

# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS DE RECICLAGEM E RECUPERAÇÃO DOS METAIS CONTIDOS NAS PLACAS ELETRÔNICAS

## **Renato de Castro Vivas<sup>(1)</sup>**

Professor da Universidade Federal da Bahia. Engenheiro de Produção, Mestre em Meio Ambiente na rede PRODEMA-UESC.

## **Flávio Pietrobon Costa<sup>(2)</sup>**

Professor da Universidade Estadual de Santa Cruz. Engenheiro Civil, Doutor em Modelagem Computacional na COPPE UFRJ.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida Centenário Ed. Alpha ap 401– Chame Chame – Salvador - Bahia - CEP: 44000-000- País - Tel: (73) 9134-7505 - e-mail: renato.vivas@hotmail.com

## **RESUMO**

A geração de resíduos sólidos urbanos no mundo cresce consideravelmente a cada dia, como é o caso dos resíduos eletrônicos. Os resíduos eletrônicos possuem componentes e substâncias nocivas ao meio ambiente, bem como metais nobres de alto valor agregado. Assim o objetivo desta pesquisa é a análise dos processos de reciclagem e recuperação de metais contidos nas placas eletrônicas. A metodologia empregada é a de Modelagem e Simulação computacional seguindo o modelo de Law e Kelton (1991), utilizando-se do software Arena Simulation. Foram modelados os processos de reciclagem, tais como eletrometalurgia, hidrometalurgia, biometalurgia e pirometalurgia. Através da coleta de dados utilizados na simulação foi determinada que a geração de resíduos eletrônicos provenientes de placas é 2301,37 kg apenas para o estado da Bahia, a partir dessa entrada, chega-se ao resultado de 4,79 kg de ouro, 19,18 kg de prata, 0,96 kg platina e 368,22 kg de cobre. Chegando a conclusão que em apenas 1 dia na Bahia podem ser retirados do meio ambiente e reintroduzidos na cadeia de produção aproximadamente 400 kg de metais nobres, chegando ao valor de 525 milhões de reais em 1 ano de recuperação e reciclagem de metais nobres.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelagem e simulação, E-lixo, Reciclagem.

## **1 INTRODUÇÃO**

São extraídos da natureza toneladas de recursos minerais e vegetais para a produção de insumos e bens de consumo. Processados e distribuídos, esses bens são consumidos pela população que ao final de seu ciclo de vida gera os resíduos que são descartados na natureza de diversas formas. Não só o descarte inadequado, mas todas as fases de extração e processamento podem gerar impactantes ao meio ambiente como demanda de energia, emissões de gases e consumo de água em larga escala na fase de manufatura e logística. Segundo Vivas (2013) o setor industrial dos eletroeletrônicos é o que melhor exemplifica esta dinâmica atual de produção, consumo e descarte. A geração massiva e crescente de resíduos provenientes dos eletroeletrônicos em conjunto com sua complexa composição implica na dificuldade do melhor gerenciamento destes resíduos, sendo tema de bastante preocupação pelos pesquisadores e estudiosos da área. Segundo o PNUMA (2013) a produção no Brasil de e-lixo derivado de computadores é de 96,8 mil toneladas anuais, ou seja, cada pessoa descarta cerca de 0,5 kg deste tipo de resíduo no ano. Os produtos eletrônicos são constituídos por diversos componentes e materiais, alguns nobres

e valiosos como o ouro, prata, cobre e alumínio. Também são constituídos por materiais tóxicos ao meio ambiente como o mercúrio, chumbo, arsênio e berílio. Estes materiais podem trazer doenças e impactos irreversíveis ao meio biótico. Atualmente a pressão nas jazidas naturais é significativa, com previsões de extinção das reservas naturais de diversos elementos constituintes dos produtos industrializados como os metais. O reaproveitamento desses metais através da logística reversa possibilita a mitigação da exploração dessas jazidas, reduzindo a pressão de um ambiente não renovável.

## **1.1 OBJETIVOS**

Esta pesquisa tem como objetivo a análise dos processos de reciclagem e recuperação de metais provenientes das placas eletrônicas contidas nos computadores.

## **2 REVISÃO TEÓRICA**

Neste tópico são abordados as teorias relacionadas com o tema da pesquisa, modelagem e simulação, o software ARENA e conceitos e definições sobre resíduos eletrônicos.

### **2.1 MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

A simulação computacional, segundo Hollocks (1992) é uma metodologia de pesquisa operacional que envolve a modelagem de um programa computacional para representar algum cenário do mundo real, de tal forma que os experimentos no modelo são como a previsão do que acontecerá na realidade. Assim, a simulação permitirá que se verifique o funcionamento de um sistema real em um ambiente virtual, gerando modelos em que o comportamento é como o real considerando a variabilidade do sistema e demonstrando o que, com alto grau de significância e veracidade, acontecerá na realidade de forma dinâmica. O uso da metodologia da modelagem e simulação computacional, durante muito tempo, foi restrito devido a necessidades de grandes recursos computacionais e ao grande esforço de programação requerido. Porém, hoje em dia, os softwares de simulação rodam em microcomputadores e os programas vêm evoluindo se tornando cada vez mais práticos e fáceis de usar. Segundo o Pidd (1998), a simulação computacional figura entre as três ferramentas mais utilizadas pelos pesquisadores em ciências administrativas.

### **2.2 O SOFTWARE ARENA SIMULATION**

O software Arena Simulation é um ambiente gráfico integrado de simulação, que contém todos os recursos para modelagem de processos, desenho e animação, análise estatística e análise de resultados.

O software Arena Simulation é tanto uma linguagem de simulação quanto um ambiente de experimentação e trabalho, que pode ser utilizado para fazer testes no modelo e analisar os resultados através de recursos de animação. Sua interface segue os padrões do Microsoft Office, com comandos e botões similares e menus que agregam funções parecidas com as encontradas em outros programas do Windows como o Word, Excel, PowerPoint. Um usuário do Word, por exemplo, ao abrir o software Arena saberá como salvar ou abrir um arquivo de modelo, pois os botões para isso são semelhantes, e os comandos "Abrir" e "Salvar" encontram-se também no menu "Arquivo".

### **2.3 RESÍDUOS ELETRÔNICOS**

Segundo o PNUMA (2013), a geração de resíduos sólidos urbanos cresce cada vez mais e os eletrônicos são os que mais crescem em todo o mundo. Na Europa ele já representa 4% do lixo municipal. Este cenário é semelhante e o crescimento da produção de lixo eletrônico é constante em todo o mundo. Dentre os componentes dos eletrônicos estão muitos metais nobres, como ouro, prata, cobre, titânio, ferro, alumínio. E também estão muitos elementos tóxicos como o mercúrio, arsênio, e chumbo. Os elementos tóxicos contidos nos componentes dos eletrônicos não coloca em risco o ser humano na fase de utilização do produto. Porém na fase de desmonte, separação, reciclagem e aterramento estes

elementos podem trazer sérios riscos a saúde do homem, de pequenos enjoos a câncer e pode levar até o indivíduo a morte.

Existem diversas metodologias e técnicas para se reciclar e recuperar resíduos eletrônicos, dentre elas podemos destacar as tecnologias que empregam processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos, eletrometalúrgicos e biometalúrgicos. Segundo Schichang (1994) os processos pirometalúrgicos podem incluir pirólise, fusão, incineração e sinterização. Este processo é essencialmente um mecanismo de concentração de metais em uma fase metálica e a rejeição da maioria dos materiais não metálicos. De acordo Kelsall (2002) 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. De acordo com Brandl (2001) os processos biometalúrgicos utiliza-se de 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. 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.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

As análises serão efetuadas a partir da Modelagem e Simulação computacional utilizando a metodologia de Law and Kelton (1991) aplicando no software Arena Basic Simulation. O sistema é existente, porém o conhecimento é limitado. As características do modelo são apresentadas a seguir: simbólico; digital; determinístico; dinâmico; discreto; não terminante e continuado.

Neste estudo a técnica de coleta de dados utilizada é a pesquisa bibliográfica onde examinando elementos documentais escritos e em áudio/vídeo com coleta de dados secundários. Os dados secundários analisados são coletados de documentos como o Manual de Orientação para Gestão de Resíduos Sólidos do Ministério do Meio Ambiente, a Norma Brasileira 10004 de 2004, Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil da ABRELPE de 2011, Relatório de Meio Ambiente do PNUMA, Política Nacional de Resíduos Sólidos de 2010, site do IBGE e ABINE. A abrangência da pesquisa é delimitada nos recursos pelo volume e quantidade de resíduos oriundos das placas eletrônicas, na abrangência pelo país Brasil.

### **4 RESULTADOS**

#### **4.1 MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Esta etapa consta a modelagem e simulação computacional seguindo parâmetros do modelo dos autores Law and Kelton.

##### **4.1.1 Formulação do problema e planejamento do estudo**

Neste tópico é definido o problema a ser solucionado com a modelagem e simulação bem como todo o processo de planejamento do estudo.

###### **4.1.1.1 Escopo e objetivos do estudo**

Esta modelagem e simulação têm como objetivo a concepção de um modelo computacional de um sistema logístico reverso para resíduos sólidos provenientes de produtos eletrônicos com especificação para placas de circuitos integrados. A fronteira do sistema são os processos de reciclagem dos metais.

###### **4.1.1.2 Abrangência do estudo**

O modelo de cadeia reversa empregado neste trabalho é somente para placas eletrônicas. Monitores, baterias e outros resíduos não são tratados nesta pesquisa. A abrangência do estudo será o sistema reverso dos resíduos eletrônicos, mais especificamente as etapas de reciclagem dos metais contidos nas placas como: cominuição, granulometria, separação magnética, separação eletrostática, hidro lixiviação/ bio lixiviação, pirometalurgia e eletrometalurgia. O sistema é constituído pelas seguintes etapas conforme figura 01:

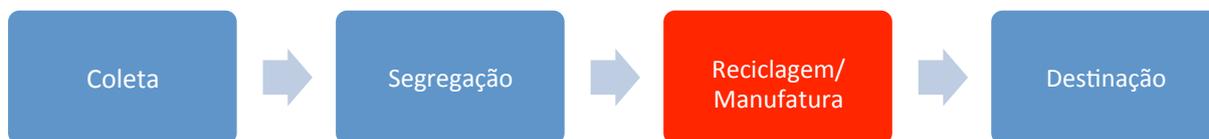


Figura 01: Etapas do sistema reverso da placa eletrônica. Fonte: Próprio Autor.

Sendo que a fronteira do sistema são os processos de Reciclagem/ Manufatura das placas demonstradas na figura 02.

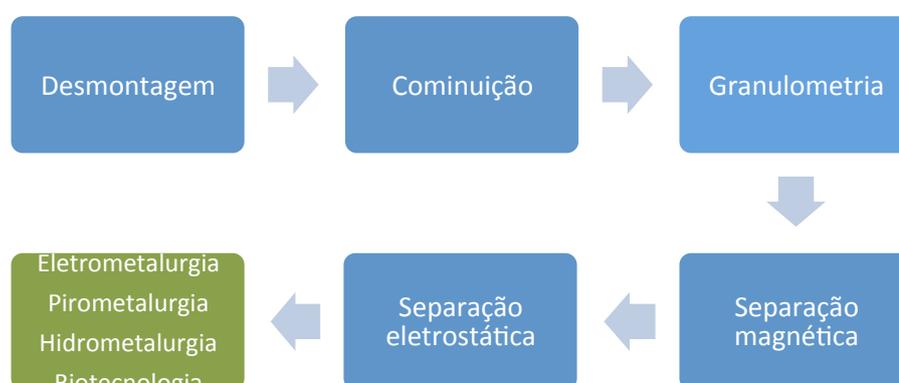


Figura 02: Fronteira do sistema reverso estudado. Fonte: Próprio Autor.

Serão modeladas as etapas de desmontagem, cominuição, granulometria, separação magnética, separação eletrostática e analisada em cenários distintos as etapas finais de eletrometalurgia, pirometalurgia, hidrometalurgia, biotecnologia.

A simulação deste sistema de manufatura será realizada através do software ARENA Simulation.

#### 4.1.1.3 Tipo de experimento

Definiu-se utilizar os tempos reais de execução das operações de manufatura, o que caracteriza o modelo como sendo determinístico, dinâmico e contínuo. Além disso, os estudos realizados levaram em conta que um *único modelo* seria suficiente tanto para representar o sistema reverso atualmente utilizado no mundo quanto para representar os cenários criados.

#### 4.1.1.4 Forma dos resultados

Os resultados do modelo buscaram representar o funcionamento real das operações de manufatura reversa de placas eletrônicas. Para tanto foram identificados indicadores de desempenho para o processo em questão como: manufatura com maior eficiência na recuperação de metais e menor impacto ambiental dos processos conforme a legislação.

#### 4.1.2 Identificação das restrições

Segundo Harrell e Tumay (1995) as restrições para o desenvolvimento de um projeto de simulação podem ser classificadas em três categorias: tempo, escopo e recursos. No entanto, além das três restrições anteriormente citadas, foram consideradas ainda restrições ambientais e de eficiência produtiva.

#### 4.1.2.1 Tempo

A restrição quanto à categoria do tempo pode estar diretamente relacionada com o nível de detalhamento do modelo. No presente estudo o tempo para realização do projeto foi uma das restrições na proposição de melhorias na produtividade da atividade de manufatura reversa das placas eletrônicas.

#### 4.1.2.2 Recursos

O volume gerado de resíduos eletrônicos provenientes de computadores no estado da Bahia serão os recursos utilizados neste modelo, ou seja, todos estes resíduos eletrônicos gerados no estado serão considerados. Os dados da Bahia são demonstrados na tabela 01.

Tabela 01: Geração de resíduos eletrônicos em toneladas/ano.

Tipos de Resíduos	Volume em toneladas/ano
Geração de Resíduos Sólidos Urbanos	4.480.000 t
Geração de lixo eletrônico (computadores, celulares, televisores).	14.933 t
Geração de resíduos eletrônicos provenientes de computadores	7.000 t
Geração de placas eletrônicas	840 t

Fonte: ABRELPE

Lembrando que os resíduos gerados são insumos ou matéria-prima de nosso sistema de manufatura reverso. No ano de 2013 temos 365 dias, estabelecemos então o volume de insumos ao dia para ser manufaturado.

$$\frac{840 \text{ t}}{365 \text{ dias}} = 2,30 \text{ toneladas ao dia}$$

Ou seja, as entradas de matéria-prima ao dia são de 2,30 toneladas de placas eletrônicas.

#### 4.1.3 Construção do modelo conceitual e coleta de dados

Nesta fase, o sistema real sob investigação é abstraído através de um modelo conceitual e, ao mesmo tempo, dados do sistema são coletados. A coleta refere-se a dados quantitativos e qualitativos sobre as entradas e saídas do sistema, bem como informações sobre os componentes do sistema e suas interconexões ou relações. A formulação do modelo consiste na especificação de seus componentes, variáveis, atributos, entidades e eventos. Sendo assim o sistema se encontra ilustrado na figura 03.

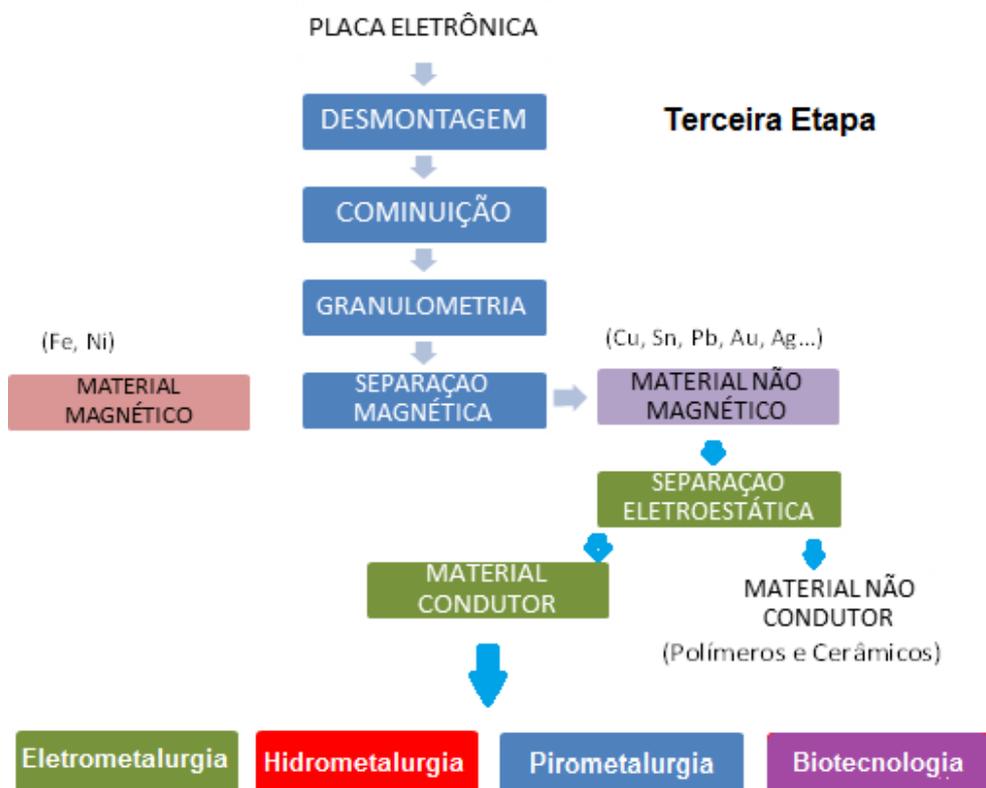


Figura 03: Etapas da manufatura reversa para placas eletrônicas. Fonte: Próprio Autor

Assim seguindo etapa por etapa temos que a primeira que é a de desmontagem apresenta-se como a separação dos componentes das placas eletrônicas.



Na etapa da desmontagem as entidades que entram são as placas eletrônicas derivadas de diversos tipos de computadores. São retirados alguns componentes que não são reciclados ou são perigosos. As entidades de saída então são componentes recicláveis e não recicláveis. Os recicláveis seguem no processo.

As entidades desse processo são as placas eletrônicas, os atributos são os materiais recicláveis, as atividades são de desmontagem e separação das placas eletrônicas e as variáveis deste processo são o volume, peso e tipo de placa eletrônica.



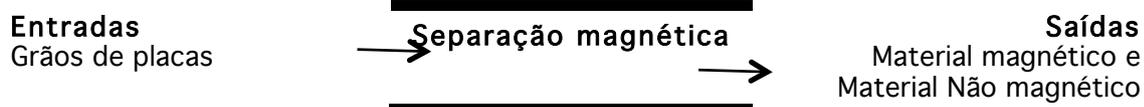
A etapa da cominuição as placas eletrônicas são moídas por máquinas como moinho de bolas, ou moinho de facas. As entradas são as placas inteiras que são moídas. As saídas são placas moídas com diversos tamanhos.

As entidades desse processo são as placas eletrônicas inteiras, os atributos são os materiais moídos, as atividades são de moagem e cominuição das placas eletrônicas e as variáveis deste processo são o volume, peso e granulometria.



A etapa da granulometria auxilia nas próximas etapas de separação. Esta etapa separa por tamanho de grãos as placas eletrônicas moídas utilizando peneiras. As entradas são as placas moídas de diversos tamanhos. As saídas são placas moídas separadas pelo tamanho do grão.

As entidades desse processo são as placas eletrônicas moídas com diversos tamanhos, os atributos são os grãos, as atividades são de peneiramento e granulometria e as variáveis deste processo são o volume, peso e tamanho dos grãos.



Esta etapa de separação magnética separará os materiais magnéticos como o ferro e níquel dos materiais não magnéticos como o cobre, prata, chumbo, ouro dentre outros. As entradas são os grãos de placas. As saídas são grãos magnéticos e grãos não magnéticos.

As entidades desse processo são os grãos de placas, os atributos os materiais não magnéticos, as atividades são de separação magnética e as variáveis deste processo são o peso de materiais magnéticos e não magnéticos.



Esta etapa de separação eletrostática separará os materiais condutores como os metais dos materiais não condutores como os polímeros e cerâmicos. As entradas são os materiais magnéticos. As saídas são materiais condutores e os não condutores. As entidades desse processo são os materiais magnéticos, os atributos os materiais condutores, as atividades são de separação eletrostática e as variáveis deste processo são o peso de materiais condutores e não condutores.

A partir de agora os processos são simulados através de seis cenários diferentes:

Quadro 01: Cenários e processos.

Cenário 01	Processamento Hidrometalúrgico
Cenário 02	Processamento Eletrometalúrgico
Cenário 03	Processamento Pirometalúrgico
Cenário 04	Processamento Biometalúrgico
Cenário 05	Processo Bio + Hidro
Cenário 06	Processo Eletro + Bio

Fonte: Próprio Autor.

Os cenários 05 e 06 são cenários que possuem dois métodos combinados para uma melhor eficiência na recuperação dos metais, pois um método poderá recuperar uma grande porcentagem de determinado metal, porém de outros metais tem o rendimento baixo. Os métodos foram escolhidos através da prioridade de escolha na Análise Hierárquica dos Processos.

No cenário 01 temos:



Esta etapa de processamento hidrometalúrgico irá recuperar os metais nobres como o ouro, a prata, platina e cobre. Outros elementos serão resíduos do processo. As entradas são os materiais condutores derivados do pré-processamento. As saídas são metais nobres e resíduos.

As entidades desse processo são os metais nobres, os atributos os materiais condutores, as atividades são de recuperação através da lixiviação hidrometalúrgica e as variáveis deste processo é o percentual de recuperação dos metais nobres e o peso final de cada metal.

No cenário 02 temos:



Este cenário de processamento eletrometalúrgico irá recuperar os metais nobres como o ouro, a prata, platina e cobre. Outros elementos serão resíduos do processo. As entradas são os materiais condutores derivados do pré-processamento. As saídas são metais nobres e resíduos.

As entidades desse processo são os metais nobres, os atributos os materiais condutores, as atividades são de recuperação através da eletrometalurgia e as variáveis deste processo é o percentual de recuperação dos metais nobres e o peso final de cada metal.

No cenário 03 temos:



Este cenário de processamento pirometalúrgico irá recuperar os metais nobres como o ouro, a prata, platina e cobre. Outros elementos serão resíduos do processo. As entradas são os materiais condutores derivados do pré-processamento. As saídas são metais nobres e resíduos.

As entidades desse processo são os metais nobres, os atributos os materiais condutores, as atividades são de recuperação através da pirometalurgia e as variáveis deste processo é o percentual de recuperação dos metais nobres e o peso final de cada metal.

No cenário 04 temos:



Este cenário de processamento biometalúrgico irá recuperar os metais nobres como o ouro, a prata, platina e cobre. Outros elementos serão resíduos do processo. As entradas são os materiais condutores derivados do pré-processamento. As saídas são metais nobres e resíduos.

As entidades desse processo são os metais nobres, os atributos os materiais condutores, as atividades são de recuperação através da biometalurgia e as variáveis deste processo é o percentual de recuperação dos metais nobres e o peso final de cada metal.

No cenário 05 temos:



Este cenário de processamento biometalúrgicos com hidrometalúrgico irá recuperar os metais nobres como o ouro, a prata, platina e cobre. Outros elementos serão resíduos do processo. As entradas são os materiais condutores derivados do pré-processamento. As saídas são metais nobres e resíduos.

As entidades desse processo são os metais nobres, os atributos os materiais condutores, as atividades são de recuperação através da biometalurgia e da hidrometalurgia e as variáveis deste processo é o percentual de recuperação dos metais nobres e o peso final de cada metal.

No cenário 06 temos:



Este cenário de processamento biometalúrgico com eletrometalúrgico irá recuperar os metais nobres como o ouro, a prata, platina e cobre. Outros elementos serão resíduos do

processo. As entradas são os materiais condutores derivados do pré-processamento. As saídas são metais nobres e resíduos.

As entidades desse processo são os metais nobres, os atributos os materiais condutores, as atividades são de recuperação através da biometalurgia e da eletrometalurgia e as variáveis deste processo é o percentual de recuperação dos metais nobres e o peso final de cada metal.

#### 4.3.4 Modelo computacional

O Software Arena é ao mesmo tempo um programa de simulação e um ambiente de trabalho e experimentação que pode ser usado para testar o modelo e fazer a apresentação dos resultados através de recursos avançados. Sua interface assemelha-se com os softwares da Microsoft, como Word e Excel, com botões e menus similares. Estudo do tempo, balanço de massa e energia são exemplos de aplicabilidade do software Arena. A figura 04 ilustra a interface da pesquisa de simulação no software Arena Simulation

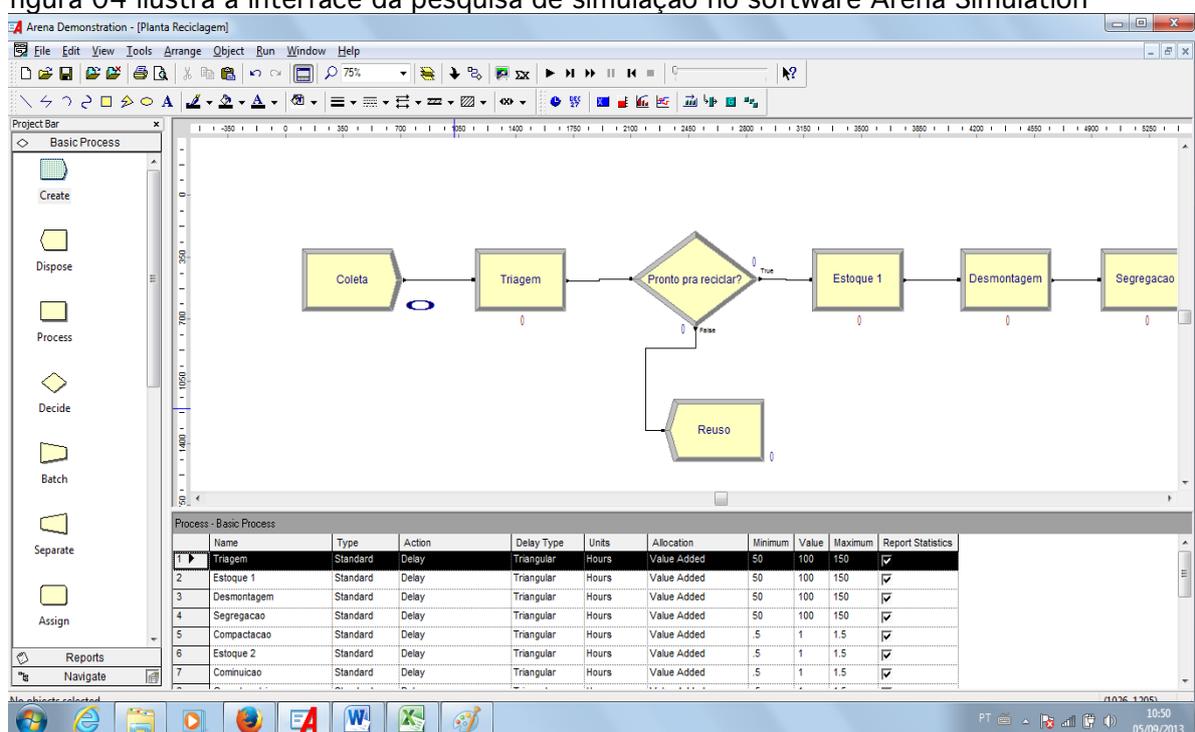


Figura 04: Interface do Software Arena Simulation. Fonte: Próprio autor.

#### 4.3.5 Simulação e experimentação

Apenas para facilitar o entendimento haverá a demonstração das etapas iniciais da cadeia reversa do e-lixo, iniciando da coleta. A primeira etapa composta pelos processos de coleta, triagem e estocagem está ilustrada e foi simulada através do software Arena Simulation. O período utilizado foi o diário e a quantidade de entrada 19178 Kg de computadores.

Foi considerado que a decisão de reuso na imagem é apenas simbólica, para mostrar que existe a alternativa do computador estar apto a funcionar, voltando à cadeia de consumo sem necessidade de reciclagem. Sendo assim 100% dos insumos serão preparados para reciclagem, pois apesar da alternativa do reuso, certo tempo depois este mesmo computador terá que ser reciclado. Como ilustrado na figura 05.

## 1ª Etapa

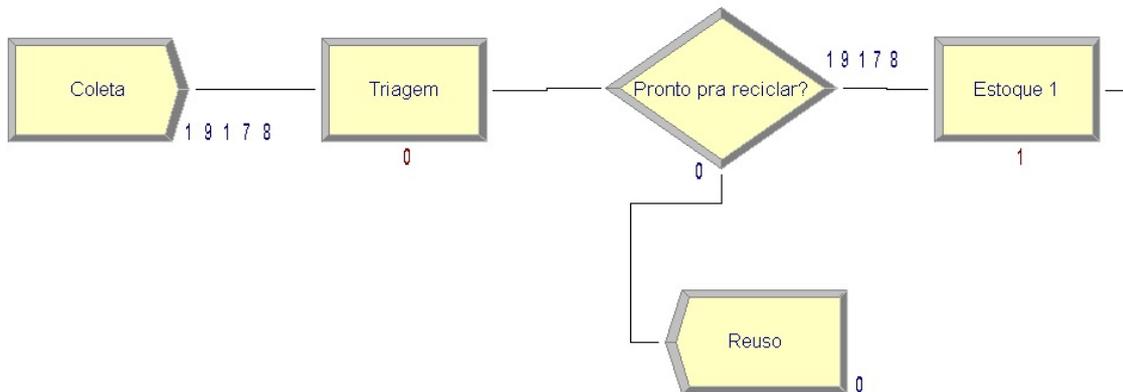


Figura 05: Primeira etapa do sistema reverso simulado em computador. Fonte: Próprio Autor.

A segunda etapa é demonstrada como a segregação e compactação dos componentes do computador. Sendo que para esta pesquisa o foco serão as placas eletrônicas. Constando que após a segregação teremos componentes metálicos, carcaças poliméricas e elementos cerâmicos. Pelos dados de entrada 19178 kg de computadores temos nos dados de saída 2308 kg de placas eletrônicas e 16869 kg de outros componentes que não serão estudados. Como demonstrado na figura 06.

## 2ª Etapa

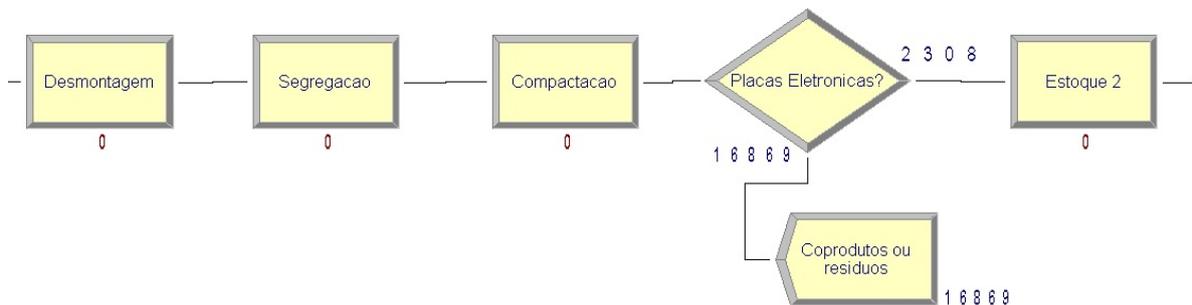


Figura 06: Segunda etapa do sistema reverso simulado em computador. Fonte: Próprio Autor.

A partir desta etapa é que engloba a manufatura reversa das placas eletrônicas, começando pelo pré-tratamento que é comum a todos os cenários. A terceira etapa é composta pelos processos de pré-tratamento das placas eletrônicas, os processos mecânicos de cominuição, granulometria e separação magnética. Após a separação magnética teremos de um lado os metais ferrosos (que contém ferro) e do outros os não ferrosos (que não contém ferro). Cerca de 3% da placa eletrônica são metais ferrosos e os restantes componentes não ferrosos. Sendo assim para demanda diária, apenas 72 kg são metais ferrosos e 2236 kg de metais não ferrosos que seguirá para próxima etapa como demonstrado na figura 07.

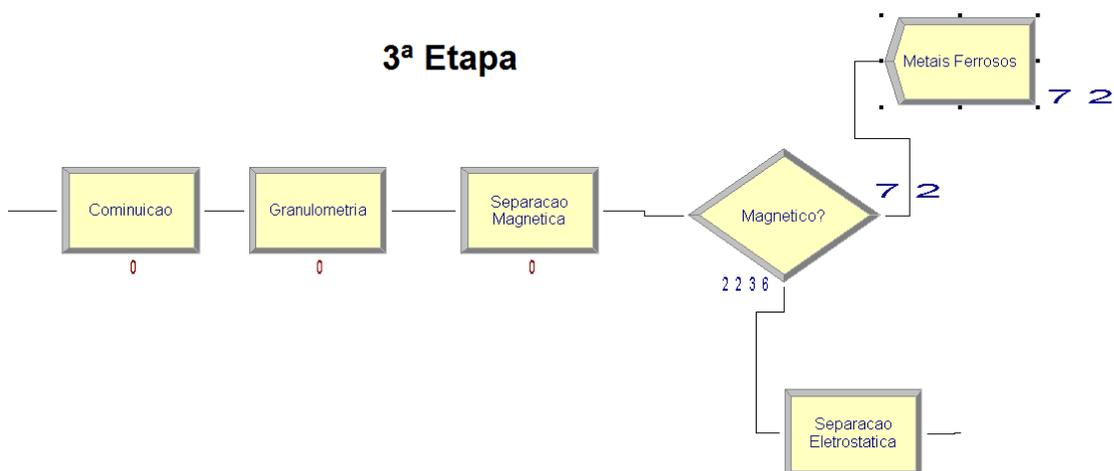


Figura 07: Terceira etapa do sistema reverso simulado em computador. Fonte: Próprio Autor.

A quarta etapa é a separação de elementos que conduzem a corrente elétrica da que as que não conduzem ou pouco conduzem a corrente elétrica. De um lado os metais condutores e do outro lado os componentes poliméricos e cerâmicos. Sendo que da quantidade diária, apenas 436 kg são materiais condutores e 1800 kg são materiais não condutores. Como ilustrado na figura 08.

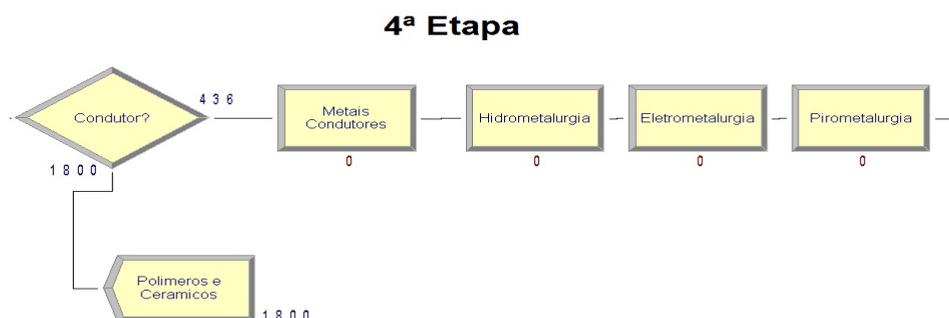


Figura 08: Quarta etapa do sistema reverso simulado em computador. Fonte: Próprio Autor. A quinta e última etapa é a obtenção dos metais nobres através dos processos de recuperação apresentados através dos seis cenários: hidrometalurgia, eletrometalurgia, pirometalurgia, biometalurgia e dois combinados biometalurgia com hidrometalurgia e eletrometalurgia com biometalurgia. Como ilustrado na figura 09.

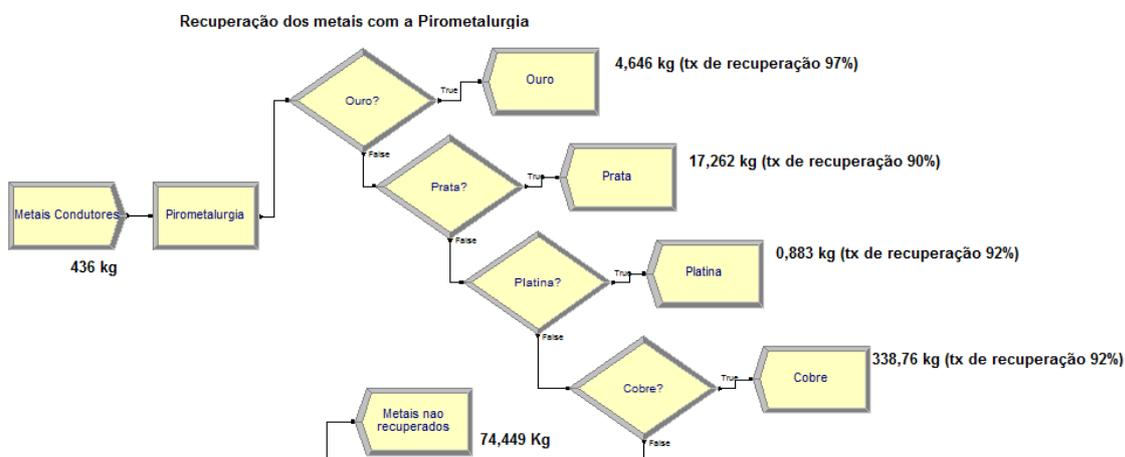


Figura 09: Recuperação dos metais com a pirometalurgia. Fonte: Próprio Autor.

Utilizando a técnica da pirometalurgia são recuperados, no volume diário gerado de lixo eletrônico, 4,646 kg de ouro, 17,262 kg de prata, 0,883 kg de platina, 338,76 kg de cobre e 74,449 kg de metais não recuperados. Os metais não recuperados são compostos das porcentagens não recuperadas dos metais estudados e dos metais não estudados neste trabalho, como o níquel, estanho entre outros. Como ilustrado na figura 10.

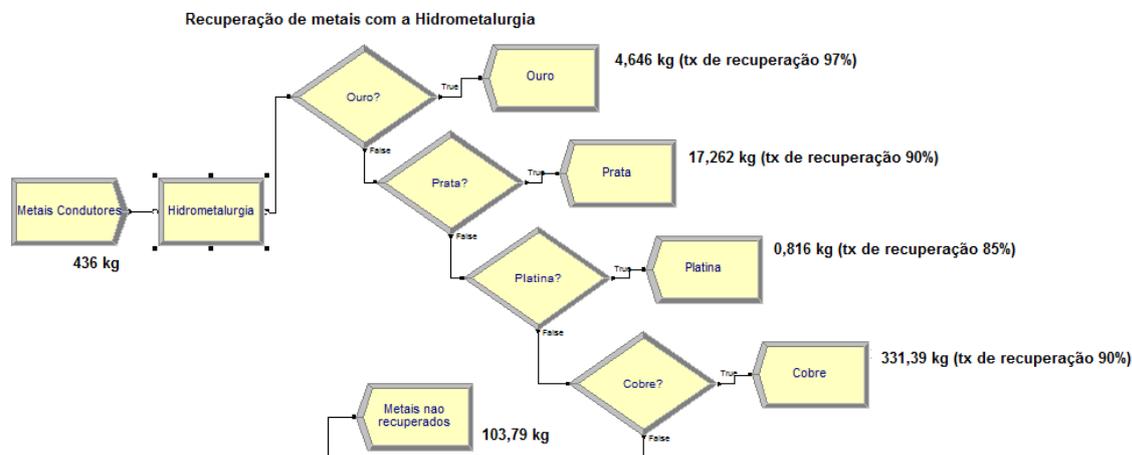


Figura 10: Recuperação dos metais com a hidrometalurgia. Fonte: Próprio Autor.

Utilizando a técnica da hidrometalurgia são recuperados, no volume diário gerado de lixo eletrônico, 4,646 kg de ouro, 17,262 kg de prata, 0,816 kg de platina, 331,39 kg de cobre e 103,79 kg de metais não recuperados. Como ilustrado na figura 11.

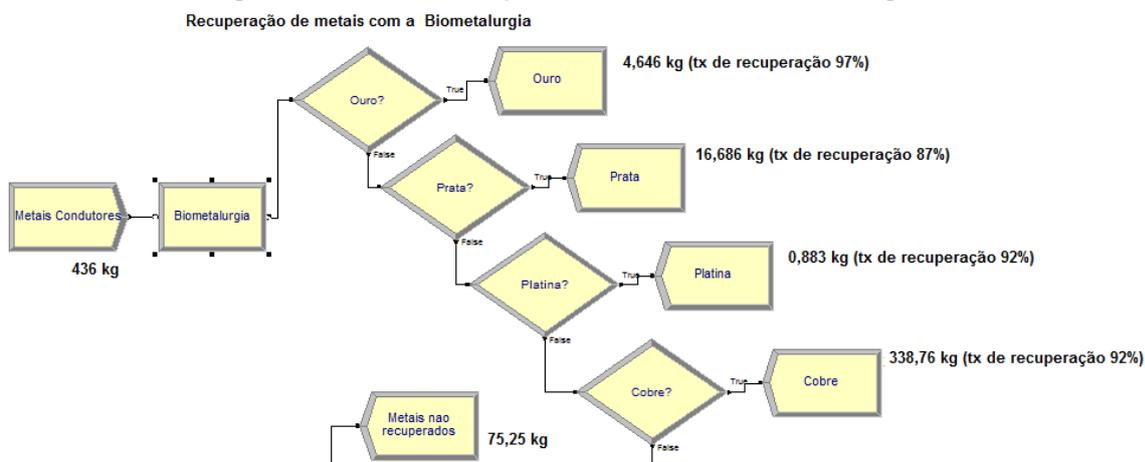


Figura 11: Recuperação dos metais com a biometalurgia. Fonte: Próprio Autor.

Utilizando a técnica da hidrometalurgia são recuperados, no volume diário gerado de lixo eletrônico, 4,646 kg de ouro, 16,686 kg de prata, 0,883 kg de platina, 338,76 kg de cobre e 75,25 kg de metais não recuperados. Como ilustrado na figura 12.

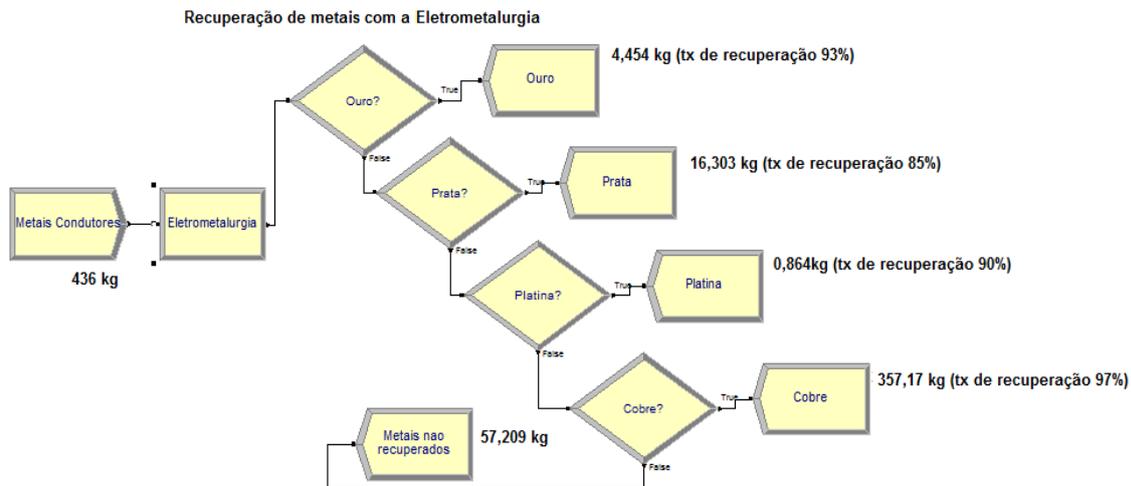


Figura 12: Recuperação dos metais com a biometalurgia. Fonte: Próprio Autor.

Utilizando a técnica da hidrometalurgia são recuperados, no volume diário gerado de lixo eletrônico, 4,454 kg de ouro, 16,303 kg de prata, 0,864 kg de platina, 357,17 kg de cobre e 57,209 kg de metais não recuperados. Como ilustrado na figura 13.

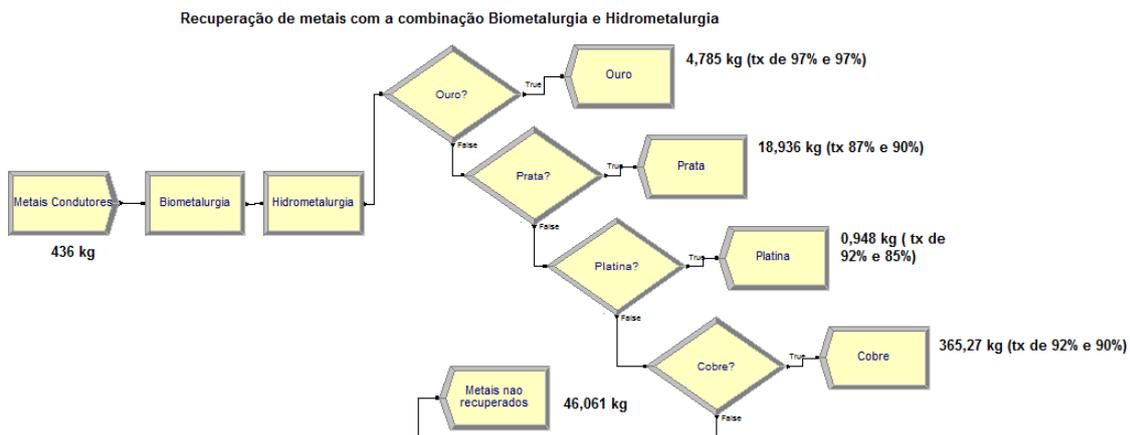


Figura 13: Recuperação dos metais com a combinação biometalurgia e hidrometalurgia. Fonte: Próprio Autor.

Utilizando duas técnicas combinadas a biometalurgia e hidrometalurgia são recuperados, no volume diário gerado de lixo eletrônico, 4,785 kg de ouro, 18,936 kg de prata, 0,948 kg de platina, 365,27 kg de cobre e 46,061 kg de metais não recuperados. Como ilustrado na figura 14.

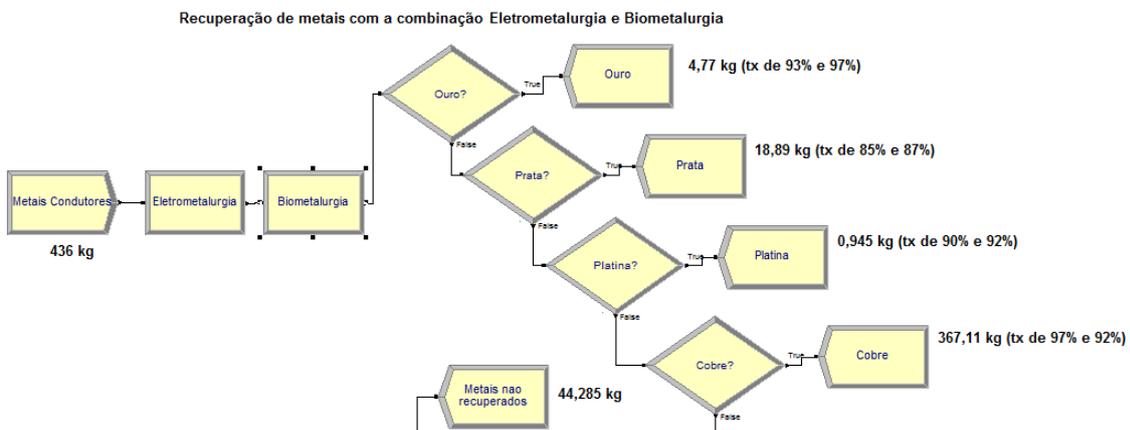


Figura 14: Recuperação dos metais com a combinação eletrometalurgia e biometalurgia.  
Fonte: Próprio Autor.

Utilizando duas técnicas combinadas a eletrometalurgia e biometalurgia são recuperados, no volume diário gerado de lixo eletrônico, 4,77 kg de ouro, 18,89 kg de prata, 0,945kg de platina, 367,11 kg de cobre e 44,285 kg de metais não recuperados.

#### 4.3.6 Análise e recomendações

Analisando os dados quantitativos obtidos da modelagem e simulação tem-se que numa amostra diária da Bahia de resíduos provenientes de computadores na massa de 19178 kg. A massa média dos metais contidos nas placas eletrônicas está abaixo na tabela 02.

Tabela 02: Massa das entidades do processo.

MASSA DAS ENTIDADES DOS PROCESSOS (Kg)						
	Computador	Placa eletrônica	Ouro	Prata	Platina	Cobre
<b>ANO</b>	7000000,00	840000,00	1750,00	7000,00	350,00	134400,00
<b>MÊS</b>	583333,33	70000,00	145,83	583,33	29,17	11200,00
<b>DIA</b>	19178,08	2301,37	4,79	19,18	0,96	368,22
<b>HORA</b>	799,09	95,89	0,20	0,80	0,04	15,34

Fonte: Próprio autor.

O percentual de recuperação é distinto para cada método de processo, assim podemos definir então a massa final recuperada em cada tipo de processo. Este percentual de recuperação foi obtido a partir da dos de dados secundários.

Analisando 6 cenários diferentes, um pra cada tipo de processamento e dois cenários com processamentos combinados escolhidos a partir das prioridades obtidas segundo pesquisas de VIVAS e PIETROBON (2013), tem-se:

Quadro 02: O percentual de recuperação dos processos e a massa final dos metais.

<b>Cenário</b>	<b>Metal</b>	<b>Média % de recuperação</b>	<b>Massa final em Kg</b>
Cenário 01 (hidrometalurgia)	Ouro	97%	4,646
	Prata	90%	17,262
	Platina	85%	0,816
	Cobre	90%	331,39
Cenário 02 (eletrometalurgia)	Ouro	93%	4,454
	Prata	85%	16,303
	Platina	90%	0,864
	Cobre	97%	357,17
Cenário 03 (pirometalurgia)	Ouro	97%	4,646
	Prata	90%	17,262
	Platina	92%	0,883
	Cobre	92%	338,76
Cenário 04 (biometalurgia)	Ouro	97%	4,646
	Prata	87%	16,686
	Platina	92%	0,883
	Cobre	92%	338,76
Cenário 05 (bio + hidro)	Ouro	1º- 97%, 2º-97%	4,785
	Prata	1º- 87%, 2º-90%	18,936
	Platina	1º- 92%, 2º-85%	0,948
	Cobre	1º- 92%, 2º-90%	365,27
Cenário 06 (eletro + bio)	Ouro	1º- 93%, 2º-97%	4,77
	Prata	1º- 85%, 2º-87%	18,89
	Platina	1º- 90%, 2º-92%	0,945
	Cobre	1º- 97%, 2º-92%	367,11

Fonte: Próprio Autor.

Nos cenários 01 a 04 temos os processos individuais com seus respectivos percentuais de recuperação. Na hidrometalurgia a recuperação com maior percentual é a de ouro com 97% de recuperação. O cobre por sua vez tem o percentual de 90%, sendo o cobre a maior parte em massa dos metais, na conta final da massa ele se torna o mais significativo, contudo quando o aspecto econômico é o foco, a massa de cobre se torna pouco significativa, pois é a menor cotação do mercado entre os quatro.

Nos cenários combinados 05 e 06, foram realizados dois processos, o primeiro processo recupera uma porcentagem do metal o segundo processo recupera uma porcentagem do que o primeiro processo não recuperou. Como ilustrado no quadro 00 os processos combinados recuperam mais metais, o ouro, por exemplo, no valor de 4,785 kg diários levantando o valor de 4,646 kg que é a massa média nos processos individuais a diferença é de 0,139 kg. No mercado de cotações esta diferença é significativa como ouro na cotação de 110 reais a grama terá R\$ 15.290,00 reais a mais no caixa. Na tabela 03 tem-se a apresentação com as diferenças em massa e os valores em reais.

Tabela 03: Diferenças das massas e valores em reais dos processos individuais e combinados.

<b>Metal</b>	<b>Processos Individuais em Kg</b>	<b>Processos Combinados em Kg</b>	<b>Diferença de massa em kg</b>	<b>Valor em Reais dessa diferença</b>
Ouro	4,646	4,785	0,139	15.290,00
Prata	17,262	18,936	1,674	3.414,96
Platina	0,816	0,948	0,132	14.520,00

Cobre	331,39	365,27	33,88	8.131,20
-------	--------	--------	-------	----------

Fonte: Próprio autor.

A diferença e o total em reais dos processos combinados giram no valor de R\$ 41.356,16 reais ao dia. Sendo assim os processos combinados são mais eficientes que processos individuais, porém os custos dos processos e o tempo de processamento irão aumentar consideravelmente, restando o estudo de viabilidade técnica e econômica dizer se é viável utilizar processos combinados. Como é o caso da combinação dos processos hidrometalúrgicos e biometalúrgicos que duram semanas para a sua realização, esta combinação irá aumentar o tempo de processo para muitas semanas ou até meses. Os processos combinados de eletrometalurgia e biometalurgia necessitariam de processos totalmente diferentes, ou seja, poderia tornar o sistema inviável economicamente.

## 5 CONCLUSÃO

Através da modelagem e simulação dos processos de reciclagem e recuperação de metais provenientes das placas eletrônicas, foram concluídos que os processos eletrometalúrgicos, hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos e biometalúrgicos são processos eficientes, contudo no aspecto ambiental e econômico a combinação de dois tipos de processos poderia ser viável. Segundo Vivas (2013) os métodos de recuperação e reciclagem de metais contidos nas placas eletrônicas são peculiares, ou seja, tem características próprias e distintas um do outro. A combinação do biometalúrgico com hidrometalúrgico por ter processos semelhantes poderia ser efetivada para uma melhor eficiência na recuperação dos metais nobres das placas.

A falta de estudos e pesquisas na área de recuperação de metais das placas eletrônicas, bem como laboratórios ou indústrias de reciclagem de placas eletrônicas no Brasil, para se realizar experimentos, foram às limitações deste estudo. Mais pesquisas e mais detalhes são necessárias para o aprofundamento do aspecto econômico.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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. HARREL, C.e TUMAY, K. *Simulation made easy – A manager´s Guide* 311pp. Norcross. Engineering and Management Press, 1995.
3. HOFFMANN, J. E.. Recovering precious metals from electronic scrap. *JOM*, July, 1992
4. HOLLOCKS, B. (1992) A well-kept secret: Simulation in manufacturing industry review. *Operations Research Insight* 5(4) 12-17. 1992.
5. KELSALL, G. H., et al. Metal recovery from electronic scrap by leaching and electro winning. In: *Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economic Aspects*, 16-20 Junho, Lulea, Suécia, 2002.
6. LAW, A.M. e KELTON, W.D. (1991) *Simulation Modeling and Analysis*, 2nd Ed., McGraw-Hill.
7. PIDD, M. *Modelagem Empresarial*, Porto Alegre, Bookman, 1998.
8. PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.pnuma.org.br/>. 2010.
9. SHICHANG, Z., et al. Recycling of electric materials. *Trans. Mat. Res. Soc.* vol. 18A. p. 201-206. Japão. 1994.
10. VIVAS, R. C. Dissertação de mestrado, Análise dos processos de reciclagem de placas eletrônicas para o apoio à tomada de decisão na implementação de sua cadeia reversa. Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC. Ilhéus, Bahia. 2013.