

## **TOMADA DE DECISÃO NA ESCOLHA DO PROCESSO DE RECICLAGEM E RECUPERAÇÃO DE METAIS DAS PLACAS ELETRÔNICAS ATRAVÉS DA ANÁLISE HIERÁRQUICA**

**Renato de Castro Vivas (\*), Flávio Pietrobon Costa.**

\*Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC, [renatuvivas@hotmail.com](mailto:renatuvivas@hotmail.com).

### **RESUMO**

Existem atualmente diversas técnicas e metodologias para realizar a reciclagem e recuperação de metais das placas eletrônicas como os processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos, eletrometalúrgicos e biotecnológicos. A tomada de decisão na escolha do processo mais adequado na reciclagem e recuperação de metais provenientes de placas eletrônicas é o foco desta pesquisa. O método de pesquisa empregado é a utilização da metodologia de Análise Hierárquica dos Processos pelo autor Saaty. Estabelecendo dois critérios na escolha, o primeiro aspecto ambiental e o segundo eficiência produtiva, chegamos a seguintes questionamentos: alguns processos são altamente impactantes ao meio ambiente, porém com certa eficiência; outros processos não tem boa eficiência produtiva, porém não impacta o meio ambiente. A utilização de dois ou mais processos diferentes poderia atenuar os impactos e aumentar a eficiência a reciclagem dos resíduos eletrônicos.

**Palavras-Chave:** Meio Ambiente, Processos de Reciclagem, Análise Hierárquica.

### **INTRODUÇÃO**

Os processos de reciclagem e recuperação de metaisOs produtos eletrônicos são constituídos por materiais tóxicos ao meio ambiente como o mercúrio, chumbo, arsênio, berílio. Porém este estudo foi direcionado em outros tipos de elementos que constituem os eletroeletrônicos, os elementos nobres, por exemplo; ouro, prata, cobre, zinco, platina, entre outros. Como a maior parte desses elementos nobres estão localizados nas placas eletrônicas, também chamadas de circuitos integrados, esta pesquisa é com este foco.

O aspecto econômico da reciclagem de resíduos sólidos é muito significante. A área da economia dos materiais mostra que com o reaproveitamento de certos resíduos proporciona consideravelmente a mitigação da pressão no meio ambiente na exploração dos recursos naturais, no descarte em local inadequado, além da criação de um novo nicho econômico. O objetivo da pesquisa é a utilização da técnica da Análise Hierárquica para a escolha do processo mais adequado na reciclagem de metais provenientes dos resíduos sólidos de placas eletrônicas.

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **PROCESSOS DE RECICLAGEM DE ELETRÔNICOS**

A reciclagem de placas eletrônicas é um processo bastante complexo devido à grande variedade e complexidade da sua composição e também devido à difícil compatibilidade com o meio ambiente. As tecnologias usadas para a reciclagem das PCI incluem processos mecânicos, químicos e térmicos. Os principais processos são: Pirometalurgia, Hidrometalurgia, Eletrometalurgia, Processamento Mecânicos e Biotecnológicos.

Os processos pirometalúrgicos podem incluir pirólise, fusão, incineração e sinterização. Este processo é essencialmente um mecanismo de concentração de metais em um a fase metálica e a rejeição da maioria dos materiais não metálicos. A queima ou incineração é a forma mais comum de eliminar os materiais poliméricos e materiais não metálicos presentes nos concentrados de metais. A fusão de um concentrado de metal bruto pode produzir ligas metálicas diversas podendo ser refinadas por processos eletrometalúrgicos ou pirometalúrgicos. Processos pirometalúrgicos são comumente utilizados na reciclagem de metais preciosos e Szczygiel (1998) em sua pesquisa observou que é possível recuperar metais preciosos de materiais

provenientes de sulfetos minerais através de uma redução direta sem a contaminação da atmosfera, pois as emissões de dióxido de enxofre são pequenas e o enxofre permanece na escória, mas é necessário o uso de chumbo na carga do forno para coletar os metais preciosos.

O processamento hidrometalúrgico consiste de uma série de ataques de soluções ácidas ou cáusticas para dissolução do material sólido. Estas soluções são então submetidas a processos de separação como precipitação, extração, cementação, filtração, trocas iônicas e destilação para separar e concentrar os metais escolhidos. Kelsall, (2002) estudou a reciclagem de metais a partir de circuitos integrados através de dissolução com ácido clorídrico e eletrodeposição. Vejnar (1990) também pesquisou a recuperação de ouro contido em placas de circuito impresso. Utilizando o processo de lixiviação nas placas de circuito impresso em uma solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> durante 24 dias, ele obteve como resultado 0,875 gramas de ouro do total da amostra de placa de circuito impresso que era de 350 gramas.

O uso microrganismos como bactérias em reciclagem de sucatas eletrônicas está citado em alguns estudos mais especificamente na reciclagem de ouro e na digestão de outros metais presentes em placas eletrônicas. Nas experiências descritas por Sum (1991) as placas eletrônicas foram tratados em uma solução contendo 10g.L<sup>-1</sup> de Fe<sup>+3</sup> e uma cultura de bactéria (YTL-2) com pH < 2,5 e temperatura de 20 a 35°C. Após 2 dias, 97% do ouro foi recuperado em forma laminar. Os outros elementos, que normalmente mantém sua forma original, teve sua separação de uma maneira mais fácil. A solução foi reaproveitada e reciclada depois da regeneração das bactérias. No estudo de Brandl (28), processos biotecnológicos foram aplicados para recuperação de metais de sucatas eletrônicas. Bactérias (*Thiobacillus thiooxidans*, *ferrooxidans*) e fungos (*Aspergillus niger*, *Penicillium simplicissimum*) crescem na presença de sucata eletrônica. Ambos os fungos foram capazes de mobilizar 65% de cobre e estanho e mais de 95% de alumínio, níquel, chumbo e zinco.

Hoffmann (1992) citou em suas pesquisas que a maior parte dos processos eletrometalúrgicos ligados com a reciclagem de placas eletrônicas são procedimentos de refinamento para recuperar no fim o metal puro. Procedimentos eletrometalúrgicos são normalmente executados em eletrólitos de sais fundidos ou aquosos. Ganni (1995) em sua pesquisa descreve as técnicas para reciclar descargas aquosas de procedimentos de polimento, deposição, entre outros, com metais contidos. Há diversos estudos baseados em técnicas eletrometalúrgicas com o objetivo de reciclar metais de diversos tipos de resíduos. Scott et al (1997) pesquisaram a recuperação de metais de soluções utilizadas na produção de placas eletrônicas, em específico o cobre, o chumbo e o estanho. Nesta pesquisa três procedimentos de reciclagem foram aplicados: a reciclagem eletroquímica de todos os metais, a combinação de deposição eletroquímica de cobre e a precipitação de estanho e chumbo com uma sequência de um processo pirometalúrgico.

Os processos mecânicos de segregação e reciclagem de materiais têm sido usados como parte de etapas de tratamento e beneficiamento de minérios na indústria metalúrgica primária. A técnica de processamento mecânico de sucatas é visto, normalmente, como um pré tratamento para o reaproveitamento dos materiais e associa diferentes estágios de separação de compostos e elementos dos resíduos. Hoje existem vários estudos para as técnicas do processamento mecânico de placas eletrônicas, onde existe uma grande mistura de materiais. Os processos mecânicos são divididos em cominuição, classificação e separação.

## **ANÁLISE HIERÁRQUICA DOS PROCESSOS**

O princípio básico da Análise Hierárquica é que um problema de tomada de decisão pode ser estruturado de maneira hierárquica, onde o topo da hierarquia contém a sua descrição geral e nos níveis mais abaixo estão os critérios ou atributos que são considerados para a análise. Esses critérios poderão ser divididos em outros critérios e assim sucessivamente. O último nível da estrutura hierárquica será encontrado as alternativas destacadas na análise hierárquica.

## **MÉTODOS**

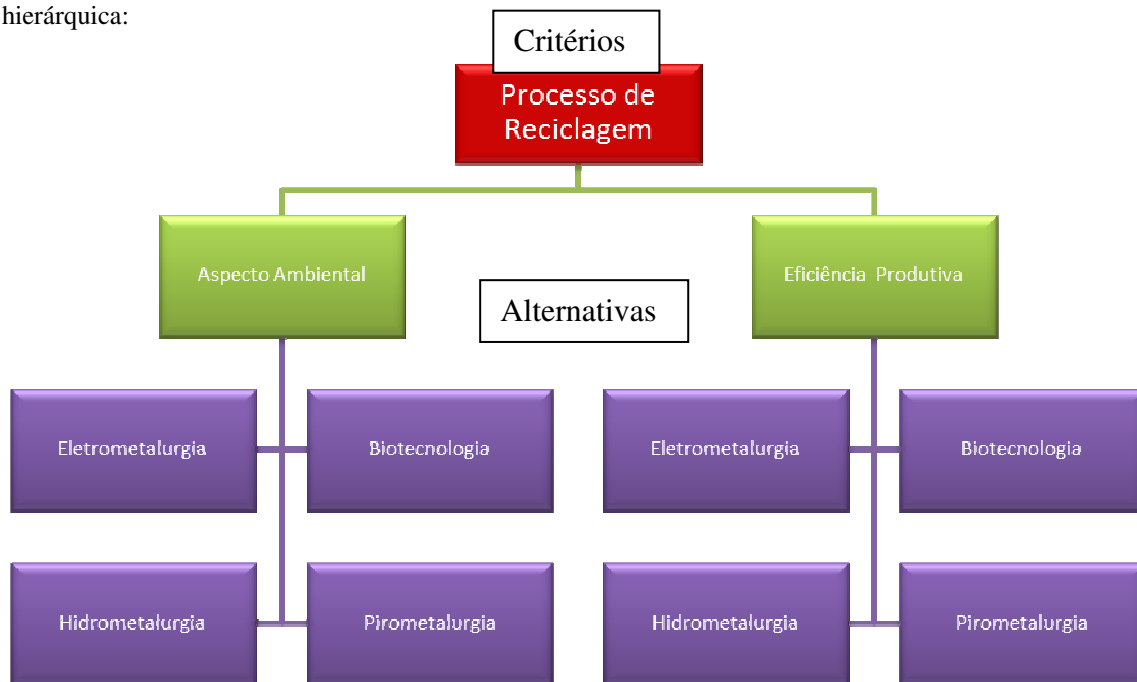
O tipo de pesquisa é predominantemente exploratório com análises qualitativas. Utilizando a metodologia de Análise Hierárquica que segundo (Gomes 2007) o método de análise hierárquica é um dos métodos multi-atributos mais utilizados e difundidos no mercado mundial. Isso se deve, provavelmente, a duas razões. A

primeira é o seu pioneirismo, foi desenvolvido em meados da década de setenta pelo pesquisador americano Thomas L. Saaty, quando se começava a abordar problemas complexos sob a visão de múltiplos critérios simultâneos. Não havia, na época, muitas abordagens desse tipo. A segunda é o seu caráter simples e intuitivo. Ao conhecer as suas premissas, rapidamente o usuário começa a utilizá-lo, estruturando critérios, atribuindo valores e selecionando alternativas. Em inglês esse método é conhecido como *Analytic Hierarchy Process* sendo muito usada a sua sigla de referência AHP.

## RESULTADOS

### ANÁLISE HIERÁRQUICA DOS PROCESSOS

A análise compreendida neste estudo qualitativo que visa principalmente à escolha mais adequada de um processo capaz de recuperar e reciclar resíduos eletrônicos provenientes de computadores. Esta escolha será realizada através da metodologia de Análise Hierárquica de Processo (AHP) de Saaty 1991. A definição de processo mais adequado seguirá os critérios de aspectos ambientais e de eficiência produtiva. O primeiro critério será o de eficiência produtiva onde temos parâmetros de tempo de processo, percentual de recuperação/reciclagem e custos do processo. Segue abaixo a ilustração do diagrama de análise hierárquica:



**Figura 01: Diagrama da Análise Hierárquica. Fonte: Próprio Autor.**

A escala será a fundamental de Saaty (1991) para os julgamentos comparativos. Segue abaixo:

Escala numérica	Escala Verbal
1	Mesma Importância
3	Importância moderada de um sobre o outro
5	Importância essencial ou forte
7	Importância muito forte
9	Importância Extrema

Quadro 01: Escala Fundamental de Saaty. Fonte: (Saaty 1991)

## ASPECTOS AMBIENTAIS

O aspecto ambiental tem que ser levado em consideração, pois apesar de ser um processo de mitigação e recuperação do meio ambiente através do gerenciamento de resíduos estes processos podem ainda ser mais danosos ao meio ambiente e a saúde do ser humano. Como por exemplo, a incineração de resíduos sem controle poderá acarretar num maior dano ambiental do que já se tinha.

## CONSUMO DE ENERGIA

Inicialmente devemos estabelecer a escolha do primeiro parâmetro do aspecto ambiental. Que segundo alguns autores e pesquisadores da área são de importância significativa.

A Hidrometalurgia segundo Veit (2005) tem como principal vantagem com os outros processos a não necessidade da utilização de qualquer recurso energético significativo como energia elétrica ou geradores de energia à combustão. A Biotecnologia que seria um processo semelhante à Hidrometalurgia, também não necessita de recursos energéticos significativos. A Pirometalurgia utiliza de muita energia. Pois para atingir altas temperaturas são necessárias quantidades grandes de energia, então a Pirometalurgia seria o processo que mais necessita de recursos energéticos. A Eletrometalurgia utiliza recursos energéticos significativos, porém não se aproxima com os processos pirometalúrgicos.

Matriz de Preferências – Critérios e Normalização da Matriz

**Tabela 01: Matriz de preferências do critério de consumo de energia. Fonte: Próprio Autor.**

	Pirometalurgia	Biotecnologia	Hidrometalurgia	Eletrometalurgia	PML
Pirometalurgia	1,00	7,00	9,00	5,00	0,64
Biotecnologia	0,14	1,00	3,00	0,33	0,10
Hidrometalurgia	0,11	0,33	1,00	0,20	0,05
Eletrometalurgia	0,20	3,00	5,00	1,00	0,21
SOMA	1,45	11,33	18,00	6,53	

Para cada nó de julgamento da hierarquia calcula-se a matriz normalizada. O cálculo compreende o somatório dos elementos de cada coluna e a divisão de cada elemento da coluna pelo respectivo somatório. A matriz que resulta do processo é chamada de matriz normalizada. Cálculo para matriz normalizada  $a_{ij}/S_j$ , ou seja:  $a_{11} = 1/1,73 \rightarrow a_{11} = 0,58$ . Equação (1)

Cálculo da Prioridade Média Local (PML): as PMLs são as médias das linhas dos quadros normalizados, ou vetor de prioridades local (auto vetor), ou ainda o peso relativo calculado para cada um dos nós de julgamento.

Obtenção da matriz V (seguindo tabela o IR = 0,9):

**Tabela 02: Razão de consistência. Fonte: Próprio Autor.**

AV	$\lambda_{máx}$	IC	RC
2,82			
0,41			
0,19	4,17	0,058002883	0,064447648
0,88			

Saaty sugere que é aceitável uma razão de consistência (RC) menor que 0,10. Ou seja, 0,064 é consistente.

## CONSUMO DE ÁGUA

Matriz de Preferências – Critérios e Normalização da Matriz

A Hidrometalurgia como o próprio nome já diz, é um processo que se utiliza de materiais líquidos para a sua realização. Ou seja, este processo tem como principal desvantagem no aspecto ambiental o consumo grande de água. A biotecnologia é um processo semelhante da Hidrometalurgia, com isso a escala deste critério fica com igualdade da Hidrometalurgia.

A Pirometalurgia é um processo que não utiliza água propriamente dita no seu desenvolvimento, porém para o resfriamento das máquinas e caldeiras pode ser utilizado água, no entanto esta água é reaproveitada no próprio processo. A Eletrometalurgia utiliza-se de água no seu processo, no entanto na escala fica atrás dos processos hidrometalúrgicos e biotecnológicos.

**Tabela 03: Matriz de preferências do critério de consumo de água. Fonte: Próprio Autor.**

	Hidrometalurgia	Pirometalurgia	Eletrometalurgia	Biotecnologia	PML
Hidrometalurgia	1,00	5,00	3,00	1,00	0,39
Pirometalurgia	0,20	1,00	0,33	0,20	0,07
Eletrometalurgia	0,33	3,00	1,00	0,33	0,15
Biotecnologia	1,00	5,00	3,00	1,00	0,39
SOMA	2,53	14,00	7,33	2,53	

Obtenção da matriz V (seguindo tabela o IR = 0,9):

**Tabela 04: Razão de consistência. Fonte: Próprio Autor.**

AV	$\lambda_{\text{máx}}$	IC	RC
1,58			
0,28	4,04	0,016251828	0,014626645
0,62			
1,58			

Saaty sugere que é aceitável uma razão de consistência (RC) menor que 0,10. Ou seja, 0,0146 é consistente.

## GERAÇÃO DE RESÍDUOS

Segundo Veit (2005) os processos hidrometalúrgicos geram grande volume de soluções contendo metais base que são corrosivos e tóxicos, gerando efluentes totalmente poluentes. No entanto emissões gasosas e sólidas são praticamente nulas neste tipo de processo. A Eletrometalurgia segundo Veit (2005) não geram resíduos significativos de sólidos, líquidos ou gasosos, sendo que até o eletrólito pode ser reciclado.

A biotecnologia não geram resíduos significativos de sólidos, líquidos ou gases. Processos pirometalúrgicos segundo Szczygiel et al (1998) são bastante usados na recuperação de metais preciosos e os autores mostram em seu artigo que é possível recuperar metais preciosos de materiais sulfurosos (sulfetos minerais) através de uma redução direta sem contaminar a atmosfera, já que as emissões de dióxido de enxofre são mínimas e o enxofre permanece na escória. Porém a Pirometalurgia com materiais poliméricos e outros materiais isolantes são uma fonte de poluição do ar através da formação de dioxinas e furanos. Processos pirometalúrgicos

também geram resíduos sólidos que não são reciclados como escórias de cerâmicos, polímeros e metais de difícil reciclagem.

Matriz de Preferências – Critérios e Normalização da Matriz

**Tabela 05: Matriz de preferência do critério de resíduos. Fonte: Próprio Autor.**

	Hidrometalurgia	Biotecnologia	Eletrometalurgia	Pirometalurgia	PML
Hidrometalurgia	1,00	5,00	3,00	1,00	0,39
Biotecnologia	0,20	1,00	0,33	0,20	0,07
Eletrometalurgia	0,33	3,00	1,00	0,33	0,15
Pirometalurgia	1,00	5,00	3,00	1,00	0,39
SOMA	2,53	14,00	7,33	2,53	

Obtenção da matriz V (seguindo tabela o IR = 0,9):

**Tabela 06: Razão de consistência. Fonte: Próprio Autor.**

AV	$\lambda$ máx	IC	RC
1,58			
0,28	4,04	0,016251828	0,014626645
0,62			
1,58			

Avaliação global de todas as alternativas

Na definição do objetivo global dos critérios podemos fazer a seguinte ponderação, a prioridade é que se tenham processos de reciclagem de resíduos que não gerem resíduos, ou que a redução dos resíduos seja significativa. A segunda prioridade é o consumo energia, já que a energia dependendo de sua fonte é alta geradora de impactos ambientais. A terceira então seria o consumo de água, pois como nosso país tem muitas fontes de água e estes processos não necessitam de tratamentos significativos da água para a efetividade do processo, então fica sendo a terceira prioridade na escala de ponderação dos objetivos globais.

**Tabela 06: Objetivos globais ponderados. Fonte: Próprio Autor.**

	RESÍDUOS	CONSUMO DE ÁGUA	CONSUMO DE ENERGIA	PML
RESÍDUOS	1,00	5,00	3,00	0,65
CONSUMO DE AGUA	0,20	1,00	0,60	0,13
CONSUMO DE ENERGIA	0,33	1,67	1,00	0,22
SOMA	1,53	7,67	4,60	

Calculando-se os critérios e as prioridades médias locais podemos chegar a seguinte avaliação global das alternativas, veja abaixo:

**Tabela 07: Avaliação final global das alternativas. Fonte: Próprio Autor.**

PROCESSOS	CONSUMO DE ENERGIA	CONSUMO DE AGUA	RESÍDUOS (Sólidos, Líquidos, Gasosos)	AVALIAÇÃO GLOBAL DAS ALTERNATIVAS
Pirometalurgia	0,64	0,07	0,39	0,51
Eletrometalurgia	0,21	0,15	0,15	0,19
Hidrometalurgia	0,05	0,39	0,39	0,17
Biotecnologia	0,10	0,39	0,07	0,13

A ordem de prioridades na escolha do processo mais adequado seguindo aspectos ambientais é:



**Figura 02: Ordem de prioridades na escolha do processo de reciclagem. Fonte: Próprio Autor.**

A biotecnologia seguindo a avaliação final no aspecto ambiental é a primeira escolha seguida da Hidrometalurgia. O processo que ficou em último na avaliação foi o da Pirometalurgia, ou seja, para o aspecto ambiental este processo não é adequado.

## ASPECTOS DE EFICIÊNCIA

A proteção ao meio ambiente não deve ir contra ao progresso econômico e de eficiência, deve sim ir de lado à lado com este aspecto pois o retorno financeiro é fundamental para a prosseguimento das pesquisas e dos processos tecnológicos do mundo. Sendo assim os aspectos de eficiência produtiva é fundamental para o estabelecimento do processo mais adequado na reciclagem e recuperação de metais provenientes de resíduos eletrônicos.

## TEMPO DE PROCESSO

Veit (2005) As principais limitações dos processos biotecnológicos são os longos períodos de “ataque” e a necessidade dos metais estarem expostos, como uma camada superficial.

Na Hidrometalurgia Vejnar (1990) estudou a recuperação de ouro contido em PCI. Ele fez uma lixiviação de PCI em uma solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> durante 24 dias e obteve como resultado 0,25% em peso de ouro do total da amostra de PCI que era de 350 gramas. Como desvantagem pode-se citar o tempo necessário. Ou seja, assim como a Biotecnologia processos hidrometalúrgicos são demorados, requerem semanas, ou até meses para a recuperação e reciclagem de metais em eletrônicos. Este tipo de processo também requer um breve tratamento mecânico para se reduzir o volume e aumentar a área

Segundo Veit (2005) o processo pirometalúrgico aceita qualquer tipo de sucata eletrônica, não requer um pré-tratamento e tem poucas etapas.

Segundo Veit (2005) na eletrometalurgia poucas etapas todos os metais preciosos podem ser dissolvidos simultaneamente ou seletivamente (se necessário), e o substrato a base de cobre permanece inalterado.

Matriz de Preferências – Critérios e Normalização da Matriz

**Tabela 08: Matriz de preferências do critério tempo de processo. Fonte: Próprio Autor.**

	Hidrometalurgia	Biocologia	Eletrometalurgia	Pirometalurgia	PML
Hidrometalurgia	1,00	3,00	5,00	7,00	0,59
Biocologia	0,33	1,00	1,50	3,00	0,21
Eletrometalurgia	0,20	0,60	1,00	1,40	0,12
Pirometalurgia	0,14	0,43	0,71	1,00	0,08
SOMA	1,68	5,03	8,21	12,40	

Obtenção da matriz V (segundo tabela o IR = 0,9)

**Tabela 09: Razão de Consistência. Fonte: Próprio Autor.**

AV	$\lambda_{\text{máx}}$	IC	RC
2,39			
0,83	4,05	0,01527	0,01697
0,48			
0,34			

Saaty sugere que é aceitável uma razão de consistência (RC) menor que 0,10. Ou seja, 0,01697 é consistente.

## PERCENTUAL DE RECUPERAÇÃO

Na pirometalurgia os metais podem ser perdidos através da volatilização de seus cloretos. Componentes cerâmicos e vidros das sucatas aumentam a quantidade de escória no forno, aumentando as perdas de metais nobres e de metais base. A recuperação de outros metais é baixa (ex. Sn e Pb) ou praticamente impossível (ex. Al e Zn).

De acordo com La Marca et al.(2002) na hidrometalurgia eles também avaliaram a recuperação de metais preciosos em circuitos impressos através da utilização de tiuréia, água-régia, HCl-NaCl e soluções de cianeto, a fim de recuperar paládio, ouro e prata. Eles concluíram que usando água-régia foi possível recuperar 97% do ouro e 95% da prata. Também concluíram que a solução de HCl-NaCl foi ineficiente na recuperação do paládio, pois atingiu apenas 11%.

De acordo com Sum (1991) no experimento biotecnológico descrito, a sucata (resíduos dourados de equipamentos eletrônicos) foi tratada em uma solução contendo 10 g.L-1 de Fe+3 e uma cultura de bactéria (YTL-2) com pH < 2,5 e temperatura de 20 – 35oC. Depois de 2 dias, 97% do ouro foi recuperado na forma de lâmina. No trabalho de Brandl (2001), processos microbiológicos foram aplicados para mobilizar metais de sucatas eletrônicas. Bactérias (*Thiobacillus thiooxidans*, ferroxidans) e fungos (*Aspergillus niger*, *Penicillium simplicissimum*) crescem na presença de sucata eletrônica. Ambos os fungos foram capazes de mobilizar 65% de Cu e Sn e mais de 95% de Al, Ni, Pb e Zn. As bactérias lixiviam mais de 90% do Cu, Zn, Ni e Al.

Na eletrometalurgia o concentrado de metais preciosos a partir da eletrólise representa 95 – 97% do metal encontrado na sucata. A quantidade de metais preciosos no lodo anódico depois de fundição e de eletrólise como refinação é muito baixo.

Matriz de Preferências – Critérios e Normalização da Matriz



**Tabela 10: Matriz de Preferências do critério percentual de recuperação. Fonte: Próprio Autor.**

X	Pirometalurgia	Hidrometalurgia	Biotecnologia	Eletrometalurgia	PML
<b>Pirometalurgia</b>	1,00	3,00	5,00	7,00	0,59
<b>Hidrometalurgia</b>	0,33	1,00	1,50	2,50	0,20
<b>Biotecnologia</b>	0,20	0,60	1,00	1,50	0,12
<b>Eletrometalurgia</b>	0,14	0,50	0,80	1,00	0,09
<b>SOMA</b>	1,68	5,10	8,30	12,00	

Obtenção da matriz V (segundo tabela o IR = 0,9)

**Tabela 11: Razão de consistência. Fonte: Próprio Autor.**

AV	$\lambda_{\text{máx}}$	IC	RC
2,42			
0,80	4,08	0,027711294	0,030790327
0,49			
0,37			

Saaty sugere que é aceitável uma razão de consistência (RC) menor que 0,10. Ou seja, 0,030790 é consistente.

## CUSTO DOS PROCESSOS

De acordo com Veit (2005) o processo hidrometalúrgico tem uma redução dos custos de processo (ex. baixo consumo de energia e reciclagem dos reagentes químicos). A principal vantagem do processo biotecnológico é que é simples, barato e fácil de operar.

Matriz de Preferências – Critérios e Normalização da Matriz

**Tabela 12: Matriz de preferência do critério custo dos processos. Fonte: Próprio Autor.**

X	Eletrometalurgia	Pirometalurgia	Hidrometalurgia	Biotecnologia	PML
<b>Eletrometalurgia</b>	1,00	3,00	5,00	5,00	0,58
<b>Pirometalurgia</b>	0,33	1,00	1,67	1,67	0,19
<b>Hidrometalurgia</b>	0,20	0,60	1,00	1,00	0,115
<b>Biotecnologia</b>	0,20	0,60	1,00	1,00	0,115
<b>SOMA</b>	1,73	5,20	8,67	8,67	

a. Obtenção da matriz V (segundo tabela o IR = 0,9):

**Tabela 13: Razão de consistência. Fonte: Próprio Autor.**

AV	$\lambda_{máx}$	IC	RC
2,31			
0,77	4,0005	0,000167	0,000185
0,46			
0,46			

Avaliação global de todas as alternativas

Na definição do objetivo global dos critérios podemos fazer a seguinte ponderação, a prioridade é que se tenham processos de reciclagem de resíduos que tenham eficiência produtiva, ou seja, tempo de processo baixo, percentual de recuperação alta e com isso o custo do processo o menor possível. Assim a primeira prioridade é o custo do processo, o procedimento de recuperação e reciclagem dos metais tem que ser viável economicamente. A segunda prioridade é o percentual de recuperação, onde a porcentagem que pode ser recuperada de metais deve ser significativa. A terceira prioridade é o tempo de processo, quanto menor a duração do processo, melhor.

**Tabela 14: Objetivos globais. Fonte: Próprio Autor.**

	TEMPO DE PROCESSO	CUSTO DO PROCESSO	PERCENTUAL DE RECUPERAÇÃO	PML
<b>TEMPO DE PROCESSO</b>	1,00	5,00	3,00	0,652173913
<b>CUSTO DO PROCESSO</b>	0,20	1,00	0,60	0,130434783
<b>PERCENTUAL DE RECUPERAÇÃO</b>	0,33	1,67	1,00	0,217391304
<b>SOMA</b>	1,53	7,67	4,60	

Calculando-se os critérios e as prioridades médias locais podemos chegar a seguinte avaliação global das alternativas, veja abaixo:

**Tabela 15: Avaliação final global das alternativas. Fonte: Próprio Autor.**

X	TEMPO DE PROCESSO	CUSTO DO PROCESSO	Percentual de Recuperação	AVALIAÇÃO GLOBAL DAS ALTERNATIVAS
<b>Pirometalurgia</b>	0,08	0,19	0,59	0,21
<b>Eletrometalurgia</b>	0,12	0,58	0,09	0,17
<b>Hidrometalurgia</b>	0,59	0,12	0,20	0,44
<b>Biocnologia</b>	0,21	0,12	0,12	0,18

A ordem de prioridades na escolha do processo mais adequado seguindo parâmetros ambientais é



**Figura 03: Ordem de prioridades na escolha do processo de reciclagem. Fonte: Próprio Autor.**

Na avaliação final das alternativas seguindo critérios de eficiência produtiva nós temos como primeiro processo a Eletrometalurgia seguido da Biotecnologia, Pirometalurgia e por ultimo a Hidrometalurgia.

## **CONCLUSÕES**

Com o estudo das diversas técnicas e metodologias de reciclagem e recuperação dos metais nas placas eletrônicas poderemos identificar utilizando a técnica da Análise Hierárquica Processos o melhor método para este processo, no que diz respeito à eficiência produtiva e impactos ambientais. No aspecto ambiental, os processos biotecnológicos e hidrometalúrgicos são mais adequados, enquanto que a eletrometalurgia e pirometalurgia são mais impactantes ao meio ambiente. No aspecto de eficiência produtiva os processos de eletrometalurgia e biotecnologia são mais adequados, enquanto que os processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos são menos eficientes.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. BRANDL, H., BOSSHARD, R., WEGMANN, M.. Computer-munching microbes: metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi. *Hydrometallurgy* 59, p. 319-326, 2001
2. GANNI, H., BREZOVEC, P.. Recycle/recovery techniques for aqueous discharges from metal finishing operations. *Proceedings of the Symposium on Electrochemical Technology Applied to Environmental Problems. Volume95-12. The Electrochemical Society, Inc. p. 53-71. 1995.*
3. GOMES, L. F. A. M. *Teoria da Decisão*. São Paulo: Thomson Learning, 2007.
4. HOFFMANN, J. E.. Recovering precious metals from electronic scrap. *JOM*, July, 1992
5. KELSALL, G. H., et al. Metal recovery from electronic scrap by leaching and electrowinning. In: *Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economic Aspects*, 16-20 Junho, Lulea, Suécia, 2002.
6. LA MARCA, F., MASSACCI, P., PIGA, L. Recovery of precious metals from spent electronic boards. In: *Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economic Aspects*, 16-20 Junho, Lulea, Suécia, 2002.
7. SCOTT, K. et al. Electrochemical recycling of tin, lead and copper from stripping solution in the manufacture of circuit boards. *Resources, Conservation and Recycling* 20, p. 43-55, 1997.
8. SUM, E. Y. L.. The recovery of metals from electronic scrap. *JOM*, p. 53-61, abr. 1991.
9. SZCZYGIEL, Z. et al. The direct reduction of sulfide minerals for the recovery of precious metals. *JOM*. p. 55-59. Apr. 1998.
10. VEIT, H. M. Tese de Doutorado. Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso. Programa de pós-graduação em engenharia de minas metalúrgica e materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. UFRGS. 2005.
11. VEJNAR, P., HRABÁK, V.. Recovery of non-ferrous and precious metals from secondary raw materials. *Recycling of Metalliferous Materials. IMM – The Institution of Mining and Metallurgy. p. 275-281. Birmingham, Inglaterra. Apr. 1990.*