encapsulamiento	445	8	1,2	Resolución CONAMA No 401
Costa Rica	6 800	Exportación	4 000	1,17	1,7	No hay

Según el Cuadro 9, se observa que ambos países presentan un índice muy bajo de recuperación de baterías, siendo inferior al 10%, lo que quiere decir que la población aún no separa este residuo de los desechos ordinarios.

Se identifica que Costa Rica tiene una peor situación con respecto a Brasil en gerenciamiento de baterías, ya que ni siquiera se cuenta con legislación que regule las

concentraciones máximas de metales pesados para estos sistemas, lo cual sí está establecido en Brasil por medio de la Resolución de CONAMA no 401 (Ver sección 2.7.1).

En Costa Rica, la escasa recuperación de baterías agotadas energéticamente puede deberse a la escasez de opciones de tratamiento, así como al alto precio de dichas alternativas, entre otras cosas.

La solución a esta problemática comienza por la creación de normativas y de campañas educativas que informen a la población sobre los riesgos a la salud de la disposición inadecuada de este tipo de residuos, estas campañas deben incluir puntos de recolección y almacenamiento adecuados. Se debe incentivar a la creación de empresas dedicadas a explorar el reciclaje de baterías, que según experiencias en España han sido rentables (15). Por otra parte, se debe crear normativas que garanticen la implementación de la logística reversa en Costa Rica, de manera que responsabilicen a los grandes productores por los residuos generados una vez terminada la vida útil de las baterías.

Es necesaria la colecta selectiva de baterías, que permita separarlas de la corriente de residuos ordinarios, como residuos especiales que son. Esto mejoraría la situación actual donde las baterías constituyen una fuente no puntual de contaminación por metales pesados, tanto en rellenos sanitarios como en botaderos, suelos, nacientes y ríos. Además, implementando la recolección separada de este desecho, podría facilitar futuramente la implementación de sistemas de reciclaje.

Capítulo 5 – CONCLUSIONES

Los ingresos de baterías en la Central de Tratamiento de Residuos Blumenau se componen de: 60% pilas Zn-C y alcalinas; 22% de ión de litio, 16% de Ni-Cd y Ni-MH y 2% que no son identificables y solamente 0,32 de pilas botón.

Las Clases de baterías que ingresan a la CTBR podrían ser recicladas o tratadas según su tipo de la siguiente manera, aumentando en 10 meses la vida útil de cada célula construida (ver Apéndice 1):

- A. Las baterías recargables de ión litio de celulares y computadoras portátiles, pueden ser donadas a la cooperativa de bien social RECICLAVALE, la cual encamina estos residuos para reciclaje junto con los componentes electrónicos.
- B. En caso de aparecer baterías de plomo ácido, éstas podrían ser vendidas a la empresa BATERIAS ERBS que se encarga de reprocesarlas.
- C. Las baterías no identificadas fueron macro encapsuladas en bloques de concreto que serán empleados las paredes de tanques de contención dentro del relleno, esta técnica resultó cinco veces más barata que el antiguo macro encapsulamiento, siendo útiles en el espacio que ocupan.
- D. Las pilas botón que ingresen deben ser almacenadas en estañones de PEAD debidamente tapados hasta tener un volumen importante, posteriormente vendidas para la recuperación de la plata y el mercurio que contienen.
- E. Las baterías Zn-C y alcalinas pueden ser recicladas por el método hidrometalúrgico mientras que las de Ni-Cd y las de Ni-MH mediante el proceso pirometalúrgico. El reciclaje de estas dos Clases requiere de la implementación de procesos de reciclaje dentro de la empresa MEA, sin embargo éstas representan el 74% del total de baterías que son tratadas en la CTRB, por lo que es necesario profundizar en investigación para la implementación de cada una de estas técnicas.

Las baterías deben ser separadas según sus componentes para poder ser recicladas, ya que los componentes de unas, contaminan e imposibilitan la recuperación de los metales de las otras.

Por medio del tamizado pueden ser semi separadas por tamaños y formatos. Con los tamices A y C se consiguió separar la totalidad de las baterías de computador y el total de las pilas botón. Las demás quedaron semi separadas en el Cernido 1 y en el Cernido 2 que con ayuda manual pueden ser fácilmente separadas en su totalidad. El orden adecuado de los tamices para separación debe ser del tamiz de menor orificio al de mayor orificio, para evitar la pérdida de las pilas botón.

El método gravimétrico es poco eficiente para separar las diferentes Clases de pilas AA, debido a que las masas de éstas son muy semejantes, a pesar de tener composición diferente. Sin embargo, las pilas AA de Ni-MH correspondientes a la Clase 2, presentan una banda naranja característica que permite identificarlas visualmente.

El aumento del grado de oxidación de las pilas, es inversamente proporcional a la fuerza de atracción hacia el imán, así que pueden separarse por método de imantación las baterías que estén en condiciones de ser recicladas.

El método de sedimentación no es adecuado para separar las baterías enteras, ya que ningún tipo presenta capacidad de flotación en el agua.

Tanto la situación de Brasil como la de Costa Rica es crítica en lo que a tratamiento de baterías secas se refiere, sin embargo, Costa Rica presenta la situación más débil por tener este residuo en la lista de los residuos peligrosos aún no reglamentados, además por tener el índice de recuperación de baterías más bajo (1,17%), además es nueve veces más caro reciclar baterías en Costa Rica que en Brasil por no contar con recicladoras de baterías a nivel nacional.

Capítulo 5 – RECOMENDACIONES

Para mejorar la implementación de la logística reversa de pilas y baterías, se debe informar a la población, así como proveer infraestructura para implementar una colecta selectiva. Por otro lado, deben ser tomadas acciones desde el inicio del proceso productivo que aseguren una ejecución efectiva de esta herramienta. Se recomienda establecer un padrón internacional en la fabricación de baterías que facilite su separación, así como la incentivación por parte de los gobiernos a las personas físicas o jurídicas que pongan en práctica acciones en favor del reciclaje de materiales.

Los entes de gobierno deben educar a la población en cuanto al consumo, la selección y manejo correcto de las baterías tomando acciones como: comprar aparatos de preferencia que utilicen energía eléctrica, de no ser esto posible, buscar usar baterías recargables o de valor energético alto que tardan más tiempo en convertirse en desechos. Además enfatizar la importancia de leer los empaques de las pilas y escoger aquellas que tengan menor cantidad de metales pesados, consultar en los puestos de venta sobre la implementación de logística reversa, divulgar y participar activamente de ella. Finalmente, almacenar las pilas y batería en un envase plástico debidamente tapado, evitar abrirlas y alejarlas del alcance de los niños.

En conjunto con recomendaciones de otros autores, en este trabajo se reitera la importancia de alterar la resolución de CONAMA 401 de Brasil de forma que no permita el descarte de las pilas zinc – carbón, alcalinas de manganeso, botón y moneda en la basura doméstica, pues no todos los productores atienden los límites máximos de concentración de metales pesados, además la población no tiene conocimiento suficiente para seleccionar las baterías que atienden dicha normativa.

Se recomienda la evaluación de factibilidad económica de la ejecución de cada una de las técnicas propuestas y la continuidad de este trabajo para la implementación dichas propuestas, tanto en la empresa Momento Engenharia Ambiental de Brasil, como en Costa Rica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Environment Canada.** Used Batteries and the Environmental: A Study on the Feasibility of their Recovery. [Online] 1991. [Cited: octubre 10, 2012.] www.ec.gc.ca.
2. **Russell, J.B.** *Química Geral*. São Paulo : McGraw-Hill do Brasil, 1981.
3. **EPA.** United States Environmental Protection Agency. [Online] 2012. [Cited: agosto 14, 2012.] <http://www.epa.gov/mercury/regs.htm>, 11 de outubro de 2012.
4. *Pilhas e baterias: Impacto ao meio ambiente e a saúde do homem*. **Kmiecik Prieto, Luciana and Ruiz Schlichting, Carmen Lúcia**. 04, Maringá-Paraná : s.n., outubro/dezembro 2010, UNINGÁ Review, Vol. 3.
5. **Tomassi, L R.** *Degradação do meio ambiente*. São Paulo : s.n., 1977. 169 p.
6. **Oliveira Aquino, Julio César and Ferreira Leite, Juliana.** *Gerenciamento do descarte de pilhas e baterias em Goiânia*. Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Católica de Goiás. Goiás : s.n., 2005.
7. **Braz de Oliveira, Margarete.** *A problemática do descarte de baterias usadas no lixo urbano*. Saneamento Ambiental, Universidade Mackenzie. São Paulo : FUNDACENTRO, 2001.
8. **ABINEE.** *Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica*. [Online] 2012. [Cited: Setiembre 3, 2012.] <http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon15.htm>.
9. **Scharf, Regina.** Baterias velhas voltam às fábricas. *Gazeta Mercantil*. marzo 1, 2000.
10. **ABNT NBR 10004** . Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro : s.n., 2004.
11. **ABNT NBR 12235.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Armazenamento de resíduos sólidos perigosos*. 1992.
12. **Congresso Nacional** . Política Nacional de Resíduos sólidos lei 12305. Brasília : s.n., 2010.
13. **Krabbe, Tiago.** Gerente de recursos naturales . [interv.] Juliana Madrigal Araya. *Implementación de logística reversa*. Blumenau, setiembre 6, 2012.
14. **Romano Espinosa, Denise Croce and Soares Tenório, Jorge Alberto.** *Caracterização de pilhas e baterias proveniente de programa de devolução voluntária*. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo. São Paulo : s.n., 2010. p. 2010.
15. **Gómez Gómez, María.** *Posibilidades de tratamiento de residuos de pilas y baterías*. Universidad de Murcia. Murcia : s.n., 2010.
16. **Ortiz López, Catalina Del Rocío.** *Estudio de solidificación de pilas y baterías de uso doméstico mediante la técnica de macroencapsulación*. Ingeniería ambiental, Escuela Politécnica Nacional. Quito : s.n., 2009. Proyecto Final de Graduación.

17. **La Graga, Michael, Buckingham, Phillip and Evans, Jeffrey.** *Gestión de Resíduos Tóxicos. Tratamiento, Eliminación y Recuperación de Suelos.* Primera edición. México : Mc Graw Hill, 1996. Vol. II.
18. **Ministerio de Salud.** *Reglamento sobre las características y el listado de los desechos peligrosos industriales.* San José : s.n., 1998.
19. —. *Política Nacional Para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos.* Costa Rica : s.n., 2011.
20. **Programa Competitividad y Medio Ambiente.** *Plan de Residuos Sólidos de Costa Rica.* San José : s.n., 2007.
21. **Brenniman, Gary R.** *Handbook of Solid Waste Management.* New York : Mc Graw Hill, 1994. pp. 9.149-9.162.
22. **Adams, Ann Patchak and Amos C, Kenna.** *Recycling Handbook.* New York : McGraw-Hill, 1993. pp. 19.1-19.32.
23. **Wolff, Eliane.** *Reciclagem, tratamento e disposição segura das pilhas zinco-carbono e alcalinas de manganês.* Departamento de Engenharia Sanitaria e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte : s.n., 2001.
24. **Castellan, Gilbert W.** *Fundamentos de Físico-Química.* Rio de Janeiro : s.n., 1995. 257 p.
25. **University of Cambridge.** *Batteries.* [Noviembre] Inglaterra : s.n., 2005.
26. **Energizer.** Funcionamiento de la pila. Reacciones Químicas. [Online] 2009. [Cited: noviembre 2012, 12.] <http://www.energizer.com/Pages/default.aspx>.
27. **European Portable Battery Association.** Recycling Around Europe. [Online] 2005. [Cited: setiembre 15, 2012.] <http://www.epbaeurope.net/recycling.html#battery>.
28. **Erbs, Felipe.** *Reciclagem de chumbo proveniente de baterias automotivas usadas.* Blumenau : s.n., 2011.
29. **International Energy Agency.** *Classification of portable batteries .* 2011.
30. **Goyer, R A.** Toxic effects of metals. [book auth.] Klaaser and J Doull. *Casaret and Doulls Toxicology.* Tercera Edición. New York : MacMillan Publishing Company, 1986.
31. **Paitán Quispe, Alvaro.** *Corrosión de metales.* Facultad de ingeniería metalúrgica y de los materiales, Universidad Nacional del Perú. Peru : s.n., 2009.
32. **Oliveira Aquino, Julio César and Ferreira Leite, Juliana.** *Gerenciamento do descarte de pilhas e baterias em Goiânia.* Departamento de Engenharia, Universidade Católica de Goiás. Goiás : s.n.

33. **Ortiz López, Catalina Del Rocío.** *Estudio de solidificación de pilas y baterías de uso doméstico mediante la técnica de macroencapsulación.* Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional. Quito : s.n., 2009.
34. **Roris, Elizabeth Rodrigues Rangel.** *Reciclagem de pilhas: Recuperação do manganês na forma de dióxido de manganês eletrolítico.* Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo. São Paulo : s.n., 2010. Dissertação.
35. *Uma avaliação ecológica do rprocesso de termorreiclagem.* **Vetter, G.** São Paulo : s.n., febrero 1996, Revista Siemens.
36. **Morales Gámez, Laura Teresa .** *Desarrollo de una propuesta para la construcción de una planta piloto para el reciclaje de los componentes de las baterías níquel-cadmio.* Departamento de Ingeniería Química y Alimentos , Universidad de las Américas Puebla. México : s.n., 2005.
37. **Aguiluz, Lisly and Torres, Mariela.** *Diagnóstico de la gestión de pilas y su peligrosidad como residuos en Chile.* Santiago : s.n., 2006.
38. **Schuler Correia, Gustavo , Michels de Sant´Anna, Carlos Henrique and da Silva Correia Net, Jorge.** *Logística Reversa de Baterias: Transformando Custos em Sustentabilidade.* 2009.
39. **Técnicas, ABNT-Associação Brasileira de Normas.** *Incineração de resíduos sólidos perigosos - Padrões de desempenho.* Rio de Janeiro : s.n., 1990.
40. **CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente -.** *RESOLUÇÃO No. 401.* Brasília : s.n., 2008.
41. Separación de mezcla sólido. *Buenastareas.com.* [Online] 2011. [Cited: octubre 21, 2012.] <http://www.buenastareas.com/ensayos/Separacion-De-Mezcla-Solido/1777653.html>.
42. **Marín, Isasi Josefa.** *La química y la física trabajan juntas: Materiales con propiedades magnéticas.* Departamento de química inorgánica I, Universidad Complutense de Madrid. Madrid : s.n., 2010.
43. **Pardavé Livia, Walter.** *Reciclado industrial de metales.* Bogotá : ECOE EDICIONES, 1966.
44. **Helou, Esperidião Amin.** *Ley estadual No. 11.347.* Governo de Santa Catarina. Santa Catarina : s.n., 2000.
45. **Leite, Paulo Roberto.** *Logística Reversa: meio ambiente e competitividade.* Segunda Edición. São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2006. p. 250.
46. **Gobierno de la república.** *Reglamento sobre Manejo de Basuras N° 19049-S.* San José, Costa Rica : La Gaceta, 1989.
47. **Consejo de las Naciones Unidas.** *Convenio de Basilea sobre Control Fronterizo de Desechos Peligrososy su Eliminación.* Basilea : s.n., 1989.

48. **Mnisterio de Salud.** *Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos Electrónicos N° 35933-S*. San José : La Gaceta, 2010.
49. **Suzaquim.** Pilhas e baterias. [Online] 2012. [Cited: noviembre 14, 2012.] <http://suzaquim.com.br/PilhasBaterias.htm>.
50. **Riveiro, Geanderson.** *Gerente Momento Engenharia Ambiental*. octubre 30, 2012.
51. *Desarrollo de la tecnología de inmovilización/solidificación de desechos peligrosos en Costa Rica. Estudio de caso en lodo de electrodeposición.* **Romero, L G, Camareno, M V and Barrantes, F P.** 2, 2007, Avances en Química, Vol. 3, pp. 9-14.
52. *Manejo de desechos peligrosos industriales.* **Romero, L. G., Quesada, H. and Salas, J. C.** 20, 2007, Tecnología en marcha, pp. 10-20.
53. *Tecnología de inmovilización de desechos peligrosos en Costa Rica.* **Romero, L.G. y Vargas, M.** 19, 2006, Tecnología en marcha, Vol. 3, pp. 3-18.
54. *Proyecto: Estrategia de manejo de desechos peligrosos industriales en el Parque Industrial de Cartago.* **Quesada, H., Romero, L. G. y Salas, J.C.** Número especial 18, 2010, Tecnología en marcha, Vol. 2, pp. 34-39.
55. *Aplicación de la tecnología de membranas en el tratamiento de algunos residuos líquidos altamente peligrosos.* **G., Calvo and Mora J., Quesada J., Quesada H.** 1, 2010, Tecnología en marcha, Vol. 23, pp. 94-106.
56. **Barquero Rodríguez, Ileana.** Reciclaje de pilas. *Servicios Ecológicos*. [Online] 2012. <http://www.reciclajecr.com/reciclaje-pilas-baterias-costarica.html>.
57. **Londo Metal Exchange.** LME Nickel. [Online] 2012. <http://www.lme.com/nickel.asp>.
58. **Hiller, F.** *Entsorgung von Geratebatterien*. Berlin : Expert Verlag.
59. **Medina Velazquez, Dulce Yolotzin.** *Recuperación de Litio a partir de pilas de desecho por métodos hidrometalúrgicos*. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Instituto Politécnico Nacional. México : s.n., 2008.
60. **Martins, Marli.** Directora presidente. *Reciclaje de electrónicos*. Itajaí, setiembre 25, 2012. Presidente Reciclavale.
61. **Araújo de Sousa, Edmilson, Candido de Oliveira, Epaminondas and da Motta Reis, Evandro.** *Os benefícios da reciclagem de baterias de chumbo-ácido no leste de Minas*. Faculdade de Engenharia, Universidade Vale do Rio Doce. Governador Valadares : s.n., 2009.
62. **Anacleto Caetano, Nicholas S, et al.** *Reciclagem de baterias de chumbo-ácido - Sua importância em nosso cotidiano*. Centro Universitário Salesiano Auxilium. São Paulo : s.n., 2011.

63. **Vega Longo Reidler, Nívea Maria and Risso Günther, Wanda Maria.** *Impactos ambientais e sanitários causados por descarte inadequado de pilhas e baterias usadas.* Engenharia Ambiental e Saúde Pública, Universidade de São Paulo. São Paulo : s.n.
64. **Soares Tenório, Jorge Alberto and Romano Espinosa, Denise Crocce.** Reciclagem de Pilhas e Baterias. [Online] 2000. [Cited: 10 22, 2012.] <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsare/e/proypilas/pilas.pdf>.
65. **Ambiental, Momento Engenharia.** *Registros.* Blumenau : s.n., 2012.
66. **(IPT), Instituto de Pesquisa Tecnológica.** *Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos.* Rio de Janeiro : Paginas e Letras, 1996. 2163.
67. **Martinez, Xaviers.** *Guía para la gestión integral de residuos peligrosos Tomo 1 y 2.* Primera Edición. Quito : s.n., 2007.
68. **ASTDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry.** Toxic Substances Portal. [Online] 20007. [Cited: setiembre 20, 2012.] <http://www.atsdr.cdc.gov/>.
69. **WHO - World Health Organization.** Environment Health Criteria. [Online] 2002. [Cited: setiembre 5, 2012.] [ww.who.int/pcs/ehc/summaries.html](http://www.who.int/pcs/ehc/summaries.html) (2002)..
70. **Hidalgo Montesinos, Asunción María .** *Análisis de diferentes técnicas de inertización de residuos peligrosos.* Universidad de Murcia. 2010.
71. **Marín, Isasi Josefa.** *La química y la física trabajan juntas: Materiales con propiedades magnéticas.* Departamento de química inorgánica I, Universidad Complutense de Madrid. Madrid : s.n., 2010.
72. **CERCLA.** Top 20. [Online] 2002. <http://www.atsdr.cdc.gov/atsdrhome.html>.

ANEXOS / APÉNDICES

ANEXO A. Técnica de Macro encapsulación en testigos de hormigón con aditivo impermeabilizante propuesta por Ortiz, 2009 (33).

Empleando bloques de 20 x 20 x 20 cm. En el interior una celda de 10 x 10 x 10 cm conteniendo el residuo. En la máquina mezcladora o concretera se realizan las mezclas del material de acuerdo a las dosificaciones del Cuadro 10.

Cuadro 10. Composición de la mezcla para conformar Bloques de Hormigón con aditivo impermeabilizante.

Proporción	Muestra	Componente	Unidad	Cantidad	Porcentaje
1:1,5:2,5	2	Cemento	Kg	7,23	9,3
		Arena	Lts	7,2	28,7
		Grava	Lts	11,9	47,8
		Agua	Lts	3,2	12,7
		Aditivo Sika	Lts	0,35	1,4

Fuente: Ortiz, 2009 (33).

Como agente inmovilizador de metales pesados se utiliza polvo o viruta de acero en una proporción de 1% (w/w) peso residuo. Se utiliza aditivo impermeabilizante de Sika 1, dosificado al 3% del peso del cemento, para disminuir la absorción de agua en el bloque. Las proporciones de los materiales para un agregado grueso de compresión máxima de 19 mm y una compresión deseada de 240 Kg/cm².

En los moldes se coloca la mezcla en una cantidad suficiente que cubra 5 cm del molde, posteriormente se sitúa en el centro del mismo la celda cúbica de malla de hierro galvanizado conteniendo la muestra de pilas usadas (1,7 Kg en peso de residuo) (Figuras 26 y 27), 1% de partículas de acero (17 g) y la estructura cúbica de varillas en el molde. Finalmente se deposita la mezcla hasta completar el llenado de los moldes, se retira el exceso de material mediante un barredor manual.

El fraguado del cemento comienza en el momento que éste se pone en contacto con el agua. A las 24 horas se desmoldan los testigos y son trasladados a una bandeja con agua para el curado y endurecimiento.

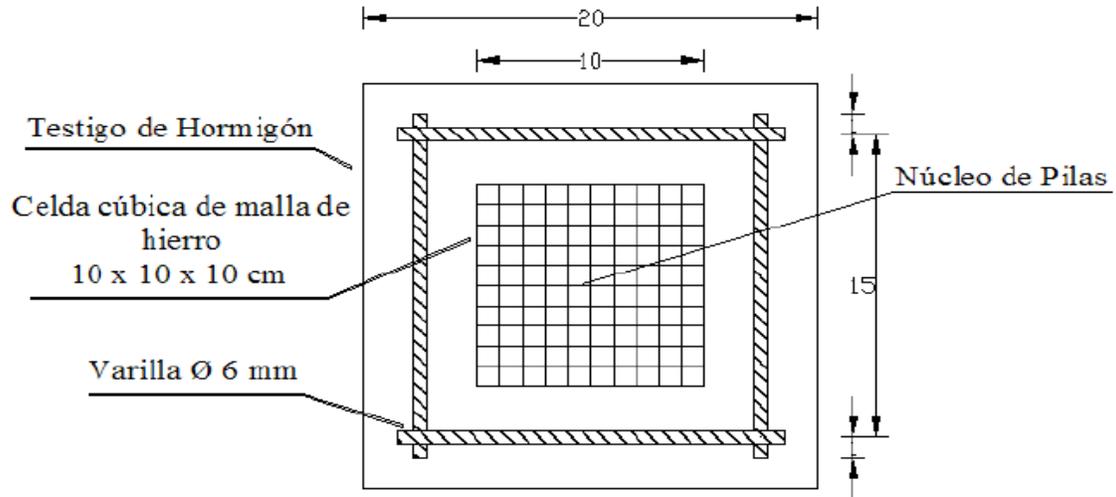


Figura 26. Vista frontal del testigo de Hormigón.
Fuente: Ortiz, 2009 (33).

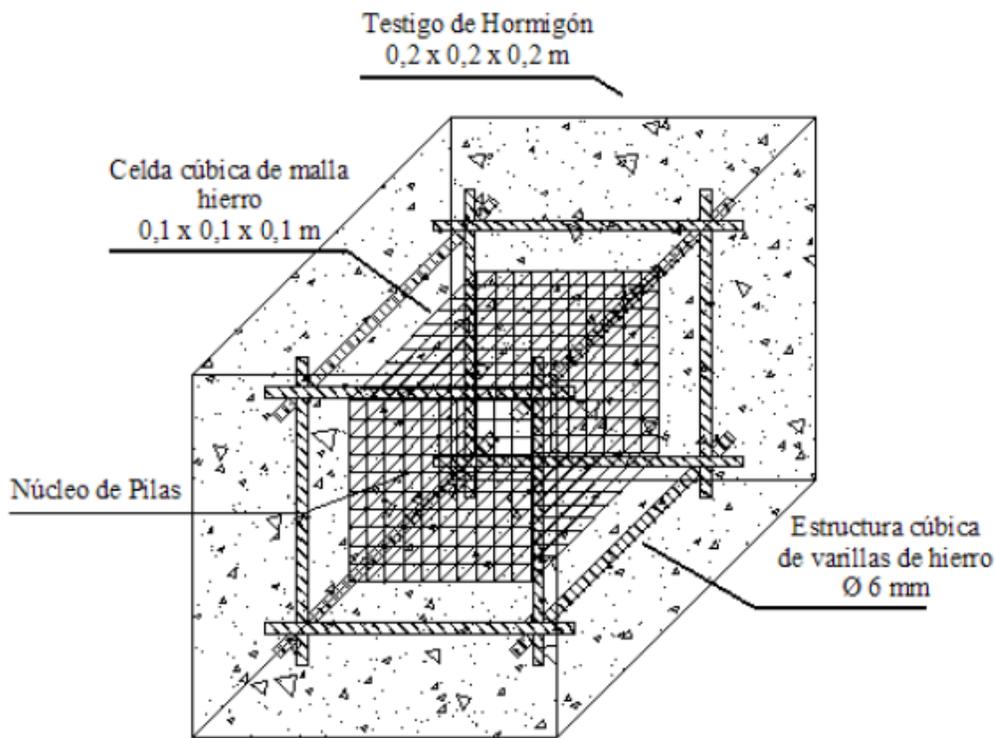


Figura 27. Modelo de Encapsulamiento propuesto por Ortiz.
Fuente: Ortiz, 2009 (33).

APÉNDICE A. Cálculos del aumento de la vida útil de la célula 1B

Datos de la Célula 1B

- Dimensiones: 15 m x 15m x 11m
- Volumen: 2475 m³
- Vida útil: 12,85 años

Datos de los contenedores

- Diámetro: 0.5 m
- Altura: 1 m
- Densidad aparente: 0,2712 ton/ estación de 200L
- Promedio ingresos “pilhas e baterias”: 1, 0084 ton/mes

$$Uso\ de\ la\ célula\ 1B = \frac{2475\ m^3}{12,85\ años} = 192,61\ m^3/año$$

Cantidad de bombonas que caben en la Célula 1B

$$Lado = \frac{15\ m\ lado\ célula}{0.5\ m\ diámetro\ estación} = 30\ estaciones$$

$$Ancho = \frac{15\ m\ ancho\ célula}{0.5\ m\ diámetro\ estación} = 30\ estaciones$$

$$Profundidad = \frac{11\ m\ alto\ célula}{1\ m\ altura\ estación} = 11\ estaciones$$

$$Capacidad\ célula\ 1B = 30 \times 30 \times 11 = 9\ 900\ estaciones$$

$$Espacio\ utilizado = \frac{9\ 900\ estaciones}{2\ 475\ m^3} = 4\ estaciones/m^3$$

$$Encapsulamiento\ pilas = \frac{1\ estación\ 200\ L}{0,2712\ ton} \times \frac{1,0084\ ton\ ingreso}{mes}$$

$$= 3,71\ estaciones/mes$$

$$Cantidad\ de\ bombonas = \frac{3,71\ estaciones}{mes} \times \frac{12\ meses}{año} \times 12,85\ años$$

$$= 572\ estaciones$$

$$\text{Espacio ocupado pilas} = \frac{3,71 \text{ estañón}}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{4 \text{ estañones}} = 0,9275 \text{ m}^3/\text{mes}$$

$$\frac{0,9275 \text{ m}^3}{\text{mes}} \times \frac{12 \text{ meses}}{\text{año}} = \mathbf{11,13 \text{ m}^3/\text{año}}$$

$$\frac{192,61 \text{ m}^3}{\text{año}} - \frac{11,13 \text{ m}^3}{\text{año}} = \frac{\mathbf{181,477 \text{ m}^3}}{\text{año}}$$

$$\mathbf{Vida útil sin encapsular baterías} = \frac{181,477 \text{ m}^3}{\text{año}} \times X = 2475 \text{ m}^3$$

$$\mathbf{x = 13,64 \text{ años}}$$

$$\text{Aumento vida útil Célula 1B} = 13,64 \text{ años} - 12,85 \text{ años} = 0,79 \text{ años}$$

$$0,79 \text{ años} \times \frac{12 \text{ mees}}{\text{año}} = 9,5 \text{ meses}$$

APÉNDICE B. Cálculos de la eficiencia de los tamizados

Tabla 10. Masas de resultados de cernido y rechazo de cada tamizado.

Clase	Tamizado 1		Tamizado 2		Tamizado 3		Total (g)
	Rechazo (g)	Cernido (g)	Rechazo (g)	Cernido (g)	Rechazo (g)	Cernido (g)	
1	0,00	903,64	656,15	247,49	247,49	0,00	903,64
2	0,00	1902,21	1048,68	861,53	861,53	0,00	1910,21
3	0,00	72,75	0,00	72,75	0,00	72,75	72,75
4	2759,89	531,90	501,82	0,00	0,00	0,00	3261,71
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
6	0,00	276,04	20,15	255,91	255,91	0,00	276,06
Total	2759,89	3686,54	2226,80	1437,68	1364,93	72,75	6424,37
A		6446,43		3664,48		1437,68	

Se calculó la eficiencia de cada tamizado de la siguiente manera:

Siendo;

A: masa de material procesado (Alimentación)

C: masa del cernido

R: masa del rechazo

Índice de cernido

$$I_c = \frac{C}{A} \times 100$$

$$I_{c1} = \frac{3686,54}{6446,43} \times 100 = 57\%$$

$$I_{c2} = \frac{1437,68}{3664,48} \times 100 = 39\%$$

$$I_{c3} = \frac{72,75}{1437,68} \times 100 = 5\%$$

Índice de Rechazo

$$I_r = \frac{R}{A} \times 100$$

$$I_{R1} = \frac{2759,89}{6446,43} \times 100 = 43\%$$

$$I_{R2} = \frac{2226,80}{3664,48} \times 100 = 61\%$$

$$I_{R3} = \frac{1364,93}{1437,68} \times 100 = 95\%$$

Así, se comprueba que no hubo pérdidas

$$I_c + I_r = 100$$

$$\textit{Tamizado 1: } 57\% + 43\% = 100\%$$

$$\textit{Tamizado 2: } 39\% + 61\% = 100\%$$

$$\textit{Tamizado 3: } 5\% + 95\% = 100\%$$

La eficacia del proceso puede ser calculada la recuperación de las Clases en cada tamizado, tanto desde el punto de vista del Cernido, como del punto de vista del Rechazo.

Recuperación desde el punto de vista del Rechazo,

$$E_R = \frac{F_R}{F_A} \times 100$$

Muestra de cálculo de eficiencia del tamizado 1 para la Clase 4 (Ión de Litio)

$$E_{R1 \text{ clase } 4} = \frac{2759,89 \text{ Kg}}{3261,71 \text{ Kg}} \times 100 = 84\%$$

Recuperación desde el punto de vista del Cernido,

$$E_C = \frac{F_C}{F_A} \times 100$$

Muestra de cálculo del tamizado 3 para la Clase 3 (Baterías de botón)

$$E_{c3 \text{ clase } 3} = \frac{72,75 \text{ Kg}}{72,75 \text{ Kg}} \times 100 = 100\%$$

Donde:

E_R : *Eficiencia del Rechazo*

F_R : *Porción de cada Clase en el Rechazo*

F_A : *Porción de cada Clase en la Alimentación total*

E_C : *Eficiencia del Cernido*

F_C : *Porción de cada Clase en el Cernido*

APÉNDICE C. Cálculos de la propuesta macro encapsulamiento de baterías en bloques de concreto (1 \$= R\$2).

Tabla 11. Evaluación económica de encapsulamiento en bloques en la CTRB.

Materiales	Valor (R\$)
Concreto	3360
Chatarra de hierro	37,5
Mano de obra	696
Costo de la confección del bloque	4093,5
Costo de encapsular en estañones	986
Costo de comprar 1000 bloques hechos	2900
Costo final de la confección de los bloques	207,5
Costo final del encapsulamiento por tonelada de baterías	61



Figura 28. Macroencapsulamiento de baterías en bloques de concreto en la CTRB.