UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA
DEPARTAMENTO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE MATERIAIS – PPGEM

SÉRGIO TADEU DE ALMEIDA

MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM CENÁRIOS DE RECICLAGEM POR MEIO DE ABORDAGEM DE EXERGIA

DISSERTAÇÃO

CURITIBA
2016

SÉRGIO TADEU DE ALMEIDA

MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM CENÁRIOS DE RECICLAGEM POR MEIO DE ABORDAGEM DE EXERGIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Milton Borsato

Curitiba

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

A447m 2016

Almeida, Sérgio Tadeu de
Método de avaliação da eficiência energética em cenários de reciclagem por meio de abordagem de exergia / Sérgio Tadeu de Almeida.-- 2016.
186 f.: il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2016.
Bibliografia: p. 158-175

1. Engenharia mecânica - Dissertações. 2. Reciclagem. 3. Energia - Consumo. 4. Desenvolvimento sustentável. 5. Exergia. I.Borsato, Milton. II.Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 620.1

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba

TERMO DE APROVAÇÃO

SÉRGIO TADEU DE ALMEIDA

MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM CENÁRIOS DE RECICLAGEM POR MEIO DE ABORDAGEM DE EXERGIA

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em engenharia de Manufatura, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

_____

Prof. Paulo César Borges, Dr.
Coordenador do Programa

Banca Examinadora

_____

Prof. Milton Borsato, Dr.
UTFPR - orientador

_____

Prof. Cristiano Vasconcellos Ferreira, Dr.
UFSC

_____

Prof. Carla Cristina Amodio Estorilio, Drª.
UTFPR

_____

Prof. Cezar Otaviano Ribeiro Negrão, Dr.
UTFPR

Curitiba, 27 de Outubro de 2016

Dedico este trabalho aos meus amados pais
que, munidos de genial simplicidade, soube-
ram me fazer entender, desde cedo, o valor do
conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Milton Borsato, pela sabedoria, paciência, generosidade e grandeza de espírito demonstrados sobretudo, nos momentos mais difíceis. Características que fazem dele, um Professor por excelência na opinião unânime de todos os colegas que conheci na UTFPR.

Agradeço também à Prof. Dra. Cássia Maria Lie Ugaya pelo valioso suporte no uso da ferramenta SIMAPRO.

Registro também o meu reconhecimento à minha esposa pois *sine qua non*, jamais teria eu superado os sucessivos percalços que a vida pessoal insistiu em me apresentar ao longo desse período.

Nullius in verba:

“We shape our tools and thereafter they shape us.”
(CULKIN, John; 1967)

RESUMO

A medição da eficiência energética dos processos de reciclagem é questão fundamental para a humanidade. O aumento de resíduos apresenta um desafio para as organizações e a sociedade na busca de desenvolvimento sustentável. Frente a esse problema a reciclagem é amplamente reconhecida por ser uma estratégia de fim de vida amigável ao ambiente e a abordagem adequada para gerir eficazmente o lixo e minimizar o impacto negativo sobre meio ambiente e economia, bem como garantir a disponibilidade de materiais e energia ao longo das próximas décadas. Entretanto, uma vez que a tecnologia de reciclagem disponível, ao mesmo tempo requer matérias-primas e energia, acaba por contribuir para o esgotamento dos recursos naturais, logo torna-se vital avaliar também a eficiência energética dos processos de reciclagem e determinar o seu real benefício. Caracterizado como um método, a avaliação da eficiência na reciclagem por análise de exergia mostra-se um aliado valoroso na medida em que permite revelar a eficiência energética nos processos, como uma função de transformações físicas, térmicas e da qualidade dos materiais reciclados em cada etapa escolhida para os diferentes e possíveis cenários dos processos de reciclagem. Por meio da análise são identificadas as exergias agregadas a um determinado produto em fim de vida, de modo que componentes ou submontagens são priorizados para fins da estratégia de reuso. Em seguida, são construídos quatro cenários. Um primeiro representa o estado da arte quanto a eficiência em processos de reciclagem; o segundo visa a recuperação máxima de matérias; o terceiro avalia exegeticamente o potencial de recuperação de energia e por fim, uma condição tal que atenda a legislação vigente. Para apoiar o processo decisório, os resultados são analisados por métodos de análise multicritério a fim de apontar a melhor opção sob a ótica da exergia e de suas características. Os resultados revelam em cada cenário, quais práticas e configurações representam um maior impacto na eficiência energética e como cenários e métodos tradicionais de reciclagem podem obter melhores resultados segundo combinados por diferentes estratégias de fim de vida. Por fim, testes são realizados para verificar se a reciclagem fere o senso comum[1] que induz a acreditar que reciclar é, sob quaisquer circunstâncias, uma prática benéfica ao meio ambiente.

[1] Senso comum é a suposta compreensão do mundo resultante das experiências atuais que continuam sendo efetuadas, sem depender de uma investigação detalhada para se alcançar verdades mais profundas, como por exemplo as científicas (WIKIPEDIA, 2015).

Palavras-chave: Reciclagem. Eficiência. Exergia. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Measuring the energy efficiency of recycling processes is fundamental for humanity. The increase of waste presents a challenge for organizations and society pursuing sustainable development. Faced with this problem, recycling is widely recognized as a friendly strategy to the environment and the proper approach for effectively managing waste and minimizing the negative impact on environment and economy, as well as ensuring the availability of materials and energy over the next decades. However, since the available recycling technology, at the same time, requires raw materials and energy, it ultimately contributes to the depletion of natural resources, so it is vital also to assess the energy efficiency of recycling processes in order to determine their real benefit. Characterized as a method, the evaluation of efficiency in recycling by exergy analysis, shows to be a valuable ally insofar as it permits to reveal the energy efficiency in the processes as a function of physical, thermal and quality of recycled materials in each stage chosen for the different and possible scenarios of recycling processes. By means of exergy analysis, the embodied exergy linked to a particular product in its end of life is identified in a certain way that components or sub-assemblies are prioritized for the purposes of reuse strategy. In the sequence, four scenarios are defined. A first scenario represents the state-of-the-art of efficiency in recycling processes; the second aims the maximum recovery of materials; the third exegetically evaluates the potential for energy recovery and finally, such a scenario that meets the current legislation. To support the decision-making process, the results are analyzed by means of a multi-criteria analysis method, in order to point the best option from the perspective of exergy and its features. Results reveal, in each scenario, which practices and configurations pose a greater impact on energy efficiency and how traditional methods can get better results if combined or replaced with end-of-life strategies. Finally, tests are run for determining whether recycling hurts the common sense[2] according to which recycling is always a beneficial practice on the environment.

Keywords: Recycling. Efficiency. Exergy. Sustainability.

[2] Common sense is the supposed understanding of the world resulting from current experiences that continue to be made without relying on a detailed investigation to reach deeper truths, such as scientific (WIKIPEDIA, 2015).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Seleção, classificação e processo de revisão. 23
Figura 2 – Hierarquia de lixo eletrônico para avaliação de performance de reciclagem. 24
Figura 3 – Análise da Segunda Lei da Termodinâmica em processos reais. 42
Figura 4 – Diagrama triângulo interdisciplinar abrangido pelo campo da análise exergética. 44
Figura 5 – Ilustração qualitativa entre a eficiência exergética de um processo e o impacto ambiental. 44
Figura 6 – Desenho do Ciclo de Vida**.** 55
Figura 7 – Diagrama do Cometa de Ricoh adaptado para as EFVs. 57
Figura 8 – Primeiro fragmento do processo para seleção de artigos. 63
Figura 9 – Segundo fragmento do processo para seleção de artigos. 65
Figura 10 – Evidenciação do valor de corte conforme frequência de citações. 66
Figura 11 – Número de artigos por periódico. 71
Figura 12 – Número de referências utilizadas pelos artigos do portfólio, por temporalidade. 72
Figura 13 – Número de citações nas referências por autor. 73
Figura 14 – Classificação dos artigos conforme relevância acadêmica. 74
Figura 15 – Resumo do processo para seleção de referências bibliográficas. 75
Figura 16 – Limite da desmontagem baseada na viabilidade econômica. 81
Figura 17 – Processo de Remanufatura. 86
Figura 18 – Processo de desmontagem de PVF eletroeletrônico. 88
Figura 19 – Principais operações da unidade de separação mecânica da *Argonne*®. 93
Figura 20 – Composição material do *fluff*. 94
Figura 21 – Rotas de tratativa dos *fluff*. 95
Figura 22 – Típico incinerador de resíduos sólidos na Suíça. 99
Figura 23 – Objetivo e atributos de avaliação. 116
Figura 24 – Cenário de PRs e EFVs segundo as melhores práticas via bibliometria. 125
Figura 25 – Instalação completa de reciclagem de PFV sem desmontagem. 126
Figura 26 – Método RIPEx para avaliação exergética em cenários de fim de vida. 130
Figura 27 – Vista explodida do PFV forno micro-ondas NN-G55 BH 127 60Hz. 136
Figura 28 – Diagrama de Sankey: Exergia agregada na montagem em cutoff de 5% 139
Figura 29 – Objetivo e atributos de avaliação para EFV Reuso. 140
Figura 30 – Objetivo e atributos de avaliação para cenários. 147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Portfolio final de artigos resgatados e valorados segundo critérios de eficiência da reciclagem. 27
Tabela 2 – Evolução do termo exergia até meados de 1956 – Suíça. 41
Tabela 3 – Conteúdo de exergia de diferentes fluxos de energia – 2007. 42
Tabela 4 – Exergia de fluxos de energia na base de dados do *Ecoinvent* v1.2 52
Tabela 5 – Combinação das palavras-chave de pesquisa. 62
Tabela 6 – Número de citações dos artigos do portfólio. 69
Tabela 7 – Escala numérica de julgamento relativo. 117
Tabela 8 – Tabela de índices randômicos. 120
Tabela 9 – Hierarquização de critérios para EFV Reuso. 140
Tabela 10 – Pareamento do critério C1 exergia de fonte não renovável. 141
Tabela 11 – Pareamento do critério C2 exergia de fonte renovável. 142
Tabela 12 – Pareamento do critério C3 massa da divisão. 142
Tabela 13 – Pareamento do critério C4 Exergia total agregada. 143
Tabela 14 – Hierarquização de critérios para cenários de fim de vida. 147
Tabela 15 – Pareamento do critério C1 exergia de fonte não renovável para cenários. 148
Tabela 16 – Pareamento do critério C2 exergia de fonte renovável para cenários. 148
Tabela 17 – Pareamento do critério C3 exergia total para cenários. 149

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Palavras-chave de pesquisa. 21
Quadro 2 – Lista ampliada de palavras-chave de pesquisa. 21
Quadro 3 – Combinações dos *strings* de pesquisa. 22
Quadro 4 – Lista de critérios para seleção final da revisão de literatura. 25
Quadro 5 – Diferença entre conceitos: Energia versus Exergia – 2001. 40
Quadro 6 – Definição das EFVs. 56
Quadro 7 – Tipos e critérios de EFVs. 58
Quadro 8 – Lista preliminar de palavras-chave do primeiro eixo de pesquisa 60
Quadro 9 – Lista preliminar de palavras-chave do segundo eixo de pesquisa. 61
Quadro 10 – Lista final de palavras-chave de pesquisa 61
Quadro 11 – Métodos para avaliação dos artefatos. 104
Quadro 12 – Relação entre metodologia DSR, objetivos específicos, atividades e entregas. 106
Quadro 13 – Diferença terminológica entre o CExD e o Ecoinvent/SIMAPRO. 114
Quadro 14 – Quadro de avaliação do método RIPEx 151
Quadro 15 – Lista de peças da placa do Painel / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 1 de 3) 178
Quadro 16 – Lista de peças da placa do Painel / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 2 de 3) 179
Quadro 17 – Lista de peças da placa do Painel / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 3 de 3) 180
Quadro 18 – Lista de peças da placa Inverter / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 1 de 2) 181
Quadro 19 – Lista de peças da placa Inverter / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 2 de 2) 182
Quadro 20 – Lista de peças mecânicas / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 1 de 4) 183
Quadro 21 – Lista de peças mecânicas / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 2 de 4). 184
Quadro 22 – Lista de peças mecânicas / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 3 de 4) 185
Quadro 23 – Lista de peças mecânicas / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 4 de 4). 186

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Alcance da literatura sobre os critérios de eficiência na reciclagem.....28
Gráfico 2 – Composição % em massa por classe de material do PFV forno micro-ondas. ...134
Gráfico 3 – Análise comparativa da composição % em massa de material do PFV adotado.134
Gráfico 4 – Exergia agregada às divisões do PFV. 138
Gráfico 5 – Hierarquização das divisões para fins da EFV Reuso. 143
Gráfico 6 – Cenários de exergia demandada. 145
Gráfico 7 – Priorização de cenários via AHP. 150

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AHP	Processo Analítico de Hierarquia
BD	Base de dados
CExC	Consumo de Exergia Cumulativa
CExD	Cumulative Exergy Demand (Demanda Acumulativa de Exergia)
CFC	Clorofluorocarbonetos
DC	Direct Current (Corrente Contínua)
DFA	Design for Assembly (Projeto para Montagem)
DSR	Design Science Research
ECV	Estratégia do Ciclo de Vida
EFV	Estratégias de Fim de Vida
FAHP	Processo Analítico de Hierarquia Fuzzy
Fluff	Resíduo de processos de moagem e separação
HCFC	Hidrocloroflúorcarbono
HFC	Hidroflúorcarbono
IC	Calcular o índice de consistência
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
ISI	Web of Science
ISO	Organização Internacional de Normalização
JCR	Journal Citation Report
LCD	Liquid Crystal Display (Tela de Cristal Líquido)
MJ	Mega Joule
NKK	Nippon Kokan Kabushiki Kaisha
NPC	Novas Palavras Chave
PC	Palavras chave
PCB	Placa de Circuito Impresso
PFV	Produtos em Fim de Vida
PNB	Produto Nacional Bruto
PT	Peso Total
RC	Razão de Consistência
RPT	Resíduo de Produto Triturado
SLT	Segunda Lei da Termodinâmica
SMD	Superfície de Montagem de Dispositivo eletrônico
R.I.P.	Rest In Peace (Descanse Em Paz)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
1.1 ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA 20
1.1.1 Resultados da revisão bibliográfica 26
1.1.2 Considerações gerais e oportunidades sobre a revisão bibliográfica 33
1.2 OBJETIVOS 34
1.2.1 Objetivo geral 34
1.2.2 Objetivos específicos 35
1.3 JUSTIFICATIVA 35
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO 37
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE EXERGIA 39
2.1 EXERGIA 39
2.1.1 Exergia e sustentabilidade 43
2.1.2 Aspectos econômicos em exergia 45
2.1.3 Método de exergia adotado 46
2.2 FIM DE VIDA 54
2.3 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA DE EFVS E PRS 59
2.3.1 Investigação preliminar 60
2.3.2 Seleção dos artigos que comporão o portfólio para a pesquisa 64
2.3.3 Análise bibliométrica do portfólio de artigos para o referencial teórico. 68
2.3.5 Síntese da revisão bibliométrica sobre PRs e EFVs 100
3 ASPECTOS METODOLÓGICOS 102
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA 102
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 103
3.3 PLANEJAMENTO DOS TRABALHOS 104
3.3.1 Definição do escopo 104
3.3.2 Atividades de pesquisa 105
4 RESULTADOS DA DSR NA CONSTRUÇÃO DO MÉTODO 108
4.1 ATIVIDADES 1, 2 E 3 DA METODOLOGIA DSR 108
4.1.1 Pesquisa bibliográfica sobre o conceito de exergia 108

4.1.2 Identificar problema e motivação da pesquisa e definir os objetivos 109
4.1.3 Pesquisa bibliométrica sobre EFVs e PRs 109
4.2 (ATIVIDADE 4) IDENTIFICAR FERRAMENTAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO 109
4.2.1 Fontes de dados de exergia 110
4.2.2 Utilização dos dados de exergia 112
4.2.3 Cálculo dos fluxos de exergia na ferramenta SIMAPRO 113
4.2.4 Análise decisória por multicritério 114
4.3 ARTEFATO 122
4.3.1 Definir os cenários de análise (Atividade 5) 122
4.3.2 Apresentação do método (Atividade 6) 129
4.4 DEMONSTRAÇÃO 133
4.4.1 Definição de produto de referência (Atividade 7) 133
4.4.2 Aplicação do RIPEx (Atividade 8) 135
4.5 AVALIAÇÃO (ATIVIDADE 9) 150
4.6 DISCUSSÃO 152
5 CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES 154
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS 157
REFERÊNCIAS 158
ANEXOS 176
ANEXO A – VISTA EXPLODIDA DO PFV FORNO MICRO-ONDAS NN-G55 BH 127 60HZ 177

1 INTRODUÇÃO

O aumento global da quantidade de resíduos representa um sério desafio para as organizações e a sociedade na busca pelo desenvolvimento sustentável, visto que ameaçam a saúde, o equilíbrio ambiental e comprometem economias, resultando em um quadro de elevado risco ao futuro da humanidade e à estabilidade da sociedade na forma que a conhecemos hoje. Sob uma ótica mais imediata, já existem tratados globais, legislações locais e diretrizes específicas que impõem uma série de condições para a gestão de resíduos que devem ser cumpridas. Por exemplo, já são praticadas hoje ao longo da cadeia de ciclo de vida uma série de estratégias em diferentes fases: na fase de projeto e manufatura, o uso restrito ou proibido de certas substancias; na fase de descarte a logística reversa para produtos de reconhecido impacto ambiental; na fase de recuperação, pré-requisitos em forma de estratégias de fim de vida (EFV), visando a integração da reciclagem de determinado produto ou serviço com rendimentos mínimos pré-estabelecidos para a recuperação de materiais e energia.

Assim sendo, zelar pela sustentabilidade é a única forma de garantir a disponibilidade de recursos necessários ao desenvolvimento humano da geração atual sem ameaçar as gerações futuras (COMMISSION, 1987). Ainda mais, é a única forma de diminuir impactos ambientais, de estender a continuidade dos negócios e a viabilidade das economias, além de cumprir normas regulamentares (CUI, J. *et al.*, 2003; KUEHR *et al.*, 2003; IAER, 2006).

A produção, utilização e eliminação de produtos em fim de vida (PFV) estão entre as principais causas de poluição e esgotamento dos recursos devido à escassez de matérias-primas e à capacidade ambiental limitada em absorver resíduos e emissões (DUFLOU *et al.*, 2008). Como exemplo do crescente problema, entre as muitas formas de resíduos, destacam-se os aparelhos elétricos e eletrônicos em fim de vida, também conhecido como lixo eletrônico (*e-waste*), caracterizando atualmente o fluxo de resíduos de mais rápido crescimento no mundo em uma alarmante taxa de 3 a 5% ao ano (DWIVEDY *et al.*, 2013). Este é um resíduo rico em diversidade de materiais e por isso, amplamente análogo ao lixo oriundo dos produtos em fim de vida em geral, sendo portanto capaz de tangibilizar o vulto de resíduos, uma vez que somente esta categoria representa globalmente cerca de 50 milhões de toneladas de lixo descartados anualmente,

sobretudo, devido à adoção generalizada da eletrônica em produtos de consumo e às mudanças tecnológicas aceleradas no ambiente dinâmico atual (MENIKPURA *et al.*, 2014).

Frente a esse problema e em contrapartida, diferentes EFVs são adotadas dentre as quais a Reciclagem é amplamente reconhecida e adotada como sendo uma estratégia amigável ao ambiente e a abordagem mais adequada para gerir eficazmente o lixo e minimizar o seu impacto negativo sobre o meio ambiente (OGUCHI *et al.*, 2013). Além disso, reduz o desperdício de materiais e cria oportunidades de negócio, emprego e renda, suportando indiretamente o pilar social da sustentabilidade.

De forma a compreender a complexidade das EFVs, caracterizada por meio de inúmeros processos que visam em essência a recuperação, é importante notar que maioria dos produtos de consumo contém uma grande variedade de diferentes materiais, unidos em conjuntos de maior ou menor complexidade, tornando sua desmontagem completa muito cara quando estes produtos são descartados. Tal dificuldade motiva o fato de que ao invés da desmontagem, a fim de recuperar os materiais nesses produtos, muitos recicladores atualmente aplicam processos de pulverização e posteriormente uma série de processos de separação. A pulverização de produtos de consumo é comumente chamada de trituração ou moagem. Durante a trituração, o produto é quebrado em partículas menores para liberar os materiais contidos sendo posteriormente, submetidos a diversos processos de separação (CASTRO, M. B. G. *et al.*, 2007).

Entretanto, a eficiência da tecnologia atual só é capaz de separar e recuperar materiais, nos níveis mínimos estipulados pela regulamentação ou por requisitos técnicos quanto à pureza de materiais recuperados, por meio de diferentes cenários e EFVs. Esses, por sua vez, são caracterizadas pela adição e combinação de uma série de processos que podem incluir, ou não, desmontagem, moagem, separação e limpeza. Porém, uma vez que esses processos, por si só, consomem materiais, energia e também geram resíduos, eles podem tornar o processo geral de reciclagem ineficiente, tanto do ponto de vista ambiental como do consumo de energia (DENG *et al.*, 2006).

Sendo a Reciclagem uma EFV que visa fazer melhor uso dos recursos, a eficiência dos seus processos torna-se um ponto chave, sem o qual, paradoxalmente não haveria como garantir, por meio da Reciclagem, o melhor uso dos recursos disponíveis, nem como assegurar a viabilidade econômica dos processos ou a recuperação e reuso adequado de materiais em níveis sustentáveis (DUFLOU *et al.*, 2008).

Na busca por uma adequada investigação, é encontrada a abordagem baseada no conceito de exergia, a qual vem sendo adotada na análise da eficiência energética de processos industriais e projetos de máquinas e dispositivos nas mais diversas indústrias, desde células de combustível a sistemas de voos em aeronaves. Fundamentada na Segunda Lei da Termodinâmica, a abordagem de exergia é capaz de revelar o quanto de uma dada quantidade de energia está sendo realmente transformada em trabalho, e quanto dela está sendo irreversivelmente destruída, logo é expressa na mesma unidade da energia. Dessa forma e sobre as eficiências, a energética está baseada em princípios de conservação da Primeira Lei da Termodinâmica, enquanto a eficiência exergética difere por usar os conceitos da Segunda Lei para avaliar quantitativa e qualitativamente toda a conversão de energia em um processo. A utilização deste parâmetro permite diferenciar as perdas para o ambiente das irreversibilidades internas, e refletir o desempenho de um processo com base no limite máximo imposto pela Primeira e Segunda Leis (GALLO, 1990).

Existem, por exemplo, conversões de energia que são altamente destruidoras de exergia, embora uma análise energética indique que sejam altamente eficientes na conversão de energia, sendo um caso muito comum o aquecedor elétrico (ORTIZ *et al.*, 2013). Portanto sendo este o motivo pelo qual muitos pesquisadores defendem o uso da abordagem por exergia onde verdades tidas como certas, foram desafiadas. Por exemplo, Gutowski *et al.* (2009) demonstram que processos de fabricação tidos como modernos seriam, do ponto de vista energético, menos eficientes que muitos processos tradicionais e relativamente ultrapassados, e a utilização do conceito de exergia pode ser usado para melhorá-los. Em outro trabalho, foi identificado que, em muitos casos, a legislação com propósitos ambientais impõe índices de recuperação tão elevados que ferem princípios da Segunda Lei da Termodinâmica (IGNATENKO *et al.*, 2007). Desse modo, a exergia se sobressai por ser capaz de revelar ineficiências que à primeira vista são desconhecidas. Além disso, possui relações que por sua própria natureza, estão diretamente ligadas com dois dos três fatores do tripé da sustentabilidade. Do ponto de vista ambiental trata-se de um indicador para a depleção de materiais e uso da energia, do ponto de vista econômico, sendo a exergia a parte útil da energia, tem valor econômico, sendo importante para avaliar a sustentabilidade econômica dos negócios que dependam da eficiência energética (DINCER *et al.*, 2012). Sendo assim, por seu caráter elucidativo para com os pilares da sustentabilidade e a eficiência energética, é capaz de orientar decisões na definição e

análise de diferentes cenários de processos de reciclagem (PR), a fim de verificar se são eficientemente sustentáveis, seja ambiental ou economicamente.

Em suma e diante do breve arcabouço científico exposto, as perguntas de pesquisa a serem mais adiante confirmadas e que neste momento se colocam são:

Q1. Avaliando-se a eficiência energética dos processos de reciclagem pela abordagem de exergia, seria refutado o senso comum[3] que afirma que reciclar buscando demandas elevadas de recuperação seria sempre favorável à sustentabilidade?

Q2. Conforme precedentes na literatura, o uso da avaliação por exergia já foi capaz de desafiar o senso comum[3] demostrando que, em termos energéticos, os processos de fabricação e a legislação tidos como modernos, devem ser melhorados. O mesmo tipo de verificação poderia ser feito em relação a cenários alternativos de fim de vida?

Dessa forma, é possível formular a hipótese de que há indícios sugerindo que certos cenários de reciclagem possam não ser favoráveis à sustentabilidade sob o viés da eficiência exergética.

1.1 ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados os resultados de um levantamento na literatura buscando descartar hipóteses já abandonadas por pesquisas prévias, além de confirmar se algum trabalho já respondeu adequadamente, às perguntas de pesquisa propostas.

As pesquisas foram realizadas nas bases de dados *Science Direct*, CAPES, *Springer, Web of Science, SCOPUS* e *Google* Acadêmico, tendo este último colaborado para a descoberta de teses e dissertações. As pesquisas ocorreram no período de 15 de Junho a 30 Novembro de 2015. A fim de conjugar as palavras-chave ligadas à eficiência

[3] Senso comum é a suposta compreensão do mundo resultante das experiências atuais que continuam sendo efetuadas, sem depender de uma investigação detalhada para se alcançar verdades mais profundas, como por exemplo as científicas (WIKIPEDIA, 2015).

energética e reciclagem, buscou-se na base *Web of Science,* textos publicados sem restrição de data, utilizando-se as palavras-chave relacionadas no Quadro 1.

***Strings* de Pesquisa**
Energy Efficiency
Exergy
Recycling

Quadro 1 – Palavras-chave de pesquisa.

Fonte: Autoria própria.

Depois de uma leitura não estruturada de títulos e resumos dos artigos mais citados e relacionados com as palavras-chave, notou-se que outros termos também eram alinhados com o foco da pesquisa em desenvolvimento, logo a lista de palavras chave foi ampliada conforme o Quadro 2.

***Strings* de Pesquisa**
Energy Efficiency
Exergy
Second law
Thermodynamic
Recycling
Waste recovery
Exergo economic
Exergo environment
Exergetic
Thermoeconomic
Material recover

Quadro 2 – Lista ampliada de palavras-chave de pesquisa.

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, para a construção do portfólio de pesquisa foram considerados os seus sinônimos e variantes terminológicas do Quadro 2, sem restrições para a data ou idioma da publicação, tendo sido incluídos os comandos chamados operadores booleanos mais comuns como 'E', 'OU' e 'NÃO' combinados conforme Quadro 3 (ELY *et al.*, 2007).

Combinações dos *strings* de pesquisa							
Palavra chave	Termo	Operador booleano	Termo	Operador booleano	Termo	Operador booleano	Termo
Reciclagem	*Recycling*	OR	*Waste recovery*	OR	*Material recover*	OR	*Exergo environment*
Operador booleano	***AND***						
Eficiência energética	*Energy Efficiency*	OR	*Thermoeconomic*	OR	*Thermodynamic*	OR	*Exergo economic*
Operador booleano	***OR***						
Exergia	*Exergy*	OR	Exergetic	OR	*Second law*	-	-

Quadro 3 – Combinações dos *strings* de pesquisa.

Fonte: Autoria própria.

A partir desse ponto, foi realizado um estudo bibliográfico nos moldes daquele proposto por Verhagen *et al.* (2012), conforme Figura 1, sem restrição de data ou idioma, que permitiu encontrar os trabalhos mais importantes que se propõem a aprimorar a eficiência energética na reciclagem, não necessariamente sob o viés da abordagem de exergia.

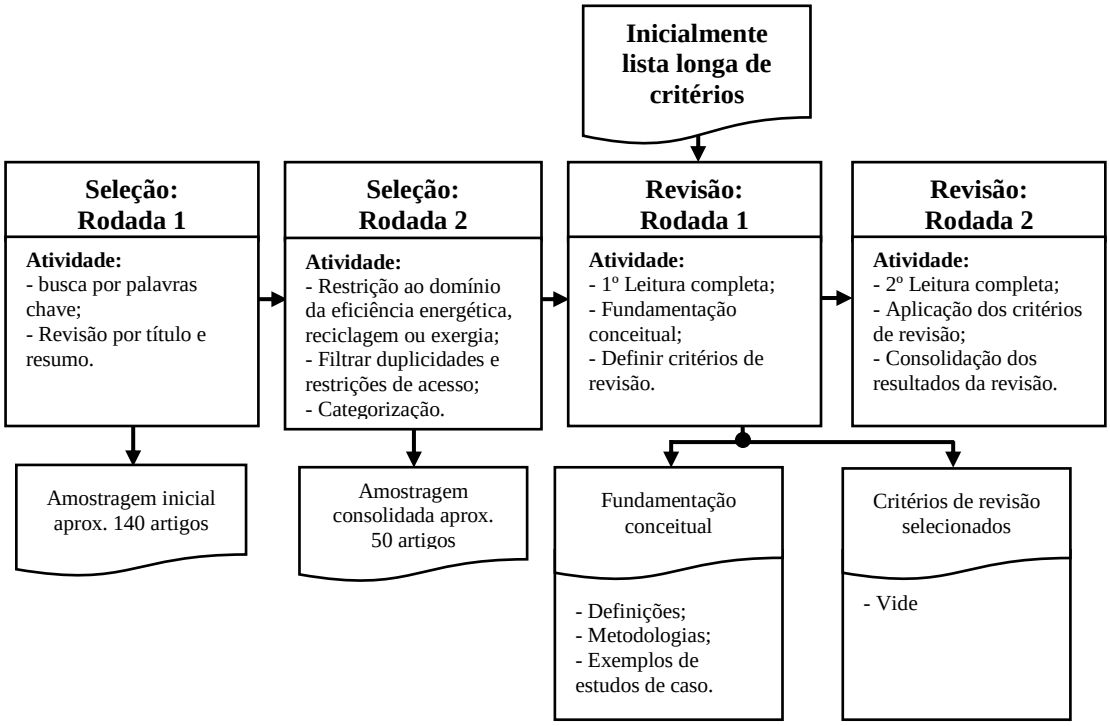


Figura 1 – Seleção, classificação e processo de revisão.
Fonte: Adaptado de Verhagen *et al.* (2012, p.5).

Essa primeira rodada envolveu uma análise de todos os resultados da pesquisa por meio do seu título e resumo. Uma segunda rodada de seleção foi realizada com base na leitura completa e independente de cada artigo. Três critérios de seleção foram aplicados nessa etapa: para a seleção, os artigos tinham que estar dentro ou estreitamente relacionadas com o domínio da reciclagem, da abordagem de exergia ou da eficiência energética.

Após a amostragem final, os 50 artigos foram lidos na íntegra duas vezes. Antes de iniciar a segunda rodada de leitura completa e análise, uma lista de critérios de revisão foi composta. Assim a primeira leitura teve como objetivo identificar as bases conceituais de desempenho da Reciclagem e na consolidação dos critérios de revisão pela seleção dos critérios mais importantes, ou seja, daqueles que refletem os problemas mais comuns encontrados na primeira revisão. Após a primeira leitura de análise, a lista preliminar de critérios de revisão foi determinada em: metodologia, impacto ambiental, eficiência energética, quantificação de custos e benefícios. É digno de nota que nessa primeira revisão tenha sido identificado o estudo de Wibowo (2015), propondo justamente um grupo de critérios para avaliar e apoiar o processo decisório sobre o

desempenho dos processos de Reciclagem dos produtos em fim de vida, hierarquizados na Figura *2*.

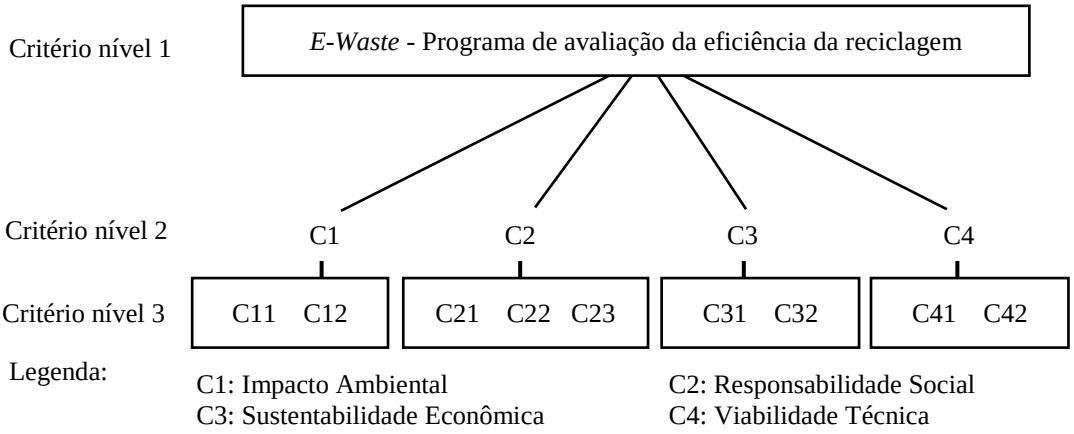


Figura 2 – Hierarquia de lixo eletrônico para avaliação de performance de reciclagem.

Fonte: Adaptado de Wibowo (2015, p.129).

Dado ao nível de detalhamento e relevância dos critérios indicados no artigo de Wibowo (2015) e visto que eram alinhados àqueles definidos na primeira leitura integral além de ampliá-los, decidiu-se por criar uma lista final de revisão adotando os critérios comuns ao artigo e à lista preliminar resultante da primeira leitura. A lista final resultante dessa fusão está demonstrada no Quadro *4* para cada critério final adotado.

Critérios propostos por Wibowo (2015)			Lista preliminar de critérios da primeira leitura completa	Lista final de critérios adotados
Critério Nível 2	**Critérios Nível 3**	**Descrição Nível 3**		
-	-	-	Aderência a Metodologia	**Aderência a Metodologia**
-	-	-	Eficiência energética	**Eficiência energética**
Impacto ambiental (C1)	Redução de aterro (C11)	(C11) Mede a redução da quantidade de lixo / resíduos a ser despejado no aterro devido à adopção de um programa de reciclagem específico na organização.	Impacto ambiental	**Redução de aterro**
	Conformidade regulamentar (C12)	(C12) Centra-se no nível de compromisso com o cumprimento da legislação ambiental aplicável e regulamentos de um programa de reciclagem específico na organização.		**Conformidade regulamentar**
Responsabilidade social (C2)	Saúde e segurança no local de trabalho (C21)	(C21) Refere-se à redução do número de pedidos de indenização do trabalhador na organização.	-	**Saúde e segurança no local de trabalho**
	Aceitabilidade pública (C22)	(C22) Reflete sobre a atitude / percepção geral do público para o programa de *e-waste* da organização.	-	**Aceitabilidade pública**
	Reputação corporativa (C23)	(C23) Refere-se ao nível de satisfação das partes interessadas sobre os programas de *e-waste* da organização.	-	**Reputação corporativa**
Sustentabilidade econômica (C3)	Benefício direto (C31)	(C31) Incide sobre a rentabilidade obtida com a aplicação eficaz de programas de reciclagem de lixo eletrônico.	Quantificação de custos e benefícios	**Benefício direto**
	Benefício indireto (C32)	(C32) Refere-se aos potenciais mercados e oportunidades somente explorados devido à implementação de programas de reciclagem *e-waste.*		**Benefício indireto**
Viabilidade técnica (C4)	Capacidade de separar os materiais (C41)	(C41) Reflete-se na capacidade de separar os materiais residuais que incluem a remoção de materiais tóxicos, plásticos clorados, metais ferrosos e não ferrosos.		**Capacidade de separar os materiais**
	Recuperação *e-waste* (C42)	(C42) Refere-se à quantidade de lixo que pode ser recuperado a partir do processo de reciclagem.		**Recuperação de materiais**

Quadro 4 – Lista de critérios para seleção final da revisão de literatura.

Fonte: Adaptado de Wibowo (2015).

1.1.1 Resultados da revisão bibliográfica

Nesta seção são apresentados os resultados da revisão bibliográfica. A amostra final da literatura resultante do processo de seleção é a seguir, descrito de forma cronológica e em detalhes, quanto à relevância e contribuição.

1.1.1.1 Resultados cronológicos e aderência ao tema

Os resultados estão apresentados na Tabela 1, revelando a relação de artigos pesquisados e valorados de acordo com os nove critérios de avaliação propostos por Wibowo (2015). Para a valoração adota-se uma escala de 0 a 3, sendo: 3 = relação forte; 1 = relação tênue e 0 = sem relação.

Como um dos objetivos da revisão bibliográfica é revelar novas oportunidades de pesquisa, mesmo que os aspectos sociais levantados na lista de critérios de Wibowo (2015) não tenham aparente relação com os propósitos dessa dissertação, os mesmos foram mantidos para que, em última instância, sirvam de ponto de partida a outros pesquisadores.

Tabela 1 – Portfolio final de artigos resgatados e valorados segundo critérios de eficiência da reciclagem.

Artigo	#	Mês/Ano (Aceitação)	Impacto ambiental (C1)		Responsabilidade social (C2)			Sustentabilidade econômica (C3)		Viabilidade técnica (C4)	
			Redução de aterro	Conformidade regulamentar	Saúde e segurança no trabalho	Aceitação pública	Reputação corporativa	Benefício direto	Benefício indireto	Capacidade de separar materiais	Recuperação de resíduos
			(C11)	(C12)	(C21)	(C22)	(C23)	(C31)	(C32)	(C41)	(C42)
Georgescu; Roegen (1971)	1	**/1971	1	1	0	0	0	**3**	1	1	3
Finnveden; Östlund (1997)	2	09/1997	0	0	0	0	0	**3**	1	1	0
Valero, Antonio (1998)	4	01/1998	1	0	0	0	0	**3**	**3**	**3**	0
Ayres (1999)	5	09/1998	**3**	1	0	0	0	1	1	1	**3**
Craig (2001)	6	09/2000	1	0	0	1	0	0	0	**3**	**3**
Gong; Wall (2001)	7	02/2001	0	**3**	0	1	1	1	1	0	0
Sciubba (2003)	8	11/2003	0	1	**3**	0	0	**3**	**3**	1	**3**
Castro *et al.* (2004)	9	04/2004	1	0	1	0	0	**3**	1	**3**	**3**
Amini *et al.* (2007)	10	01/2006	0	1	0	1	0	**3**	1	**3**	**3**
Castro, M. *et al.* (2007)	11	01/2007	0	0	0	0	0	1	0	**3**	**3**
Ignatenko *et al.* (2007)	12	03/2007	0	**3**	0	0	0	1	**3**	**3**	1
Warr; Schandl; Ayres (2008)	13	02/2008	0	0	0	0	0	1	1	0	1
Gutowski *et al.* (2009)	14	12/2008	0	1	0	0	0	**3**	**3**	1	1
Valero, Alicia; Valero (2010)	15	02/2010	0	0	0	0	0	**3**	**3**	0	0
Allwood *et al.* (2011)	16	11/2010	0	0	0	0	0	**3**	**3**	**3**	1
Valero, Alicia; Valero (2013)	17	02/2013	1	0	0	0	0	**3**	1	**3**	1
van Dijk; Tenpierik; van den Dobbelsteen (2014)	18	10/2013	**3**	**3**	1	1	0	1	1	1	1
Hamut; Dincer; Naterer (2014)	19	03/2014	1	1	0	0	0	**3**	1	0	0
Jawad; Jaber; Bonney (2015)	20	06/2014	0	1	1	1	1	**3**	3	0	0

Fonte: Autoria própria.

Nota: A escala de valoração corresponde a 3= relação forte; 1= relação tênue; e 0 = sem relação, segundo critérios de eficiência da reciclagem propostos por Wibowo (2015).

Conforme demonstrado no Gráfico 1, uma vez analisados, de forma quantitativa, os valores atribuídos à literatura da Tabela 1, é possível identificar que grande parte da literatura, concentra seus esforços em utilizar a abordagem exergética na reciclagem com objetivos técnicos ou econômicos. Por outro lado, aspectos ambientais, no contexto exergético da reciclagem, ainda são pouco explorados e os sociais, quase desconsiderados.

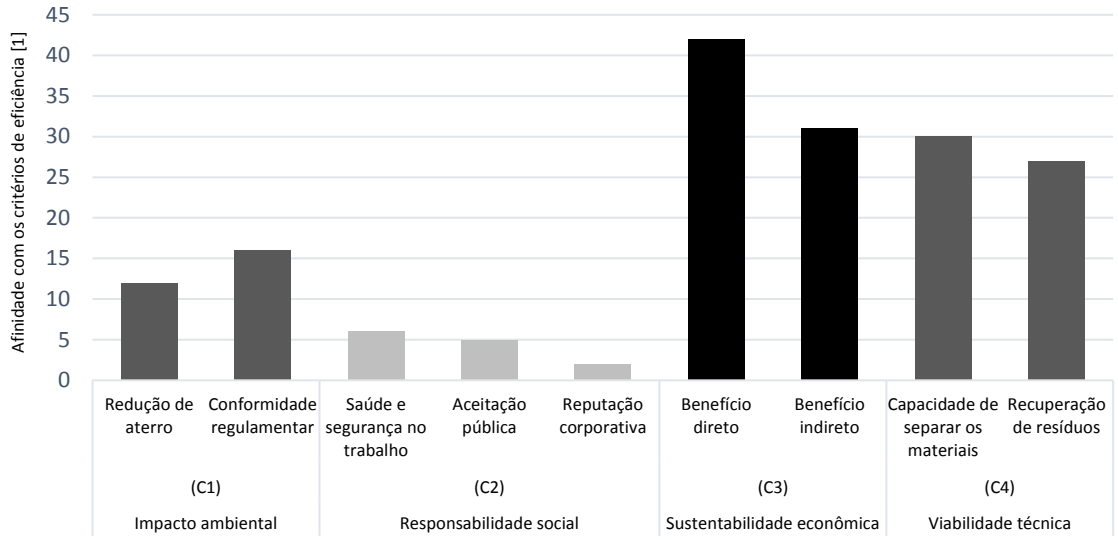


Gráfico 1 – Alcance da literatura sobre os critérios de eficiência na reciclagem.
Fonte: Autoria própria.

1.1.1.2 Relevância e contribuições

Nesta seção e em acordo com a lista final de critérios de avaliação já demonstrada no Quadro *4*, são resgatadas as principais contribuições relacionadas exclusivamente para com os propósitos desta pesquisa s contribuições são então expressas de forma descritiva e em ordem cronológica a seguir.

Com propósitos predominantemente econômicos Georgescu *et al.* (1971) realizaram um dos primeiros trabalhos relacionando a Segunda Lei da Termodinâmica (SLT) e condições gerais de eficiência energética, de exergia, de sustentabilidade e de reciclagem. Entre as proposições geralmente não controversas do autores estão as

seguintes: (i) o bem-estar humano é, até certo ponto, uma função da produção econômica; (ii) a produção é inerentemente de consumo material e energético; (iii) o processamento de material requer energia disponível (ou seja, exergia); ele converte materiais de baixa entropia (por exemplo, combustíveis fósseis, minérios metálicos) em materiais de alta entropia (por exemplo, resíduos); (iv) o estoque de materiais de alta qualidade (baixa entropia), incluindo combustíveis, no planeta Terra é finito; (v) a reciclagem de materiais ou combustíveis conversora de materiais de alta entropia em materiais de baixa entropia, requer um fluxo exógeno de energia de baixa entropia (ou seja, exergia); e (vi) materiais nunca podem ser reciclados com uma eficiência de 100%, porque há sempre perdas entrópicas.

Em seguida é reforçada a relação entre exergia e o uso eficiente de materiais, afirmando que a exergia pode ser usada para analisar processos industriais, o consumo de exergia cumulativa de materiais produzidos e a conversão de recursos em toda uma sociedade (FINNVEDEN *et al.*, 1997). A seguir temos o primeiro trabalho a traçar uma relação clara entre exergia e eficiência na reciclagem. Em um estudo exergo-econômico Valero (1998) defende que para completar o ciclo de cálculo, é necessário calcular também o "custo exergético de substituição dos materiais" que foram degradados durante todo o ciclo de vida de um produto. Sobre a eficiência no uso dos materiais, Cossu *et al.* (2015) reforça o mesmo trabalho ressaltando que o processo de diluição, largamente utilizado nos processos de reciclagem, é conhecido como um dos mais irreversíveis, sendo muito fácil misturar e muito caro separar os materiais. Isto se reflete no fato da exergia destruída em um processo de mistura ser pequena enquanto a exergia necessária para separar o que foi misturado é enorme com a tecnologia humana existente. O mesmo autor advoga que somente mecanismos biológicos podem fazê-lo a um custo razoável, fato que poderia caracterizar desde já, uma oportunidade de pesquisa (VALERO, ANTONIO, 1998).

Ressaltando haver contraexemplos na natureza Ayres (1999) posiciona-se contrário ao argumentado por Georgescu *et al.* (1971) que defendem a reciclagem total como sendo impossível para uma sociedade industrial, como consequência da Segunda Lei da Termodinâmica, e demonstra que em respeitando-se certas condições, tal limitação não existe. Entretanto, aceitando como certo que até mesmo o processo de reciclagem mais eficiente irá gerar resíduos de alta entropia. Esses resíduos se acumulam ao longo do tempo em um armazém ou "lixeira", que pode ser a Terra. Portanto, dado o postulado

de exergia, não há nenhuma barreira para o tratamento da "lixeira" como uma pilha de minério e fonte de recuperação de materiais, e que qualquer resíduo *a posteriori*, retorna à "lixeira" (AYRES, 1999).

Afirmando que o maior desafio da eficiência energética na reciclagem é a separação de partículas misturadas aleatoriamente Craig *et al.* (2001) demonstraram, por meio de gases, como esse problema pode ser melhor abordado por meio de um cálculo de "entropia de mistura". Além disso, a análise apresentada mostra que a exigência de exergia para separação por mol de uma dada substância aumenta à baixa diluição. Isto significa que é mais eficiente executar sistemas de reciclagem, visando a separação, com substâncias na mais alta concentração possível.

Em seguida a abordagem de exergia é proposta como um indicador onde todos os resíduos de produtos poderão ser tributados pela quantidade de exergia liberada no ambiente, uma vez que essa, relaciona-se com o impacto ambiental (GONG *et al.*, 2001). Ainda como um indicador, é proposto e exemplificado como a abordagem de exergia pode auxiliar na avaliação de alternativas técnicas de sistemas de reciclagem (SCIUBBA, 2003).

Do ponto de vista da eficiência energética são então identificados trabalhos de destaque quanto à metodologia aplicada, em um estudo de caso sobre a melhoria de eficiência de uma turbina por meio de estudo exergético, explicando de forma detalhada o modo como cada subcomponente ou subprocesso é avaliado (ALVES, 2004).

Com base na dificuldade e importância da eficiência na separação dos materiais, são encontrados estudos relevantes no contexto da metalurgia. É proposto um modelo de decisão fundamentado em limitações de exergia, que avalia a compatibilidade entre diferentes ligas e, frente à problemática do elevado consumo energético dos processos de separação, é então questionada a real necessidade de separação, bem como níveis de contaminação aceitáveis (CASTRO *et al.*, 2004). Ainda sobre contaminações, é proposto um método que combina perdas exergéticas e consequente necessidade de diluição como indicadores de qualidade em substituição da massa, durante a recuperação e reciclagem de metais (AMINI *et al.*, 2007). No mesmo contexto e com uma abordagem bastante similar, são propostos estudos por exergia como um indicador de eficiência energética para os processos de reciclagem de produtos em fim de vida (CASTRO, M. *et al.*, 2007). É digno de destaque que tenha sido identificado e ressaltado que a legislação

corrente, em muitos casos, fere princípios da Segunda Lei da Termodinâmica (IGNATENKO *et al.*, 2007).

Em termos de metodologia e focado em eficiência energética ao longo do ciclo de vida dos produtos, um estudo ganha destaque ao demonstrar que o método Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) combinado ao estudo de exergia acumulada ao longo da vida de um produto é superior ao estudo que demonstra apenas o consumo da energia, dado que revelaria a eficiência energética durante todas as etapas de vida "do berço ao túmulo" portanto, passível de uso para análise dos processos de reciclagem e EFVs. Vale lembrar que o faz lançando mão de bancos de dados largamente aceitos e testados para o Inventário de Ciclo de Vida (ICV) presentes no *Ecoinvent* (BÖSCH *et al.*, 2006). Em seguida a discussão sobre eficiência energética ganha foco principal em um estudo que faz uma importante contribuição, relatando historicamente a evolução da eficiência energética sob o viés exclusivo da exergia (WARR *et al.*, 2008).

Sobre processos industriais, por meio da abordagem de exergia Gutowski *et al.* (2009) realizaram um estudo a fim de verificar a eficiência energética de dois grupos de processos de fabricação, um dado como tradicional e outro como moderno, tendo como resultado duas grandes contribuições: pode identificar que processos de fabricação tidos como modernos são até sete vezes mais consumidores de energia que processos tidos como tradicionais. Em segundo, quando propõem um método que generaliza os processos industrias e os avalia em subprocessos ou etapas, analisando os fluxos de exergia em cada um deles, logo, de forma análoga ao que acontece com os processos industriais de reciclagem e suas etapas.

Com uma visão pautada no futuro Valero *et al.* (2010) realizaram um estudo, usando o conceito de exergia, para criar a respeito de 51 minérios terrestres em estado natural, um levantamento do estoque de recursos exergéticos disponíveis no planeta e destaca que o ferro (63%), o alumínio (24%) e o cobre (6%) juntos são responsáveis por 93% da degradação exergética dos minerais do planeta. Com base nas curvas de Hubbert (1962), traçam um "relógio exergético regressivo" apontando para a depleção desses recursos como se conhecem na natureza e assim, ressaltando a importância da reciclagem. Seguindo esse cenário de escassez futura Allwood *et al.* (2011) reiteram a necessidade da reciclagem, da eficiência energética e do uso adequado dos materiais, afirmando que "devemos estar preparados para um futuro no qual teremos de lidar com materiais

impuros", defendendo com vigor o que parece se revelar uma tendência a estratégias de projeto e fim de vida voltadas à remanufatura e reciclagem.

No mesmo período parece haver consenso científico que atingir a eficiência dos processos de reciclagem é um processo decisório complexo, sobretudo frente ao crescente número de EFV propostas. Com base nisso, nota-se então um maior número de artigos preocupados em propor métodos para apoiar o processo decisório, a respeito dos possíveis cenários de reciclagem e fim de vida. Em um bom exemplo Dhouib; Elloumi (2011) propõem um método multicritério que envolve, entre outros aspectos, a energia, notando-se maior relevância com os propósitos desse estudo, quando faz um apanhado dos métodos de suporte a decisão, a fim de justificar a contribuição científica de sua proposta. Aproveitando seu rico referencial teórico, sete artigos contendo os métodos citados foram lidos, buscando-se verificar a presença de critérios que envolvam a energia e sua eficiência no processo decisório. Como resultado, a maioria parece priorizar: (i) taxas de recuperação de materiais em cumprimento à legislação, (ii) impactos ambientais e (iii) viabilidade econômica. Nesse contexto de prioridades é importante notar que poucos casos consideram a energia e quase nenhum, leva em consideração a eficiência do consumo de energia nos processos de reciclagem, como um critério de primeira importância.

Em seguida, são percebidas discussões sobre a eficiência energética e a falta de políticas que incentivem o desenvolvimento de tecnologias de consumo eficiente e não de redução de consumo (BERTOLDI *et al.*, 2013). Nesse contexto, mais uma vez, a exergia aparenta ser a abordagem correta.

Dentre os obstáculos para a reciclagem, Valero *et al.* (2013) realizaram um importante trabalho ressaltando que para certas substâncias, os custos de reciclagem podem ser, em função dos inúmeros subprocessos, ainda maiores do que os custos de extração e refino direto de fontes naturais, e propõe que a unidade de medida da eficiência seja a exergia. Faz uma última contribuição reunindo e apontando pontos fortes e fracos de uma série de métodos de eficiência energética, inclusive exergia. No ano seguinte, é publicada uma revisão de literatura visando a sustentabilidade, e nesse contexto a reciclagem, confirma-se a abordagem de exergia como método para guiar a eficiência energética bem como para a redução de resíduos, logo corroborando com as práticas de fim de vida e reciclagem (VAN DIJK *et al.*, 2014). No momento seguinte, combinando o método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) com a análise exergética, é proposto um

método para avaliar o impacto ambiental de um veículo hibrido-elétrico, fazendo a sua decomposição em subsistemas e sobre estes uma análise da exergia destruída, tendo identificado que nesse caso, os sistemas de troca de calor desempenhavam um impacto maior (HAMUT *et al.*, 2014).

Visando o controle de custos oriundos da ineficiência energética, se propõe o método de "Contabilidade Exergética", atribuindo valores exergéticos equivalentes aos custos de capital, trabalho e manutenção ambiental de um sistema. O método combina a análise de exergia clássica com os já conhecidos fatores de sustentabilidade (JAWAD *et al.*, 2015).

Em um estudo recente, Cimpan *et al.* (2015) abordaram a eficiência das usinas de reciclagem. Fazem uma importante contribuição quando listam e identificam níveis de eficiência na recuperação de diferentes materiais, conforme a tecnologia aplicada, tendo revelado ainda a importância do envolvimento da sociedade nos processos de separação. Por fim alegam, por meio dos elevados índices de recuperação atingidos, que os processo de separação encontram-se hoje bastante maduros, entretanto sem abordar se estes são energeticamente eficientes.

1.1.2 Considerações gerais e oportunidades sobre a revisão bibliográfica

Com os resultados alcançados no levantamento do estado da arte, é possível intuir que as questões de pesquisa são corretas, entretanto não às responde de forma completa. Ainda assim, a pesquisa permitiu constatar que os métodos por abordagem de exergia frequentemente revelam adequadamente e com vantagens, as eficiências energéticas, porém, envolvem um levantamento de dados complexos em diferentes campos de conhecimento (i.e. mecânica, química e energia). Sendo assim, muitas vezes se faz necessário o uso de dados definidos por meio de estimativas, hipóteses ou suposições, fato que coloca em risco os resultados obtidos ou torna muito difícil sua verificação ou reprodução no ambiente real.

Ainda sobre os métodos de exergia, estes se caracterizam predominantemente por uma abordagem especifica, ou seja, de um processo ou equipamento em especial e

raramente o fazem de forma sistêmica considerando, por exemplo, de toda a cadeia dos diferentes e sucessivos processos de reciclagem. Sendo assim, revela-se outra oportunidade de pesquisa para um método que o faça em momentos identificados como relevantes para a eficiência geral da reciclagem.

Também é possível sugerir que uma importante parcela de estudos, processos e tecnologias vêm sendo criados ou têm sido geridos, sem um conhecimento ou preocupação aprofundados sobre a eficiência energética e sua importância para com propósitos de sustentabilidade. Ainda mais, que a melhoria da eficiência dos processos de reciclagem, por meio de abordagens de exergia e de seus benefícios nos campos de custos e impacto ambiental, vem sendo pouco explorados e, portanto, apresentam uma boa oportunidade de estudo. Por fim, como sugerem Valero, Antonio (1998), a busca por avanços na eficiência nos processos de reciclagem poderia ainda se dar dentro do crescente campo da biomimética[4], constituindo assim mais uma oportunidade de pesquisa.

1.2 OBJETIVOS

A fim de direcionar o trabalho e tornar possível a mensuração tangível dos resultados encontrados, são definidos a seguir o objetivo geral e em seguida, seu desdobramento em objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo principal, propor um método de avaliação da eficiência energética por meio da demanda exergética agregada aos produtos em fim

[4] A biomimética é uma área da ciência que tem por objetivo o estudo das estruturas biológicas e das suas funções, procurando aprender com a Natureza, suas estratégias e soluções, e utilizar esse conhecimento em diferentes domínios da ciência (WIKIPEDIA, 2016a).

de vida, bem como, da exergia consumida pelos processos de reciclagem, uma vez influenciados pelas estratégias de fim de vida.

O resultado deverá servir como uma indicação para a composição de cenários de reciclagem bem como para a seleção de estratégias de produtos manufaturados em fase de concepção ou em fim de vida, com vistas à sua eficiência e real contribuição para a sustentabilidade.

Tal propósito deverá ser alcançado por meio do seu desdobramento e cumprimento dos objetivos específicos a seguir.

1.2.2 Objetivos específicos

O1. Resgatar metodologia para a abordagem por exergia, descrevendo as inter-relações e relevâncias para com a sustentabilidade e eficiência nos processos de reciclagem;

O2. Conhecer e selecionar as PRs praticados ao longo das EFVs e tidos como eficientes;

O3. Identificar fontes de dados de exergia presentes nas EFVs e PRs;

O4. Definir cenários relevantes que incluam EFVs e PRs;

O5. Demonstrar a solução resultante do método proposto; e

O6. Avaliar e validar o método proposto.

1.3 JUSTIFICATIVA

Esta seção pretende, primeiramente, descrever brevemente, a metodologia atual para, em seguida, advogar a respeito do método proposto.

No contexto atual, existe uma grande variedade de métodos que se prestam a auxiliar na análise e decisão das melhores EFVs para um dado PFV. Em sua maioria, são métodos complexos quanto à variedade de entradas e métricas de saídas, demandando conhecimento específico e, por isso, acabam sendo pouco praticados. Na ausência ou não

aplicação de métodos, tomadores de decisão acabam por lançarem mão de generalizações que, como se pretende demonstrar, nem sempre são as mais acertadas.

Adicionalmente, é possível notar que boa parte dos métodos atuais são comumente baseados em um ou, no máximo, dois dos três aspectos abaixo:

i. Impacto ambiental (em uma ou mais de suas várias categorias de impacto);
ii. Viabilidade econômica (custos de operação e oportunidades de mercado); ou
iii. Maior viabilidade técnica.

No que diz respeito aos momentos em que as análises e decisões sobre EFVs são relevantes, é possível identificar claramente dois eventos. O primeiro acontece ainda na fase de projeto, onde características do produto são definidas e exercem uma influência crucial, de natureza restritiva, sobre as EFVs que efetivamente poderão ser praticadas com maior ou menor eficiência. O segundo momento se dá, quando o produto atinge o seu fim de vida e, sob uma determinada analise ou por simples generalização, decide-se que EFVs podem vir a serem mais proveitosas.

Sobre este aspecto, é possível observar que os métodos atuais são fortemente inclinados a suportar a decisão em apenas um destes dois momentos. Portanto, torna-se inviável comparar àquilo que um dado método delineou na fase de projeto, com os resultados de um segundo método aplicado na fase de fim de vida, dificultando a pratica de *feedback* e o aperfeiçoamento dos cenários imaginados ou praticados, bem como dos próprios métodos.

Tendo assim exposto, brevemente, o universo de métodos encontrados com propósitos semelhantes aos desse trabalho, são descritos a seguir as características do artefato proposto e como se imagina oferecer melhorias em relação aos demais.

Sobre a multiplicidade de variáveis de saída, a análise pelo método de exergia mostra-se um aliado valoroso a medida em que reúne, e uma única métrica, uma expressão quantitativa e qualitativa que interpreta, simultaneamente, ineficiências técnicas e energéticas, fornece um indicador aceito de impacto ambiental e depleção de materiais e, por fim, uma métrica que permite indicar valor financeiro agregado.

Sobre aspecto temporal, o método proposto deve se aplicável em ambos os momentos e com uma mesma métrica. Portanto, tornando viável comparar àquilo que de imaginou na fase de projeto, com os resultados aplicados na fase de fim de vida,

permitindo a pratica de *feedback* e o aperfeiçoamento dos cenários bem como do método em si.

Ainda mais, do ponto de vista acadêmico, justifica-se por não haver sido encontrada na literatura escrutinada, nenhum estudo que tenha avaliado e valorado, por meio da abordagem de exergia, as inúmeras EFVs e seu impacto sobre a eficiência nos processos de reciclagem. Do ponto de vista industrial, justifica-se pela lacuna evidenciada na ausência de aplicação da abordagem por exergia, quando destinada a avaliar os processos de reciclagem, sobretudo na fase de projeto. Lacuna que aqui se atribuí ao desconhecimento da amplitude do seu potencial, bem como de métodos ou referenciais de apoio que viabilizem sua prática.

Este estudo pretende contribuir com a sociedade e a indústria à medida em que possa descrever e persuadir em um único trabalho, sobre todos os aspectos benéficos da abordagem de exergia, manifestada em suas diferentes formas encontradas na natureza e usadas na sociedade. Ainda mais, estando devidamente elaborados e quantificados o PFV de referência, bem como os diferentes cenários, estes permitirão sugerir, de forma análoga e sem a necessidade de cálculos adicionais, quais EFVs ou modelagens de processos de reciclagem podem resultar em uma estratégia global de reciclagem exergeticamente mais eficiente.

Por fim, o trabalho apresentará de forma fundamentada, àqueles que praticam ou pretendem praticar a reciclagem, um estudo que serve de referência para a aplicação da abordagem por exergia e assim, tornar possível avaliar e aprimorar de forma pratica e robusta as EFVs. Nesse sentido e em última instancia, beneficiando a sociedade e a indústria com práticas mais competitivas e de impacto ambiental controlado, de modo que o façam de forma consciente e verdadeiramente sustentável como a reciclagem deve ser.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos. No capítulo 2, são fornecidos ao leitor os conceitos fundamentais sobre exergia e suas relações para com a

eficiência energética, passando pela definição dos principais autores do tema, suas diferentes formas de apresentação na natureza. Em seguida, são apresentadas suas vantagens e inter-relações com o tripé da sustentabilidade, seguidas de uma revisão das diferentes abordagens por meio da exergia, de modo que o método mais adequado para a abordagem de exergia, no contexto proposto, seja selecionado e justificado. Ainda neste capítulo, serão resgatadas e apresentadas as EFVs mais relevantes e, pelo seu desdobramento, suas relações para com a eficiência dos processos de reciclagem. O objetivo desta parte do trabalho é conhecer a existência e relevância das práticas de reciclagem atuais bem como das EFVs de modo a servir de base fundamentada para os cenários que pretendem validar o método proposto e critérios para a busca de maiores informações.

No capítulo 3 são apresentados os aspectos metodológicos seguidos de uma descrição do tipo de pesquisa, de sua abrangência, limitações e aplicabilidade. Em seguida, os métodos e materiais adotados para atingir os objetivos da pesquisa.

No capítulo 4 tem início o desenvolvimento da pesquisa e a entrega dos resultados na forma da execução das atividades previamente prescritas no capitulo 3. De forma sucinta, este capítulo engloba e revisão bibliométrica buscando identificar o estado da arte em PRs nas EFVs e a identificação das ferramentas e métodos de apoio que farão parte do método a ser proposto. Em seguida, os resultados da construção do artefato são apresentados por meio da construção dos cenários que farão parte do método para a então demonstrá-lo. A seguir, um produto de referência relevante é definido para que seja possível aplicar e avaliar o método e, por fim, encerrando com uma avaliação seguida de discussão.

No capítulo 5 o trabalho é encerrado apresentando as principais contribuições e as oportunidades identificadas ao longo da pesquisa, seguidas das considerações finais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE EXERGIA

Nesta seção são executadas as atividades necessárias para satisfazer o objetivo específico: "O1. Resgatar metodologia para a abordagem por exergia, descrevendo as inter-relações e relevâncias para com a sustentabilidade e eficiência nos processos de reciclagem;". Sendo assim, serão apresentados conceitos e definições, os quais servirão de fundamentação para o restante da pesquisa, sendo apresentados brevemente o histórico, e os princípios fundamentais que estabelecem relações entre a exergia e sustentabilidade e por fim, sua relevância para com a eficiência na reciclagem e na escolha das EFV.

2.1 EXERGIA

De acordo com Rant (1956), o primeiro autor a empregar o termo exergia, defende que a energia é composta por uma porção disponível para produzir trabalho útil, chamada de exergia, e uma quantidade de energia que não está disponível para executar trabalho, conhecido como anergia.

A necessidade de se determinar a parte da energia disponível, ou a quantidade de trabalho mecânico que pode ser extraído a partir dela, tem sido há muito reconhecida (CARNOT, 1824.; GIBBS, 1873; GOUY, 1889; STODOLA, 1898; DARRIEUS, 1930; KEENAN, J. H., 1932; KEENAN, J., 1941). No entanto, é importante notar que a exergia, ao contrário da energia, não está sujeita a uma Lei de Conservação: "As irreversibilidades que podem surgir no processo real destroem pelo menos parte da exergia" (ORTIZ *et al.*, 2013). De fato, muitas das situações nas quais o que no jargão popular se conhece como energia é, na verdade, a exergia. É importante notar que alguns autores focaram sua contribuição científica na resolução deste conflito, definindo claramente a diferença entre os dois conceitos como demonstrado no Quadro 5 (DINCER *et al.*, 2001).

Energia	Exergia
Dependente dos parâmetros de matéria ou apenas o fluxo de energia, e independente dos parâmetros ambientais	Dependente tanto dos parâmetros do fluxo de matéria ou energia bem como dos parâmetros ambientais
Movimento ou capacidade de produzir movimento	Trabalho ou capacidade de produzir trabalho
Sempre conservado em um processo, pelo que não pode ser destruída ou produzida	Sempre conservada num processo reversível, mas é sempre consumida em um processo irreversível
Em equilíbrio com a referência ambiente, o seu valor é diferente de zero	Em equilíbrio com a referência ambiente, o seu valor é igual a zero

Quadro 5 – Diferença entre conceitos: Energia versus Exergia – 2001.

Fonte: Adaptado de Dincer;Cengel (2001, p.116).

Segundo Wall (1988) os quatro trabalhos seguintes constituem uma definição adequada do conceito de exergia, estabelecendo assim uma base científica: [1] Carnot (1824.) publicou uma relação entre calor e trabalho que mais tarde resultou na formulação da Segunda Lei da Termodinâmica. [2] Gibbs (1873) foi o primeiro a expressar a relação geral para o trabalho. [3] Rant (1956) foi o primeiro a sugerir o termo "exergia". Portanto, uma definição geral foi dada por [4] Baehr (1965) na forma em que ainda é amplamente utilizada, especialmente em aplicações de conversão de energia: Exergia é a porção de energia que é totalmente conversível em todas as outras formas de energia. No entanto, como apontado por Sciubba; Wall (2007), esta definição é, porém, enganosa, porque implica que a "energia total" de um sistema é composta de duas partes aditivas, uma "conversível" (exergia) e outra não-conversível (anergia). Mas existem vários exemplos de sistemas com uma anergia negativa (sólidos abaixo T0, gases em determinadas faixas de T <T0 e p <p0, etc.), e isso faz com que a utilização da definição de Baehr (1965) seja limitada. A Tabela 2 mostra a evolução da terminologia que resultou finalmente no termo "exergia" proposto por Rant (1956).

Tabela 2 – Evolução do termo exergia até meados de 1956 – Suíça.

Ano	Autor	Designação no idioma de origem	Tradução
1824	Carnot	*Puissance motrice du feu*	Capacidade motriz do fogo
1872	Thomson (Kelvin)	*Motivity*	Motricidade
1873	Gibbs	*Available energy of the body and medium*	Energia disponível do corpo e meio
1881	Gouy	*Energy utilizables*	Energia utilizável
1898	Stodola	*Freie technische energie*	Energia técnico gratuita
1925	Debaufre	*Available energy*	Energia disponivel
1935	Bonsjakovic	*Technische arbeitsfähigkeit*	Trabalhos técnico
1944	Thring	*Virtue of energy*	Virtude da energia
1953	Schimidt	*Technische maximale arbeit*	Máximo trabalho técnico
1955	Gibert	*Énergie non dégradée*	Energia não degradada
1956	Grigull	*Ekthalpie*	Entalpia
1956	Rant	*Exergie*	Exergia

Fonte: Adaptado de De Oliveira Jr (2013).

Gibbs (1873) descreve a exergia como "o trabalho teórico máximo útil obtido se um sistema é posto em equilíbrio termodinâmico com o ambiente por meio de processos em que o sistema interage apenas com este ambiente". Entretanto o debate com base em eficiência se seguiu até os anos 80, resultando em duas definições propostas por Szargut; Morris; Steward (1987a) e usadas nos dias atuais.

A. Exergia é a quantidade de trabalho obtido quando alguma matéria é levada a um estado de equilíbrio termodinâmico com os componentes comuns do ambiente natural, por meio de processos reversíveis, envolvendo interação única com os mesmos componentes mencionados do ambiente.

B. Exergia é o eixo de trabalho ou a energia elétrica necessária para produzir um material em um estado especificado por meio de materiais comuns no ambiente de forma reversível, sendo o calor trocado unicamente com o ambiente à temperatura T0.

De modo que o leitor não prossiga com qualquer dúvida, cabe nesse ponto do trabalho declarar que a definição "A" de Szargut; Morris; Steward (1987a) acima citada é a definição adotada a fim de atender aos propósitos deste trabalho.

Uma vez que existem muitas formas e materiais em que os fluxos de energia se apresentam na natureza, existem várias formas correspondentes de exergia. Segundo Sciubba; Wall (2007) os mais comumente usados estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Conteúdo de exergia de diferentes fluxos de energia – 2007.

Energia especifica	Energia especifica	Exergia específica	Fonte	Notas
Cinética	$0.5V^2$	$0.5V^2$	/	J/kg; seguida pela definição
Potencial	$g\Delta z$	$g\Delta z$	/	J/kg; seguida pela definição
Calor	q	$q\left(1-\frac{T_0}{T_q}\right)$	/	J/kg; seguida pela definição
Mecânica	w	w	/	J/kg; seguida pela definição
Elétrica(1)	$It\Delta V$	$It\Delta V$	/	J; seguida pela definição
Química, substancia pura	Δg_G	$\mu-\mu_0 RT_0 ln\left(\frac{c}{c_0}\right)$	(WALL, GÖRAN, 1977)	$\mu-\mu_0=\Delta g_G=g_G-g_{G.0}$
Radiação[5]	I	$\sigma\left(T^4-\frac{4T^3T_0}{3}+\frac{T_0^4}{3}\right)$	(PETELA, 1964)	W/m^2; para radiação *black body*

Fonte: Sciubba; Wall (2007, p. 3).

Segundo Dewulf, J. *et al.* (2008), na prática a transformação de recursos energéticos por meio de um processo resultará em trabalho, calor, produtos e/ou subprodutos e resíduos que, por sua vez, incorporam parte da exergia de entrada.

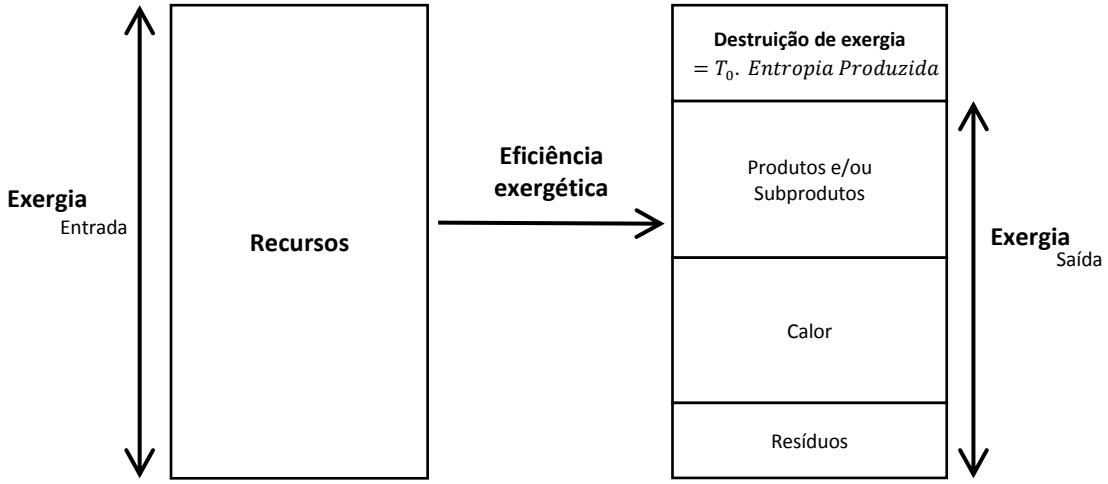


Figura 3 – Análise da Segunda Lei da Termodinâmica em processos reais.

Fonte: Dincer; Rosen (2012).

Entretanto, conforme ilustrado na Figura 3, a soma da exergia primária incorporada no trabalho, calor, produtos e resíduos entregue ao final não é igual ao teor

[5] Segundo Sciubba; Wall (2007), para a energia elétrica e radiação, a noção de "exergia por unidade de massa" faz pouco sentido. A extensão correta da definição é clara no âmbito de cada caso.

de exergia inicial dos recursos: a diferença é dissipada pela geração de entropia irreversível. Tal afirmação corrobora com os trabalhos de Gouy (1889) e Stodola (1898) que a muito demonstraram que o valor absoluto desta perda de exergia é igual à produção de entropia multiplicada pela temperatura do ambiente. Portanto, e mais uma vez, é possível constatar como o conceito de exergia é capaz de identificar e quantificar perdas.

2.1.1 Exergia e sustentabilidade

Nesta seção são apresentadas brevemente, algumas evidencias e relações extraídas da vasta literatura que defende as funcionalidades da exergia, na busca por desenvolvimento sustentável e redução de impactos ambientais.

Muitos autores sugerem que para mitigar o impacto ambiental da utilização de recursos de energia e conseguir maior eficiência entre recursos e utilização, melhores resultados são alcançados quando se considera a exergia, uma vez que é um conceito útil para melhorar a eficiência (DINCER *et al.*, 2012). Como exemplo dos muitos impactos ambientais, é possível citar os resíduos de emissões de calor para o ambiente, os quais devem ser também uma preocupação e se negligenciados, podem causar o aumento da temperatura ambiental e assim a poluição térmica, o que pode comprometer, entre outros, a vida marinha e o equilíbrio ecológicos em lagos e rios (AYRES *et al.*, 1998; CORNELISSEN *et al.*, 2002; DEWULF, J. P. *et al.*, 2002).

Segundo advogam Dincer; Rosen (2012), sendo a exergia a confluência de energia, meio ambiente e desenvolvimento sustentável, a base para este tratamento é o caráter interdisciplinar da exergia e de sua relação para cada uma dessas disciplinas segundo ilustram os autores na Figura 4.

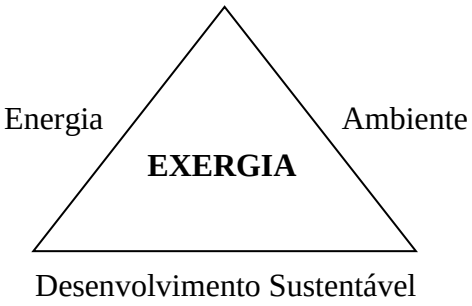


Figura 4 – Diagrama triângulo interdisciplinar abrangido pelo campo da análise exergética.

Fonte: Dincer; Rosen (2012).

Desde a década de 1970 se sugere que a realização da análise exergética dos processos naturais que ocorrem na Terra, poderia formar uma base para um planejamento ecologicamente correto, pois indicaria a perturbação causada por mudanças em grande escala (TRIBUS *et al.*, 1971). Com base nesse conceito, são apontadas três relações entre exergia e impacto ambiental de acordo com a eficiência dos processos conforme ilustra a Figura 5 (ROSEN *et al.*, 1997).

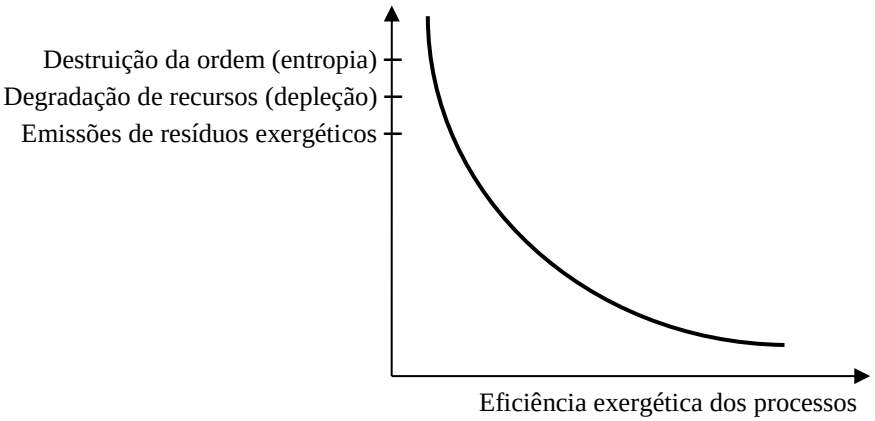


Figura 5 – Ilustração qualitativa entre a eficiência exergética de um processo e o impacto ambiental.

Fonte: Adaptado de Dincer; Rosen (2012, p. 646).

Conforme evidenciado na Figura 5, a relação entre a eficiência energética, por meio da exergia, e para qualquer processo industrial, inclusive da reciclagem, é essencial e pode proporcionar melhorias em avanços exponenciais para com a redução de

certos impactos ambientais relacionados à depleção de materiais, bem como do aquecimento do meio ambiente.

2.1.2 Aspectos econômicos em exergia

Quando a energia perde sua qualidade, a exergia é destruída. Sendo a exergia a parte útil da energia, portanto, tem valor econômico e deve ser gerida cuidadosamente (DINCER *et al.*, 2012). Com base na Segunda Lei da Termodinâmica (SLT), Groscurth *et al.* (1989) estimaram um potencial teórico de economia de energia em até 60% a partir de sistemas de calor estabelecidos em cascata.

Do ponto de vista econômico Valero (1998) sugere que o ciclo tradicional da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), "do berço ao túmulo", deve ser modificado para "do túmulo ao túmulo", alegando que para completar o ciclo de cálculo, é necessário calcular também o custo exergético de substituição de materiais que foram degradados durante todo o ciclo de vida de um produto, propondo calcular esse valor também em termos exergéticos. Portanto, o valor do custo total medido em unidades de exergia é chamado o custo exergo-ecológico, notando que quanto maior for este custo para um produto ou serviço, mais insustentável ele será.

De uma forma mais ampla Dewulf, J. *et al.* (2008) alega que a exergia pode ser considerada um adequado "fator de produção", e que a entrada de exergia *per capita* em um sistema social é uma medida real da sua "eficiência operacional". Similarmente, vários autores defendem a ideia de que a entrada total de exergia é uma medida econométrica da mesma relevância como o Produto Nacional Bruto (PNB)[6] (WALL, G, 1978; WALL, GÖRAN, 1987; WALL, GÖRAN *et al.*, 1994; WALL, GÖRAN, 2002).

Com uma abordagem bastante pragmática Zambrana *et al.* (2012) demonstram, em um estudo de caso, que o uso de análise exergética permitiu revelar em um dado processo o consumo de energia útil real de apenas 4%. Além disso, o método permitiu identificar os principais pontos de desperdício de forma que o consumo de

[6] O Produto Nacional Bruto (PNB) é uma expressão monetária dos bens e serviços produzidos por fatores de produção nacional, independentemente do território econômico (WIKIPEDIA, 2016b).

energia direta pode ser reduzido em aproximadamente 30%. De acordo com esta abordagem é possível identificar também os potenciais benefícios econômicos da análise exergética.

Sobre as interações da exergia e da reciclagem sob o viés econômico, Valero (1998) afirma que "cada vez que reciclamos estamos evitando um déficit associado ao enorme custo necessário para a substituição de minerais e até mesmo, da concentração de exergia que eles tinham originalmente na natureza".

2.1.3 Método de exergia adotado

Nesta seção são descritos o processo de seleção do método de exergia e, em seguida, o próprio método é apresentado.

2.1.3.1 Processo de seleção do método de cálculo exergético

A literatura científica permite identificar vários métodos para a abordagem de exergia, além de aspectos importantes para com os objetivos da pesquisa, os quais são listados a seguir e serviram como critérios para a seleção do método:

i. Afinidade com práticas de sustentabilidade,
ii. Menor risco quanto às suposições sobre os dados,
iii. Possibilidade de uso de bancos de dados confiáveis,
iv. Vantagens frente a métodos de avaliação de eficiência energética,
v. Afinidade com processos de reciclagem e estratégias de fim de vida.

Em uma revisão crítica da literatura Dewulf, J. *et al.* (2008) destaca o então denominado método do Consumo de Exergia Cumulativa (CExC), definido como a soma da exergia contida em todos os recursos de entrada na cadeia de um dado produto ou

processo. Vários autores apontam positivamente ao fato de tal método estender a análise exergética além de um único processo, de forma a considerar então todos os processos de recursos naturais para os produtos finais, além de haver sido praticada em vários processos industriais tidos como comuns (SZARGUT *et al.*, 1987b; SZARGUT *et al.*, 1987a; MORRIS, D. R., 1991) . Adicionalmente, outros autores advogam a favor do CExC por contabilizar a contribuição de bens e serviços do ecossistema através do seu consumo de exergia (HAU *et al.*, 2004).

Nos mesmos moldes da metodologia CExC é então encontrado o método proposto por Bösch *et al.* (2006) e similarmente denominado como Demanda Acumulativa de Exergia (CExD), tendo sido selecionado uma vez que contêm as características já defendidas na metodologia CExC, além dos critérios pré-estabelecidos por meio da revisão bibliográfica estando todos em convergência com as características e vantagens apontadas por Bösch *et al.* (2006) e listadas a seguir:

i. "Fornece um indicador categoria de impacto para praticantes de Avaliação do Ciclo de Vida.";
ii. "Medidas de exergia são tradicionalmente aplicadas para avaliar a eficiência energética sobre as perdas de exergia em um sistema ou processo. Esta medida de exergia indica os recursos necessários e avalia a remoção total de exergia na natureza, a fim de fornecer um produto, processo ou serviço.";
iii. "Cria uma fonte de dados de índices de exergia disponíveis para as comunidades científicas que aplicam exergia como um indicador principal para a eficiência energética e exigência de qualidade dos recursos.";
iv. "CExD aborda o uso de recursos escassos, da energia útil, e, portanto, acredita-se ser um bom indicador da procura de qualidade de recursos.";
v. "Uma vantagem de CExD em contraste com a *Eco-Indicator* 99 e CML'01 é que menos pressupostos são necessários."; e
vi. "A exergia em fluxos de energia é destruída, enquanto a exergia nos materiais é, em muitos casos, apenas removida a partir da natureza. Esta pode ser recuperada no fim do ciclo de vida do produto por tecnologias de tratamento de resíduos apropriados.".

2.1.3.2 Método de Demanda Acumulativa de Exergia (CExD)

Bösch (2006 apud FINNVEDEN *et al.,* 1997, p. 925) concorda com a visão segundo a qual "de acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, a utilização dos recursos energéticos e não-energéticos em sistemas fechados, intrinsecamente causa a destruição de exergia. Os recursos utilizados só são transformados mas não destruídos e podem ser recuperados pelo consumo de exergia de outros recursos (dentro da presente gama tecnológica de possibilidades)." Assim, pode-se considerar a destruição de exergia como sendo um dos principais problemas relacionados com a busca de recursos (BÖSCH *et al.*, 2006).

Segundo Szargut (2005), a energia pode ser transformada, mas será sempre conservada como afirma a Primeira Lei da Termodinâmica. A exergia, em contraste, é consumida em todos os processos reais à medida em que a entropia é produzida, de acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica expressa na equação (1).

$$\delta Ex = T_0 \sum \Delta S \tag{1}$$

onde:
Ex = Exergia (MJ)
T_0 = Temperatura da vizinhança (K)
S = Entropia (MJ/K)

O indicador de demanda de exergia cumulativa (CExD) é definido como a soma de exergias de todos os recursos necessários para proporcionar um processo ou produto conforme a equação (2).

$$CExD = \underbrace{\sum_i \boldsymbol{mi} \times \boldsymbol{Ex}_{(ch),i}}_{\text{Parcela A}} + \underbrace{\sum_j \boldsymbol{nj} \times \boldsymbol{r}_{ex-e(ch,k,p,n,r,t),j}}_{\text{Parcela B}} \tag{2}$$

Sendo:

$CExD$ = demanda de exergia cumulativa por unidade de produto ou processo (MJ-eq)

Na parcela A, temos a porção de exergia dos fluxos de materiais, onde:

mi = massa do recurso material *i* (kg)
$Ex_{(ch),i}$ = exergia por kg de substancia *i* (MJ-eq/kg)

Na parcela B, temos a porção de exergia dos fluxos de energia, onde:

nj = quantidade de energia por fluxo energetico *j* (MJ)
$r_{ex-e(k,p,n,r,t),j}$ = exergia para taxa de energia por fluxo energetico *j* (MJ-eq/MJ)

Por fim notando que a exergia é armazenada nas fontes ou recursos em diferentes formas, logo (k, p, n, r, t) correspondem às diferentes fontes de energia segundo a fonte utilizada e de acordo com a tecnologia atual, onde:

ch = exergia química
k = exergia cinética
p = exergia potencial
n = exergia nuclear
r = exergia radioativa
t = exergia térmica

Segundo Bösch *et al.* (2006), a lista de diferentes exergias inclusas na parcela B da equação (2) e acima descritas, referem-se apenas aos recursos considerados como fonte útil. Por exemplo, o ruído pode também incluir energia cinética, entretanto não é considerado como uma fonte útil diante da tecnologia atual. A seguir são listadas, seguidas de suas definições, as fontes consideradas úteis e portanto adotadas no método proposto por Bösch *et al.* (2006):

f1. Exergia química é aplicada em todos os recursos materiais, para biomassa, água e combustíveis fósseis;
f2. Exergia térmica é aplicada para geotérmica, onde o calor é retirado sem extração material;
f3. Exergia cinética é aplicado como na energia cinética do vento, usado para acionar um gerador de energia eólica;
f4. Exergia potencial é aplicado como na energia potencial da água, quando utilizada para funcionar uma usina hidrelétrica;
f5. Exergia Nuclear é aplicada sobre o combustível nuclear consumido em reações de fissão;
f6. Exergia radiativa é aplicada sobre a radiação solar que incide em painéis solares.

2.1.3.2.1 Exergia química

Segundo Bösch *et al.* (2006), a exergia química de um material depende da sua composição. Se a composição é conhecida, a exergia química pode ser calculada com base na reação de formação do produto, utilizando-se a energia livre de Gibbs durante a formação e a exergia dos elementos químicos nas substâncias, segundo equação (3). A exergia de elementos químicos é fornecida por Szargut (2005) e dados sobre $\Delta_f G_i^\circ$ estão disponíveis na literatura. Um material sólido que consista de vários compostos químicos é considerado virtualmente como uma mistura de "grãos separados" (FINNVEDEN *et al.*, 1997). A exergia química é calculada pela soma da exergia das frações molares nas equações (3) e (4). A exergia molar $\boldsymbol{ex}_{ch}$ pode ser estimada pela exergia molar $\boldsymbol{ex}_{ch}^\circ$ a partir do ambiente de referência (SZARGUT, 2005).

$$Ex_{ch} = \sum_j \boldsymbol{n}j \times \boldsymbol{ex}_{ch,j} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{ex}_{ch,j}^\circ = \Delta_f G_i^\circ + \sum_{el} \boldsymbol{n}el \times \boldsymbol{ex}_{ch,el}^\circ \tag{4}$$

onde:

Ex_{ch} = exergia químico-molar do material (kJ/mol)
$\boldsymbol{n}j$ = fração molar de substância *j* no material (-)
$\boldsymbol{ex}_{ch,j}^\circ$ = exergia químico-molar padrão para uma substância (kJ/mol)
$\Delta_f G_i^\circ$ = energia livre padrão de Gibbs de formação de substancias (kJ/mol)
$\boldsymbol{ex}_{ch,el}^\circ$ =exergia quimica parcial padrão de elementos em substâncias (kJ/mol)
$\boldsymbol{n}el$ = numero de elementos no composto (-)

Segundo Bösch *et al.* (2006), certos recursos minerais não têm uma composição bem definida. Por exemplo, rochas e minérios são compostos de vários minerais. A composição pode variar consideravelmente em diferentes locais. No caso de minérios, os cálculos de exergia foram realizados para uma composição média. Diversos minérios podem conter dois ou mais metais extraíveis. Um coeficiente de alocação foi aplicado para atribuir a exergia total de um minério para metais distintos. A atribuição é necessária para evitar uma dupla contagem. Por exemplo, o cádmio e o zinco são recuperados a partir do mesmo minério. Portanto, a exergia do minério tem de ser

atribuída a estes dois metais, sendo calculada conforme equação (5) (BÖSCH *et al.*, 2006).

$$\boldsymbol{Ex}^{\circ}_{ch,j} = \boldsymbol{Ex}^{\circ}_{ch,o} \times \boldsymbol{a}_{(rm),j} \times \frac{1}{\boldsymbol{c}_j} \quad (5)$$

onde:

$\boldsymbol{Ex}^{\circ}_{ch,j}$ = exergia por kg elementar de metal *j* (MJ/kg)
$\boldsymbol{Ex}^{\circ}_{ch,o}$ = exergia por kg de minerio (MJ/kg)
$\boldsymbol{c}_j$ = fração da massa do metal *j* no minério (-)
$\boldsymbol{a}_{(rm),j}$ = fator de alocação para o metal *j* (-)
r = alocação por rendimento
m = alocação por massa

2.1.3.2.2 Exergia em fluxos de energia

Segundo Bösch *et al.* (2006) recursos energéticos são inventariados em massa, volume ou valor energético. Para aqueles inventariados por massa ou volume, o teor energético por unidade de massa ou de volume é adicionalmente fornecido. O conteúdo de exergia é calculado por meio da aplicação de uma exergia relativa ao valor calorífico bruto fornecido, neste método, por Szargut (2005). Aproximações foram feitas para fluxos de energia onde não se encontrou uma relação fornecida, conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Exergia de fluxos de energia na base de dados do *Ecoinvent* v1.2.

Nomenclatura na base de dados do *Ecoinvent*	**Nomenclatura da fonte de exergia**	**Especificação**	**Unidade**	**Valor calorifico bruto (MJ/unidade) [a]**	$r_{(ex-e)}$ **(Taxa) [b]**	**Ex° (MJ/unidade)**
Carvão, marrom, no solo	Lignito	Combustível médio	kg	9,9	1,04	10,3
Carvão, duro, não especificado, no solo	Carvão betuminoso	Combustível médio	kg	19,1	1,03	19,7
Gás, mina, gás de exaustão, mineração de carvão	Gás natural	Combustível médio	kg	39,8	0,94	37,4
Gás natural, em terra	Gás natural	Combustível média	m³	38,3	0,94	36,0
Petróleo bruto, no solo	-	Média de gasolina e lignito	kg	45,8	1,02	46,5
Turfa, em terra	-	Média de madeira lignito	kg	9,9	1,05	10,3
Urânio	Nuclear	-	kg	560.000	1,00	560.000
Madeira de dicotiledôneas, na planta	Madeira	-	m³	12.740	1,05	13.364
Madeira de coníferas, na planta	Madeira	-	m³	9.180	1,05	9.629
Madeira não especificada, na planta	Madeira	-	m³	10.960	1,05	11.497
Energia, geotérmica	Ciclo de Carnot	-	MJ	1	-	0
Energia poder calorífico, na biomassa	Madeira	Combustível médio	MJ	1	1,05	1,05
Energia cinética, no fluxo em energia eólica	Exergia cinética	Velocidade em relação à superfície	MJ	1	1,00	1,00
Energia potencial, estoque em água barragem	Exergia potencial	Altura em relação à superfície	MJ	1	1,00	1,00
Energia, solar	Exergia radiativa	-	MJ	1	0,93	0,93

Nota: [a] Poder calorífico bruto de Frischknecht *et al.* (2007).; [b] Exergia de energia a partir de Szargut (2005).

Fonte: Bösch *et al.* 2006, p. 185.)

A exergia à taxa bruta de poder calorífico do petróleo bruto está estimada pela média das razões para a gasolina e lignito[7]. A razão para a turfa[8] é estimada pela média das razões para a madeira e lignito[7].

A exergia térmica é representada por um ciclo de Carnot para especificar o trabalho extraível a partir de uma fonte de calor conforme a equação (6) (SZARGUT, 2005).

$$Ex_{th} = Q_h \times (T_h - T_c)/T_h \quad (6)$$

onde:

Ex_{th} = Exergia térmica (MJ)
Q_h = Energia por meio de fonte de calor (MJ)
T_h = Temperatura da fonte de calor em graus Kelvin (K)
T_c = Temperatura do ambiente em graus Kelvin (K)

Bösch (2006 apud SZARGUT, 2005, p.184) ressalta que a exergia cinética e potencial são equivalentes às energias cinética e potencial e portanto são expressas nas equações (7) e (8).

A energia cinética é igual à exergia cinética, quando a velocidade V é considerada em relação à superfície da terra segundo a equação (7) (SZARGUT, 2005).

$$0.5V^2 \quad (7)$$

Do mesmo modo, a exergia potencial é igual à energia potencial quando é avaliada em relação ao nível médio da superfície da terra na localidade do processo em estudo, segundo a equação (8) (SZARGUT, 2005).

$$g\Delta z \quad (8)$$

onde:

g = é a aceleração da gravidade em valor nominal "médio" na superfície da Terra, sendo, por definição, 9.80445 m/s².

[7] O lignito ou linhito é um tipo de carvão com elevado teor de carbono na sua constituição. A sua cor é acastanhada e encontra-se geralmente, mais à superfície, por ter sofrido menor pressão geológica.

[8] Massa de tecido de várias plantas, produzida por decomposição anaeróbica associada à ação da água, encontrada em várias partes do mundo, é utilizada como fertilizante, forragem, combustível e na produção de carvão.

Para a exergia de combustíveis nucleares *EI*, o método proposto é diferente em relação ao cálculo de PETELA (1964), onde Bösch (2006 apud SZARGUT, 2005, p.184) alega que a energia nuclear é de qualidade muito elevada. Isso se dá porque intrinsecamente corresponde a uma temperatura muito alta. Assim, pode-se presumir que a exergia de matérias-primas nucleares EI é igual à energia I que se torna disponível por fissão nuclear, conforme equação (9).

$$EI = I \tag{9}$$

No que diz respeito exergia radiativa *ER*, Bösch (2006 apud SZARGUT, 2005, p.184) propõe uma constante, sendo esta a razão entre o fluxo de exergia *E* para o fluxo total de energia igual a 0,9336, à superfície da Terra, conforme equação (10).

$$ER = E \times 0{,}9336 \tag{10}$$

2.2 FIM DE VIDA

Nesta seção são apresentadas definições e são descritos os resultados de uma pesquisa exploratória preliminar, a qual foi realizada buscando elucidar aspectos das Estratégias de Fim de Vida (EFV) e nestas, dos Processos de Reciclagem (PR), de modo que seja possível garantir conteúdo e relevância adequados à pesquisa, bem com estimar prazos e recursos necessários durante o desenvolvimento do projeto.

No presente trabalho as EFVs fazem parte de uma estratégia mais ampla que se refere a Estratégia do Ciclo de Vida (ECV). Segundo Fukushige *et. al* (2012) a ECV é definida como um conjunto de estratégias na forma de filtros ao longo do ciclo de vida (por exemplo, a manutenção, a reutilização do produto, reutilização de componentes, ciclo fechado de reciclagem e reciclagem em cascata) para um produto e seus componentes. Dessa forma, cada fase trata e retém um componente ou um material do produto.

Segundo Fukushige *et. al* (2012) EFVs consideradas promissoras para o desenvolvimento sustentável envolvem a construção de sistemas estáveis de ciclo de vida

do produto, de modo que possam reduzir drasticamente as cargas ambientais, o consumo de recursos materiais e energéticos e a geração de resíduos. De forma mais específica Rose *et al.* (2002) define as EFVs como um conjunto de conceitos ou atividades pré-estabelecidas a serem aplicadas em um dado produto "no momento em que o produto já não satisfaz ao comprador inicial ou ao usuário primário", ressaltando que tal definição permitiria a inclusão da estratégia de Reuso em adicional à Reciclagem como EFV. O universo que engloba as EFVs e os PRs ao longo do tempo é ilustrado na Figura 6.

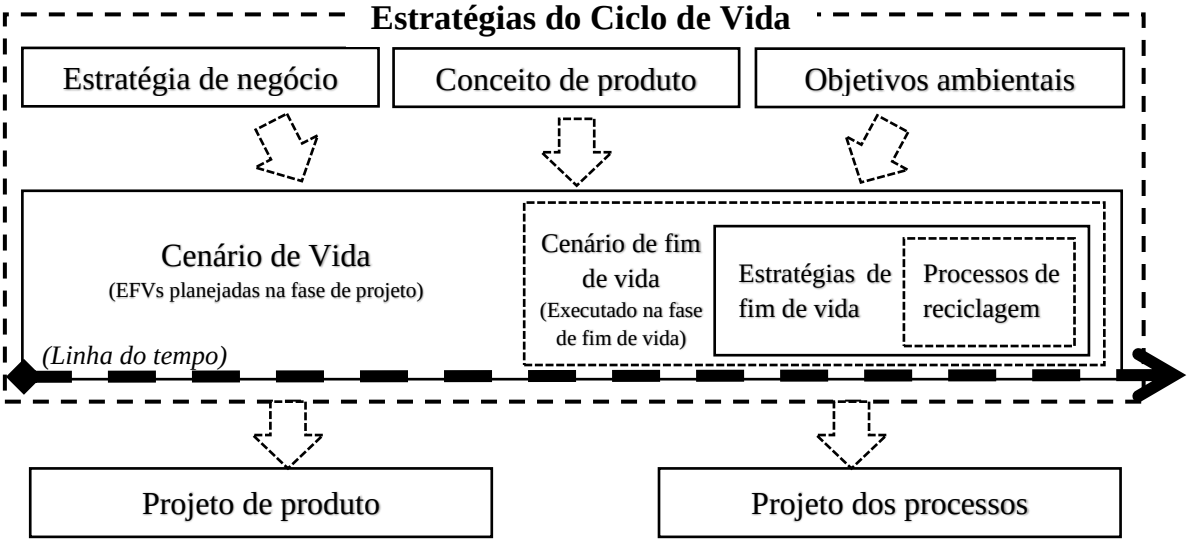


Figura 6 – Desenho do Ciclo de Vida**.**

Fonte: Adaptado de Fukushige *et. al* (2012, p. 2).

Conforme demonstrado na Figura 6, é possível compreender que o objetivo maior de gerir os resíduos implica em lidar com um macro conjunto de estratégias e processos denominado Estratégias do Ciclo de Vida (ECVs), das quais, hierarquicamente, fazem parte os cenários de fim de vida, seguidos por EFVs e por último, de processos de reciclagem ou descarte. Dentro desse macro conjunto, vale destacar dois momentos ao longo da linha do tempo, onde os destinos dos PFVs serão altamente influenciados. Em um primeiro, ainda no Projeto do Produto, cenários e processos serão imaginados e decisões serão tomadas quanto à configuração do produto, buscando viabilizar ou aumentar a eficiência de certas EFVs. É importante notar que essa preocupação nem sempre existe ou mesmo quando existe, nem sempre é realizada de forma efetiva. Já no segundo momento, com os produtos já em seu estágio de fim de vida, encontramos o Projeto dos Processos que visa lidar, da melhor forma possível, com um PFV cuja

configuração foi selada na fase de projeto, com ou sem a preocupação para com as EFVs. Sendo assim, um método que vise aumentar a eficiência dos PRs em dois momentos seria útil, orientando esforços desde a fase de projeto de forma a facilitar e potencializar a eficiência dos resultados da fase de fim de vida.

Desde que o termo estratégias de fim de vida foi adotado, existe consenso em identificar, definir, classificar e hierarquizar as EFVs quanto ao seu impacto ambiental, segundo o Quadro 6, onde o Reuso é sugerido como prioridade e as demais sucessivamente (OVERBY, 1979; ISHII, KOSUKE *et al.*, 1994; LUTTROPP, 1997; NILSSON, 1998).

Nome da EFV	**Prioridade**	**Definição**
Reuso	*1º*	*É a segunda negociação de um produto para utilização como foi originalmente criado.*
Serviço (Ou Manutenção)	*2º*	*É outra maneira de aumentar a vida de um produto reparando ou reconstruindo o produto utilizando peças de manutenção no local onde o produto está sendo usado.*
Remanufatura	*3º*	*É um processo no qual grandes quantidades de produtos semelhantes são trazidas para uma instalação central e desmontados. Partes de um produto específico são recolhidos por tipo de peça, limpas e inspecionadas para possível reparação e reuso. Os remanufaturados são reagrupados em uma linha de montagem com peças recuperadas e novas peças quando necessário.*
Reciclagem com desmontagem	*4º*	*Visa a recuperação de material puro e útil para aplicação em novos produtos. A desmontagem em frações de material aumenta o valor dos materiais reciclados reduzindo contaminantes, materiais perigosos ou componentes compostos por materiais de alto valor. Nota-se para este último, que predominam métodos de separação e desmontagem manual.*
Reciclagem sem desmontagem	*5º*	*O objetivo da trituração é reduzir o tamanho do material para facilitar a classificação. O material triturado é separado usando métodos baseados em princípios magnéticos, de densidade ou outras propriedades dos materiais.*
Descarte	*6º*	*É a destinação do produto para aterro ou incineração, sendo que esta última pode se dar com ou sem recuperação de energia*

Quadro 6 – Definição das EFVs.

Fonte: Adaptado de Rose, Catherine Michelle (2000).

Até este momento, as EFVs presentes no Quadro 6 identificam-se por ciclo aberto e fechado e sua hierarquização é baseada no diagrama de Ricoh (TANI, 1999) ilustrado na Figura 7.

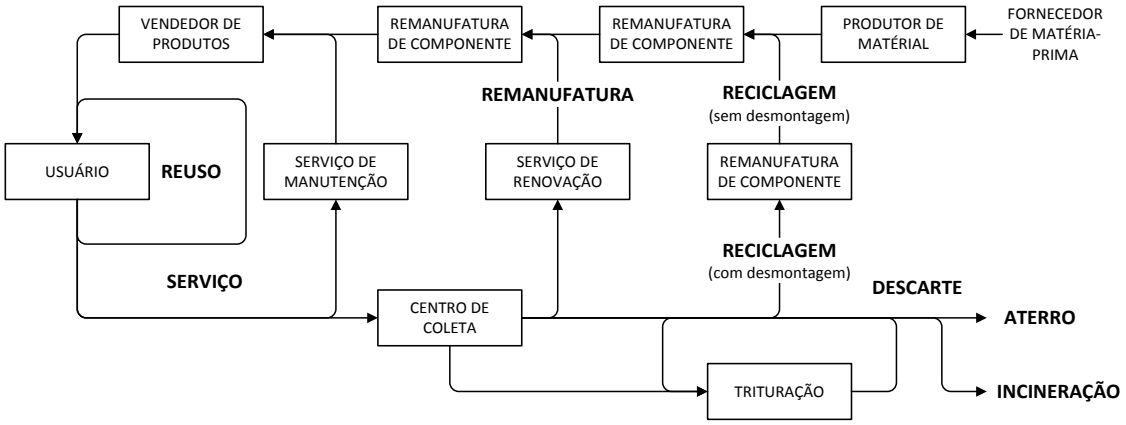


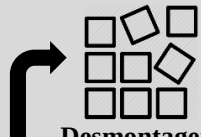
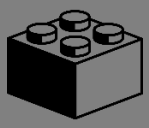
Figura 7 – Diagrama do Cometa de Ricoh adaptado para as EFVs.

Fonte: Adaptado de Rose, Catherine Michelle (2000).

Conforme observado na Figura 7, ciclos fechados são preferíveis do ponto de vista ambiental, fazendo uso de valor já agregado aos recursos naturais; ciclos abertos terminam em incineradores ou aterros. O usuário é o ponto central do diagrama e os circuitos, quanto menores, representam uma EFV mais eficiente e com menor reprocessamento de materiais para reaplicação em produtos (TANI, 1999).Os produtores de matérias-primas, fabricantes de componentes, de produtos e vendedores encontram-se ao longo da linha superior. A linha inferior inclui instalações de coleta e centros de reciclagem. O grupo do meio fornece o serviço de transporte e infraestrutura de reciclagem de volta para os fabricantes (TANI, 1999).

Em seguida, com base em estudos de ACV, Rose, C. M.; Stevels (2001) verificaram o impacto ambiental em um grupo de produtos da *Phillips pfvs*® e confirmaram a hierarquização das EFVs em Reuso, Serviço, Remanufatura, Reciclagem e por último Descarte.

Dessa forma, as principais EFVs, seus critérios e eventual desempenho são listadas no Quadro 7 segundo Balkenende; Bakker (2015) e confirmadas em termos hierárquicos. Em seguida, sendo acrescida da linha "Descarte", conforme sugerem Rose, C. M.; Stevels (2001), a fim de compor a lista de EFVs e identificar aquelas capazes de serem avaliadas pela abordagem de exergia.

Estratégias de fim de vida	Conceito	Critérios para eficiência
Anti-obsoletismo ou Reuso	Duram muito tempo	Performance
		Durabilidade
		Confiabilidade
	Usados por muito tempo	Roteiro de ajuste
		Atualizável
		Adaptável
		Design atemporal
		Antecipa a legislação (i.e. toxicidade, reciclabilidade, desmontabilidade)
Somente não destrutivas  **Desmontagem**	Conexões	Rápida e fácil
		Uso e diversidade limitada de elementos de fixação
		Uso e diversidade limitada de ferramentas
	Arquitetura de produto	Arquitetura simplificada
		Fácil acesso aos componentes
		Sequência de desmontagem clara
Manutenção	Manutenção	Fácil limpeza
		Fácil manutenção e atualização
		Permite limpeza e manutenção no local
	Prognósticos de tempo de vida	Monitoramento *online* para qualidade, teste, manutenção e cobrança
 **Reconstrução**	Modularidade	Uso de componentes modulares
		Interfaces padronizadas
		Compatível para frente e para trás
	Avaliação de confiabilidade	Permite fácil leitura dos componentes
	Logística reversa	Facilmente retornável
		Peças de reposição são recolhidas
		Local de produção
Destrutivas (moagem) e não destrutíveis (desmontagem) **Reciclagem**	Materiais	Evitar uso de revestimentos
		Limitar o uso de diferentes materiais
		Uso exclusivo de materiais recicláveis
		Usar preferencialmente materiais puros
	Eletrônicos	Placa de circuito impresso (PCB) desmontável em uma única peça
		Fácil e rápida detecção de materiais
		Usar componentes de tecnologia SMD[9]
	Conexões	Evitar conexões fixas
		Separação por desmontagem ou moagem para partes de materiais uniformes
		Separação por desmontagem ou moagem para partes de tamanho relativamente grandes (≥ 1cm)
Descarte	Descarte	Aterro
		Incineração sem recuperação de energia
		Incineração com recuperação de energia

Quadro 7 – Tipos e critérios de EFVs.

Fonte: Adaptado de Balkenende *et al.* (2015).

[9] SMD, ou *Surface-Mount Device*, é um método de montagem de circuitos eletrônicos nos quais os componentes são montados diretamente sobre a superfície da placa de circuito impresso (PCB), permitindo o aproveitamento de ambas as faces.

Ao longo desse capítulo foi reunida a fundamentação teórica que confirma a relevância do conceito de exergia, bem como as EFVs e PRs aplicáveis foram conhecidos. Dessa forma torna-se viável o desenvolvido o capítulo seguinte, de forma a orientar a pesquisa na definição de escopo e de metodologias mais apropriadas para alcançar o objetivo maior de entregar um artefato na forma de um método.

2.3 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA DE EFVs E PRs

Esta seção compreende a atividade 3, correspondente à metodologia de pesquisa DSR, adotada neste trabalho e descrita no capitulo 3. Essa seção tem como objetivo conhecer e selecionar os processos de EFVs e PRs quando praticados em seu estado da arte no que diz respeito eficiência dos processos de reciclagem. Tal esforço se faz necessário pois, correr-se-ia o risco de avaliar e julgar um dado cenário embasado em processos de tecnologia reconhecidamente ineficiente ou, por outro lado, avaliar processos de tecnologias disruptivas porém não praticados em larga escala e portanto, configurariam uma representação pobre da realidade.

Com essa tarefa, espera-se que o método possa ser posteriormente definido e testado sob o viés exergético. Sendo assim, configura o primeiro esforço para cumprir o passo três da metodologia científica adotada para esta pesquisa, a Design Science Research (DSR), no sentido de projetar e desenvolver método.

Afim de alcançar tais propósitos, é adotada a revisão de literatura do tipo bibliométrica. Para Otlet (1934) a bibliometria é o meio de quantificar a ciência, utilizando-se da aplicação estatística nas fontes de informação para encontrar trabalhos, autores e jornais sejam reconhecidos pela comunidade científica. Segundo Araújo; Alvarenga (2011) são, portanto, os estudos de natureza bibliométrica fontes de grande proveito para se conhecer e analisar um dado campo científico. Desta forma, a metodologia bibliométrica aqui aplicada segue aos moldes daquele proposto por Oliveira Lacerda *et al.* (2012) e pode ser dividida em três etapas:

i. Investigação preliminar;

ii. Seleção dos artigos que comporão o portfólio para a pesquisa;
iii. Análise bibliométrica do portfólio de artigos para o referencial teórico em questão.

2.3.1 Investigação preliminar

Sobre a cronologia, os procedimentos descritos a seguir foram realizados entre os meses de Janeiro a Fevereiro de 2016.

Sobre o tema, a elaboração da revisão teórica busca recuperar e conhecer os processos de EFVs e PRs de máxima eficiência energética.

Sobre as bases de dados, estas foram escolhidas por disponibilidade de acesso bem como afinidade e com o tema. Sua escolha resulta então na delimitação do campo amostral, que por fim resulta em um conjunto de artigos disponíveis e considerados no processo de seleção de artigos (EDUARDO TASCA *et al.*, 2010). Para a presente pesquisa, por intermédio do portal de acesso da CAPES, foram escrutinadas as bases *Science Direct, Springer, SCOPUS, Google Acadêmico* e *Web of Science (ISI)*; sendo esta última, a base que dá origem ao JCR (*Journal Citation Report*), ou seja, ao fator de impacto dos periódicos (OLIVEIRA LACERDA *et al.*, 2012). Dessa forma, entende-se que essas bases contém a maior contribuição científica atualmente, para o tema.

Sobre as palavras-chave, partiu-se para a sua escolha preliminar que caracterizar-se-ão pelo primeiro filtro de seleção dos artigos.

Com vistas a uma pesquisa cuja primeira linha seja eficiência energética, determinou-se *a priori* as palavras-chave descritas no Quadro 8 como termos do primeiro eixo do referencial teórico.

***Strings* preliminares - Eixo 1**
Energy assessment
Energy efficiency
Energy performance
Energy management

Quadro 8 – Lista preliminar de palavras-chave do primeiro eixo de pesquisa.
Fonte: Autoria própria.

A fim de conjugar as palavras-chave ligadas à eficiência energética com o segundo eixo da pesquisa relacionado às EFVs incluindo reciclagem, buscou-se, exclusivamente na base *Web of Science (ISI)*, textos publicados nos últimos 5 anos, utilizando os termos descritos no Quadro 9.

***Strings* preliminares - Eixo 2**
End of Life
Product
Waste recovery
Recycling

Quadro 9 – Lista preliminar de palavras-chave do segundo eixo de pesquisa.
Fonte: Autoria própria.

Depois de uma leitura não estruturada de títulos e resumos dos artigos mais citados e relacionados com as palavras-chave preliminares dos dois eixos de pesquisa, foi descoberto que a eficiência dos PRs é frequentemente expressa não somente em termos energéticos mas em termos de capacidade de recuperar materiais ou componentes. Portanto, foram resgatados os termos mais alinhados com o foco da pesquisa em desenvolvimento conforme o Quadro 10.

	***Strings* finais de pesquisa**
I.	*End of Life*
II.	*Product*
III.	*Waste recovery*
IV.	*Recycling*
V.	*Energy efficiency*
VI.	*Energy performance*
VII.	*Energy management*

Quadro 10 – Lista final de palavras-chave de pesquisa.
Fonte: Autoria própria.

Com o intuito de iniciar o escrutínio dos artigos a partir de uma amostragem suficientemente ampla e portanto representativa, foi definido um conjunto união das pesquisas resultantes das 5 bases de dados, por meio da combinação dos sete termos de pesquisa do Quadro 10, limitados às publicações realizadas entre os anos de 2000 e 2016, a fim de compor a massa inicial de artigos para início das atividades de seleção e

composição do referencial teórico. A forma como foram combinadas as palavras chave e os operadores booleanos estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Combinação das palavras-chave de pesquisa.

P*esquisa*	Base	Combinação de strings	Nº de artigos
P1	*Web of Science*	[a]TS="Energy efficiency" OR "Energy performance" OR "Energy management" AND "Product" AND "End of Life" AND Recycl* OR "Waste recovery"	28
P2	*Science Direct*	Idem P1	34
P3[b]	*Springer*	("energy efficiency" OR "energy performance" OR "energy management") AND (Recycl* OR "Waste recovery") AND (product AND "end of life")'	142
P4	*SCOPUS*	[a]TS=" ("Energy efficiency") OR ("Energy performance") OR ("Energy management") AND [a]TS=" ("Product") AND ("End of Life") AND Recycl* OR ("Waste recovery")	101
P5[b]	*Google Scholar*	product recycl* "energy efficiency" OR "Energy performance" OR "Energy management" "end of life strategy"	84

Fonte: Adaptado de Oliveira Lacerda; Ensslin; Ensslin (2012).

Notas: [a] A sigla "TS" acima, indica uma busca no título, palavras-chave e resumo dos artigos.
[b] Bases de dados onde a pesquisa só é possível em todo o corpo do trabalho, recuperando um número maior de publicações.

A seguir a Figura *8* demonstra, de forma sintética, as etapas e os resultados da fase de investigação preliminar da pesquisa bibliométrica.

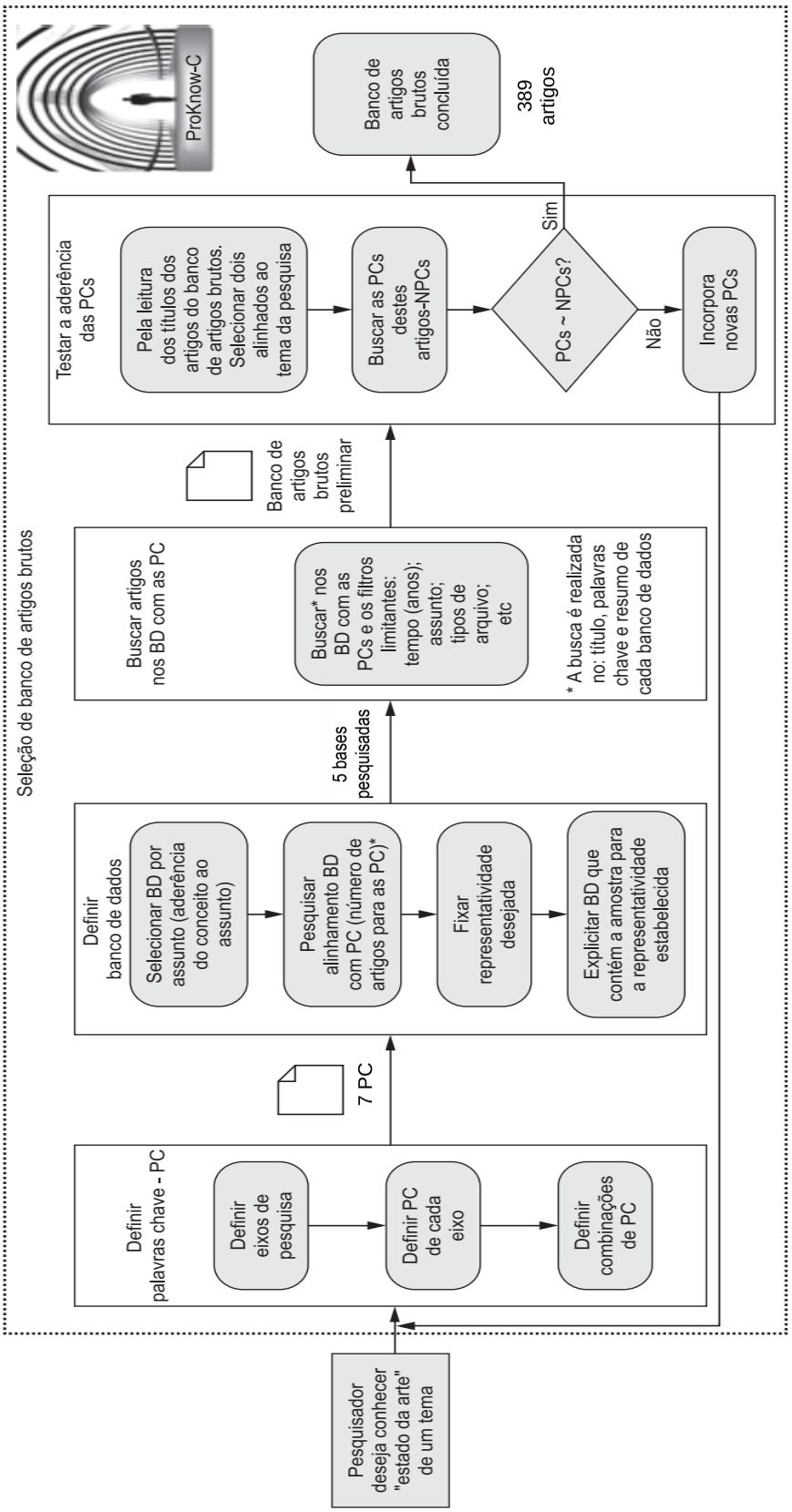


Figura 8 – Primeiro fragmento do processo para seleção de artigos.

Fonte: Adaptado de Ensslin *et al.* (2010).

2.3.2 Seleção dos artigos que comporão o portfólio para a pesquisa

Para um efetivo gerenciamento, as referências encontradas foram importadas para o aplicativo *Endnote* (REUTERS, 2013.), sendo possível identificar 26 referências a serem excluídas, a citar: 8 referências duplicadas, 10 livros, 8 seções de livros e nenhuma referência que correspondesse a *book review*, editorial ou reedições de artigos anteriores ao ano 2000.

Após exclusões, a biblioteca de artigos se compõe de 363 referências, até esse ponto do processo de seleção. Em seguida, passou-se à leitura dos títulos e *abstracts* dos artigos para observar o alinhamento desses com a presente pesquisa.

Nesse momento, uma operação adicional ao modelo proposto por de Oliveira Lacerda; Ensslin; Ensslin (2012) é realizada: fazendo uso do campo *rating* na ferramenta *Endnote* (REUTERS, 2013.), que se trata de uma escala de 0 a 5, uma nota é atribuída para o alinhamento ao tema de cada artigo. Tal procedimento se fez dada a preocupação em não excluir trabalhos pertinentes, entretanto recentes e portanto ainda pouco citados. Os critérios de inclusão adotados nesse caso, serão apresentados ainda nessa seção.

Depois dessa análise, 235 referências foram excluídas por não terem alinhamento com a pesquisa, restando 128 referências a serem analisadas (Figura *9*).

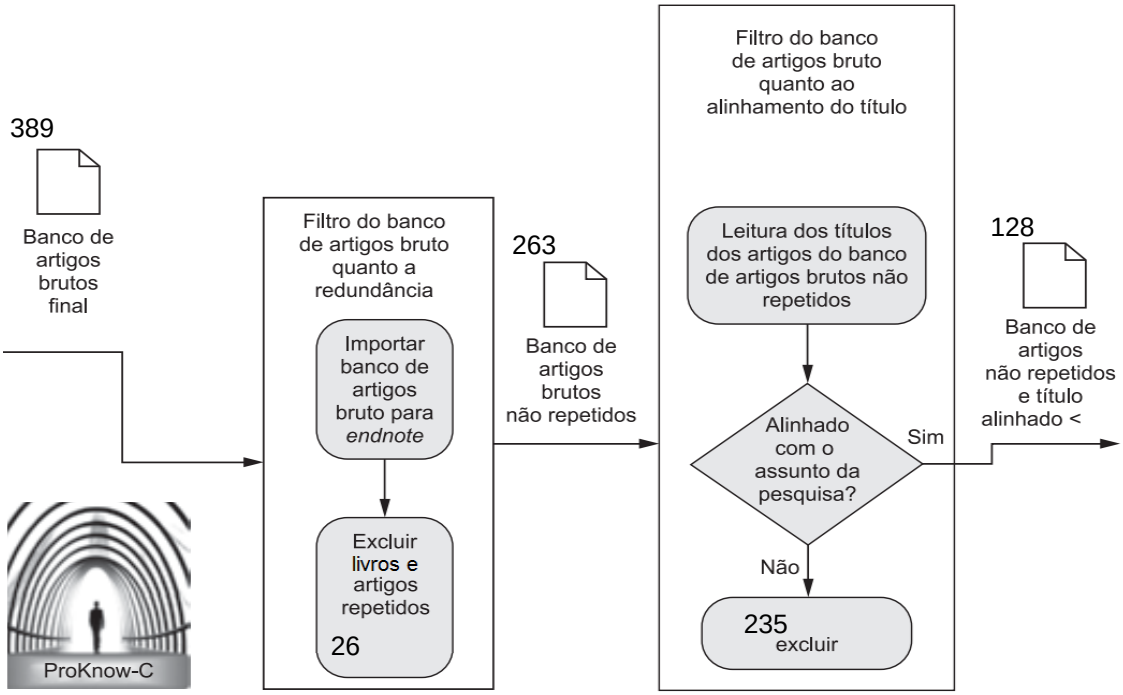


Figura 9 – Segundo fragmento do processo para seleção de artigos.

Fonte: Adaptado de Ensslin *et al.* (2010).

As 128 referências que se alinhavam com o tema de pesquisa, foram então verificadas quanto a sua disponibilidade via portal CAPES ou outras bibliotecas livres na internet, sendo então eliminadas 28 referencias por indisponibilidade de acesso.

Dessa forma, as 100 referências que se alinhavam e estão disponíveis foram analisadas pelo seu reconhecimento científico desde sua publicação. Para realizar essa análise, todas as referências foram consultadas pela ferramenta *Google Scholar* quanto ao número de citações e ordenadas de forma decrescente (JACSÓ, 2005).

De posse dessas informações, um valor de corte para os artigos mais citados foi estabelecido a partir da generalização que Juran (1986) fez para o postulado de Pareto (1896), na qual uma pequena minoria da população representa a maior parte do efeito. Contextualizando tal teorema à pesquisa, significa que, se a pesquisa selecionar a minoria dos artigos mais citados, esses representam a maioria do reconhecimento científico presente no conjunto atual de artigos.

Assim, o valor de corte representa a seleção das referências mais citadas, até que suas citações representem um valor superior a 85% de todas as citações obtidas pelos 100 artigos até agora analisados e selecionados. Somando todas as citações dos 100 artigos analisados, obtêm-se o número de 2.911 citações.

Assim, os artigos que individualmente foram citados 24 vezes ou mais, representam 2.459 citações, ou seja, 85,23% de todas as citações das 100 referências até agora selecionadas. Dessa forma, o ponto de corte para aprovar artigos no que se refere ao reconhecimento científico, foi identificado como 24 citações ou mais.

Com a identificação do valor de corte, 34 artigos foram selecionados pelo número de citações para leitura integral, conforme se pode observar na Figura 10.

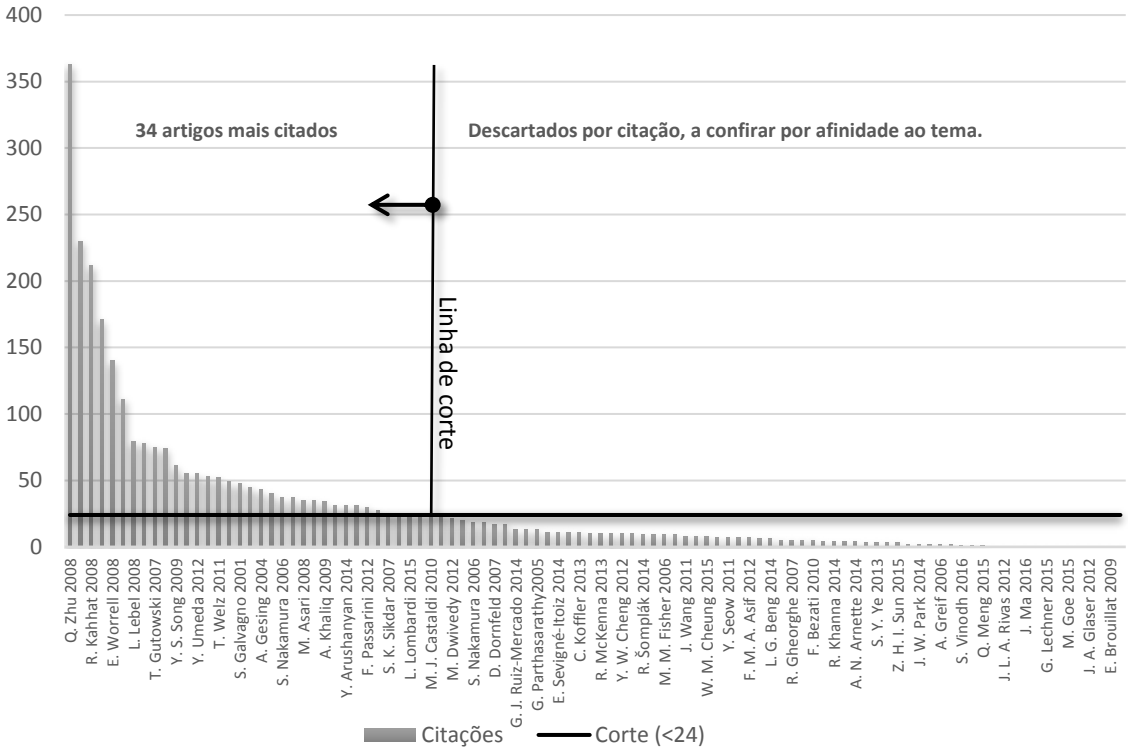


Figura 10 – Evidenciação do valor de corte conforme frequência de citações.
Fonte: Adaptado de Ensslin *et al.* (2010).

Neste momento, e para concluir a lista de trabalhos a serem lidos de forma integral, os 66 artigos menos citados foram averiguados quanto ao *rating*, atribuído anteriormente, referente ao alinhamento do artigo quando da leitura do *abstract*, título e palavras chave.

Para todo artigo classificado com a nota máxima do *rating*, ou seja, 5 que ainda não foi escolhido pelo critério de citações, foi então adicionado à lista final para leitura completa. Tal procedimento resultou na adição de 13 trabalhos.

Ainda mais, para todo artigo classificado com a nota do *rating* igual a 4, que ainda não foi escolhido pelo critério de citações e tenha sido publicado em 2015 ou 2016, foi então adicionado à lista final para leitura integral. Tal procedimento resultou na adição de mais 5 trabalhos.

Pelo exposto é por fim concluída a lista de trabalhos a serem lidos e avaliados na integra, totalizando 53 trabalhos.

Como critérios de avaliação para a leitura integral, cabe lembrar que além do objetivo central desta atividade, que é a identificar PRs e EFVs que afetem positivamente a eficiência energética, foram usados para as EFVs os critérios e definições previamente descritos na seção 2.2 e resumidos no Quadro 7 para os PRs e, em conjunto, os critérios propostos por Ignatenko; van Schaik; Reuter (2008). São eles:

i. Reciclagem de produtos em fim de vida com grande variedade de materiais;
ii. Inclusão do processo de pulverização;
iii. Descrição crítica de cada um dos fluxos do sistema;
iv. Reciclagem de matéria-prima;
v. Processos de separação física e recuperação térmica;
vi. Viabilidade de atingir altas metas de recuperação de energia impostas pela legislação da União Europeia para produtos em fim de vida.

Mediante a avaliação pela leitura integral, 26 artigos foram selecionados e 27 foram eliminados por não trazerem, com a profundidade adequada aos propósitos deste trabalho, as EFVs pré-selecionadas como critérios de avaliação, e entre essas, seus fluxos em processo ou seus benefícios para com a eficiência. Ainda assim, entre todos os 53 trabalhos, selecionadas ou não, àquelas citações identificadas como potencialmente úteis foram anotadas para posterior busca e leitura integral por uma revisão do tipo sistêmica.

Com o procedimento de verificar citações foram selecionados 22 trabalhos adicionais. Destes, 1 foi descartado por duplicação, 4 foram descartados por se tratarem de livros ou seções de livros não disponíveis. Outros 5 artigos não estavam disponíveis para acesso integral via CAPES ou plataforma livre. Dessa forma, 12 artigos disponíveis foram lidos na integra dos quais 6 foram então adicionados, mediante os critérios de avaliação já apresentados.

Por fim, dos 53 trabalhos de leitura completa foram então selecionados 26 trabalhos e por meio destes, 6 trabalhos citados foram adicionados, resultando então no portfólio final de 32 artigos de elevado reconhecimento científico e adequadamente alinhados com o tema de pesquisa, de forma a compor o cerne do referencial teórico.

2.3.3 Análise bibliométrica do portfólio de artigos para o referencial teórico.

A análise bibliométrica do portfólio de artigos selecionados para o desenvolvimento do referencial teórico como objetivos identificar, conhecer e selecionar os processos de EFVs relevantes ao contexto da eficiência nos PRs foi dividido em 3 etapas:

i. Análise bibliométrica dos artigos selecionados;
ii. Análise bibliométrica das referências dos artigos selecionados;
iii. Classificação dos artigos conforme relevância acadêmica na amostra.

2.3.3.1 Análise bibliométrica dos artigos selecionados.

Da análise bibliométrica dos artigos selecionados, resultaram 3 aspectos avaliados:

i. Reconhecimento científico pelo número de citações, conforme Tabela **6**;
ii. Número de artigos por periódico, conforme apresentado na Figura 11; e
iii. Número de artigos por autor. Para esse quesito, os pesquisadores Buekens, Alfon; Kremer, Gül E. Okudan e Ma, Junfeng foram os autores que tiveram dois dos seus artigos selecionados para o portfólio final (BUEKENS *et al.*, 2014b; BUEKENS *et al.*, 2014a; MA *et al.*, 2016a; b). Os outros 95 autores tiveram apenas um de seus artigos selecionados.

Tabela 6 – Número de citações dos artigos do portfólio.

Periódico	ISSN	JCR	Título	Ano	Citações
Journal of hazardous materials	0304-3894	4,529	*Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review*	2003	692
Journal of Cleaner Production	*0959-6526*	*3,844*	*Eco-efficiency gains from remanufacturing: A case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia*	2001	311
CIRP Annals - Manufacturing Technology	*0007-8506*	*2,542*	*A Key Issue in Product Life Cycle: Disassembly*	1993	275
*Stanford University (*PhD Dissertation)*	*	*	*Design for environment: a method for formulating product end-of-life strategies*	2000	171
Energy Efficiency	*1570-6478*	*1,06*	*Industrial energy efficiency and climate change mitigation*	2008	140
CIRP Annals-Manufacturing Technology	*0007-8506*	*2,542*	*Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study*	2008	111
Journal of Hazardous Materials	0304-3894	4,529	*Recycling of auto shredder residue*	2007	92
*University College for the Creative Arts (*PhD thesis)*	*	*	*Remanufacturing and product design: designing for the 7th generation*	2007	78
Journal of Hazardous Materials	0304-3894	4,529	*Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation*	2011	74
Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	*1359-835X*	*3,071*	*Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites*	2009	61
*Energy Systems Division / *Report*	*	*	*End-of-life vehicle recycling : state of the art of resource recovery from shredder residue*	2011	52
Energy Conversion and Management	*0196-8904*	*4,380*	*Pyrolysis process for treatment of automobile shredder residue: Preliminary experimental results*	2001	48
Minerals Engineering	*0892-6875*	*1,597*	*Dynamic modelling and optimisation of the resource cycle of passenger vehicles*	2002	45
JOM	*1543-1851*	*1,757*	*Assuring the continued recycling of light metals in end-of-life vehicles: A global perspective*	2004	43
Waste Manag	*1879-2456*	*3,22*	*Thermal process of fluff: preliminary tests on a full-scale treatment plant*	2010	37
Journal of Energy Resources Technology	*0195-0738*	*1,89*	*Exergy Analysis of an Industrial Waste Heat Recovery Based Cogeneration Cycle for Combined Production of Power and Refrigeration*	2009	34
Renewable and Sustainable Energy Reviews	*1364-0321*	*5,901*	*Features of an efficient and environmentally attractive used tyres pyrolysis with energy and material recovery*	2013	31
*Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 1999. (*Proceedings)*	*	*	*Product development and recycle system for closed substance cycle society*	1999	25
Resources, Conservation and Recycling	*0921-3449*	*2,564*	*Environmental evaluation of plastic waste management scenarios*	2014	13

Fonte: Adaptado de Ensslin *et al.* (2010).

(continua)

Tabela 6 – Número de citações dos artigos do portfólio. (conclusão)

Periódico	ISSN	JCR	Título	Ano	Citações
Journal of Cleaner Production	*0921-3449*	*2,564*	*Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy*	2015	11
Journal of Material Cycles and Waste Management	*1438-4957*	*0,95*	*Recycling of WEEE plastics: a review*	2014	10
Journal of Cleaner Production	*0959-6526*	*3,844*	*Towards cleaner production: a roadmap for predicting product end-of-life costs at early design concept*	2015	8
Clean Technologies and Environmental Policy	*1618-9558*	*1,934*	*Sustainability in the context of process engineering*	2015	5
Journal of Material Cycles and Waste Management	*1438-4957*	*0,95*	*Recycling plastics from automotive shredder residues: a review*	2014	5
*University of Windsor (*PhD Thesis)*	*	*	*Innovative design for active disassembly and sustainable product recovery*	2013	3
International Journal of Sustainable Engineering	*1939-7038*	*0,32*	*Design standards for product end-of-life processing*	2010	2
Intern. Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology	*2288-6206*	*1,205*	*A monitoring system architecture and calculation of practical recycling rate for end-of-life vehicle recycling in Korea*	2014	2
*Université Grenoble Alpes (*PhD Thesis)*	*	*	*Assessment of the environmental benefits provided by closed-loop strategies for industrial products*	2012	0
International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology	*2288-6206*	*1,205*	*Trends and research challenges in remanufacturing*	2016	0
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	*0268-3768*	*1,458*	*A systematic literature review of modular product design (MPD) from the perspective of sustainability*	2016	0
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	*0268-3768*	*1,458*	*A sustainable modular product design approach with key components and uncertain end-of-life strategy consideration*	*2015*	*0*
Journal of Remanufacturing	*2210-4690*	*0,3*	*Reprocessing and repairing white and brown goods - the R.U.S.Z case: an independent and non-profit business*	*2015*	*0*

Fonte: Adaptado de Ensslin *et al.* (2010).

Conforme revelado na 6, adotando-se como critério o princípio de Pareto, temos que os 8 primeiros trabalhos mais citados representam aproximadamente 80% de todas as citações do portfólio, sendo portanto os de maior reconhecimento científico pelo número de citações. Nesses trabalhos é possível observar que os temas mais abordados e relacionados com a eficiência dos PRs referem-se a reciclagem mecanizada, a estratégias de desmontagem e de fim de vida e, por fim, ao impacto ambiental como consequência da ineficiência energética. Dessa forma, são então revelados aspectos importantes a serem observados e que devem ser abordados pelo método proposto e que será objeto desta dissertação.

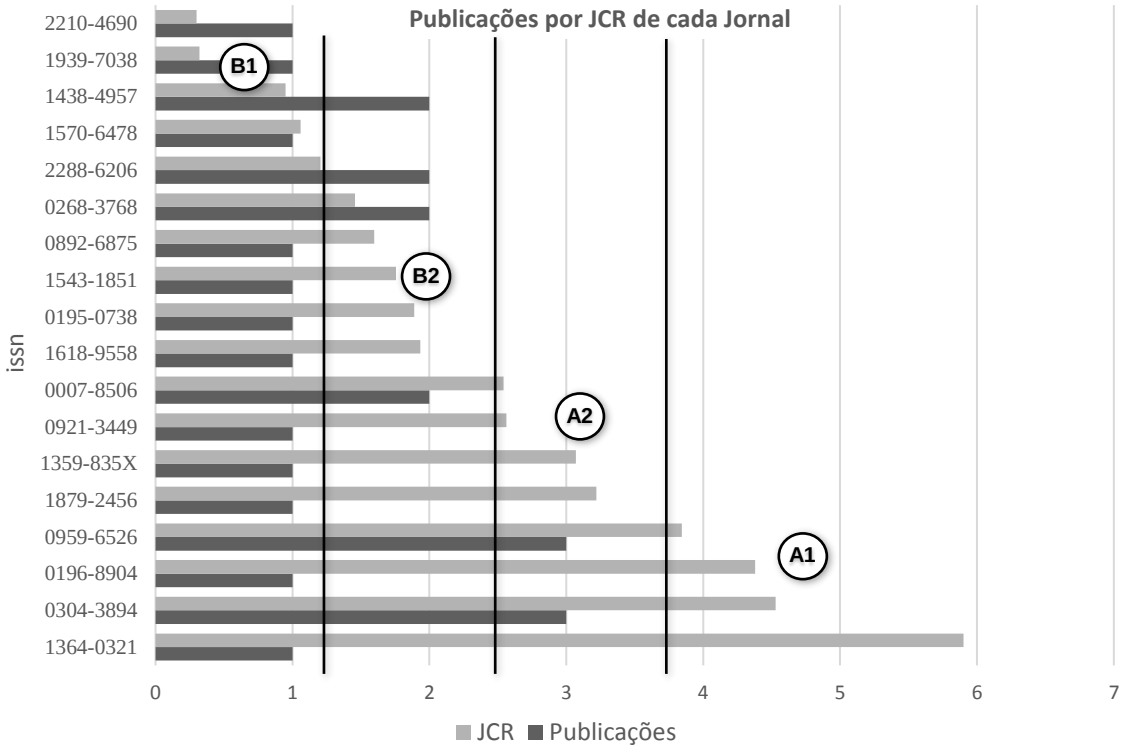


Figura 11 – Número de artigos por periódico.

Fonte: Adaptado de Ensslin *et al.* (2010).

Segundo o número de artigos por periódico, conforme apresentado na Figura 11, é possível observar que o tema da eficiência em PRs é recorrente e tem sido motivo crescente de pesquisa por periódicos de alto impacto, segundo classificações da CAPES-Qualis.

2.3.3.2 Análise bibliométrica das referências dos artigos selecionados

Com vistas a identificar os autores, artigos e periódicos que se destacam no contexto da pesquisa em pauta, foram catalogadas 2.451 referências citadas pelos 32 artigos que compõem o portfólio final. Essas 2.451 referências foram analisadas sob as seguintes óticas:

i. Distribuição por ano de publicação, conforme ilustrado na Figura 12;
ii. Número de artigos por autor, conforme apresenta a Figura 13.

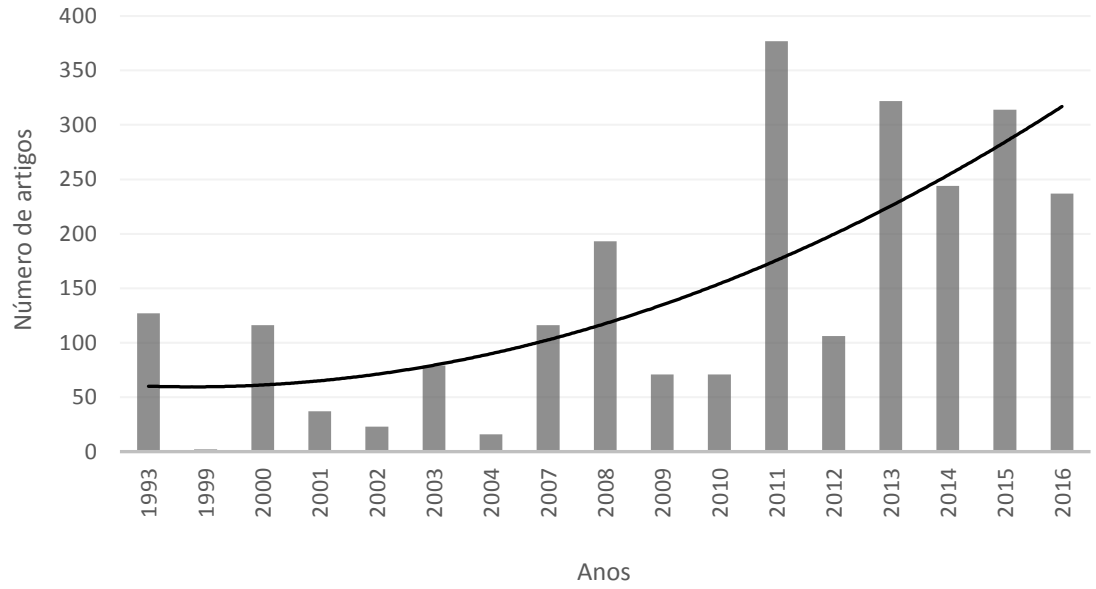


Figura 12 – Número de referências utilizadas pelos artigos do portfólio, por temporalidade.
Fonte: Adaptado de Ensslin *et al.* (2010).

Conforme ilustrado na Figura 12, a distribuição por ano de publicação revela um crescente e importante aumento de trabalhos buscando abordar a eficiência nos PRs, tendo aumentando em uma ordem de quase seis vezes na última década. Dessa forma, revela-se um assunto relevante e ainda não resolvido, sugerindo um importante nicho de pesquisa.

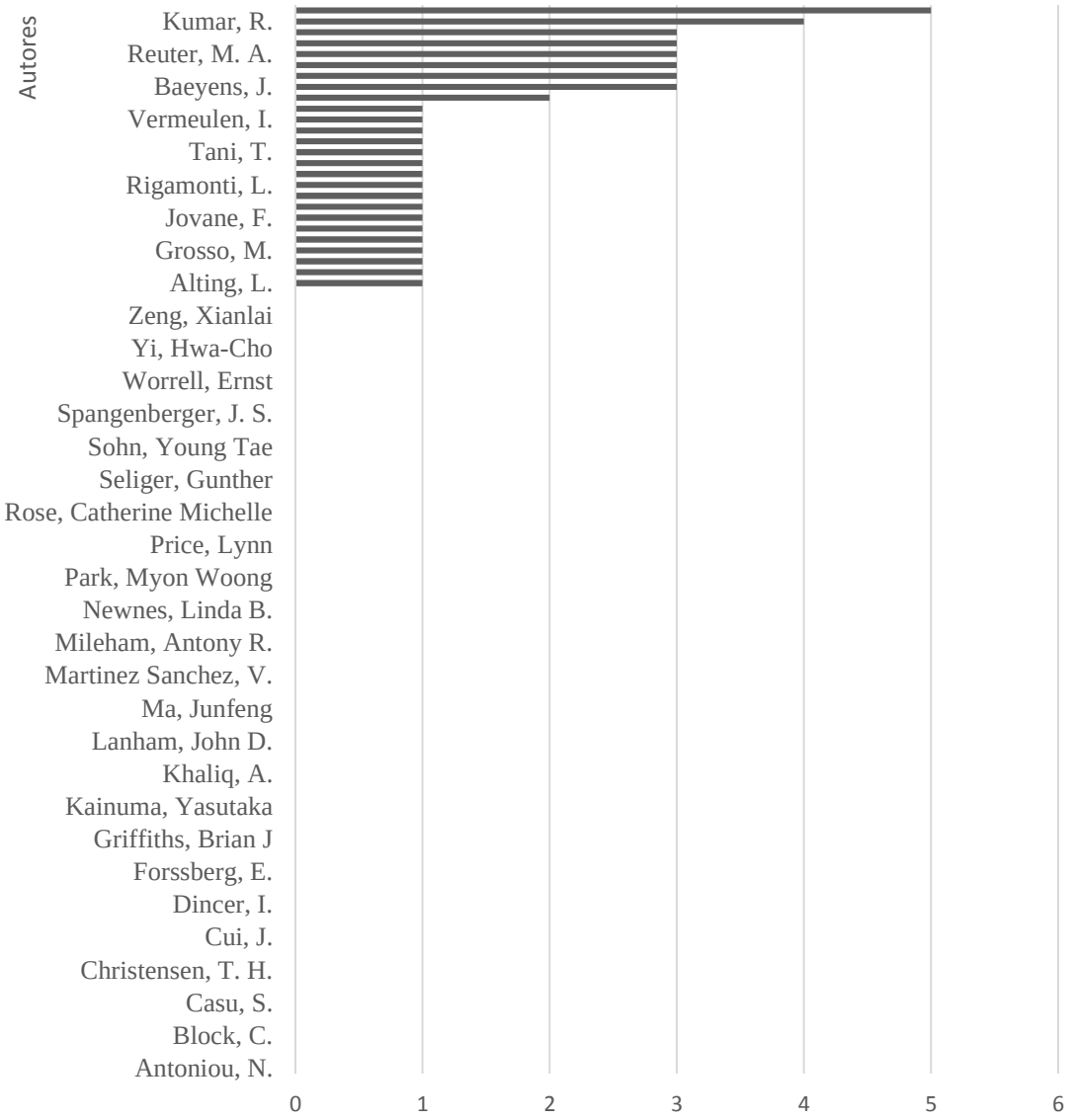


Figura 13 – Número de citações nas referências por autor.

Fonte: Adaptado de Ensslin *et al.* (2010).

Conforme apresenta a Figura 13, o número de citações por autor revela os nove autores mais citados entre trabalhos realizados com objetivos relacionados a eficiência. Portanto, metodologias, problemas, resultados e demais aspectos em trabalhos realizados por estes autores, devem ser observados com atenção especial.

2.3.3.3 Classificação dos artigos conforme relevância acadêmica na amostra

Para classificar os artigos do portfólio pela sua relevância acadêmica, o presente estudo adotou duas dimensões de avaliação:

i. Número de citações do artigo via *Google Scholar* desde sua publicação; e
ii. Número de citações do autor mais citado na análise das referências bibliográficas dos artigos do portfólio, conforme discutido na seção anterior.

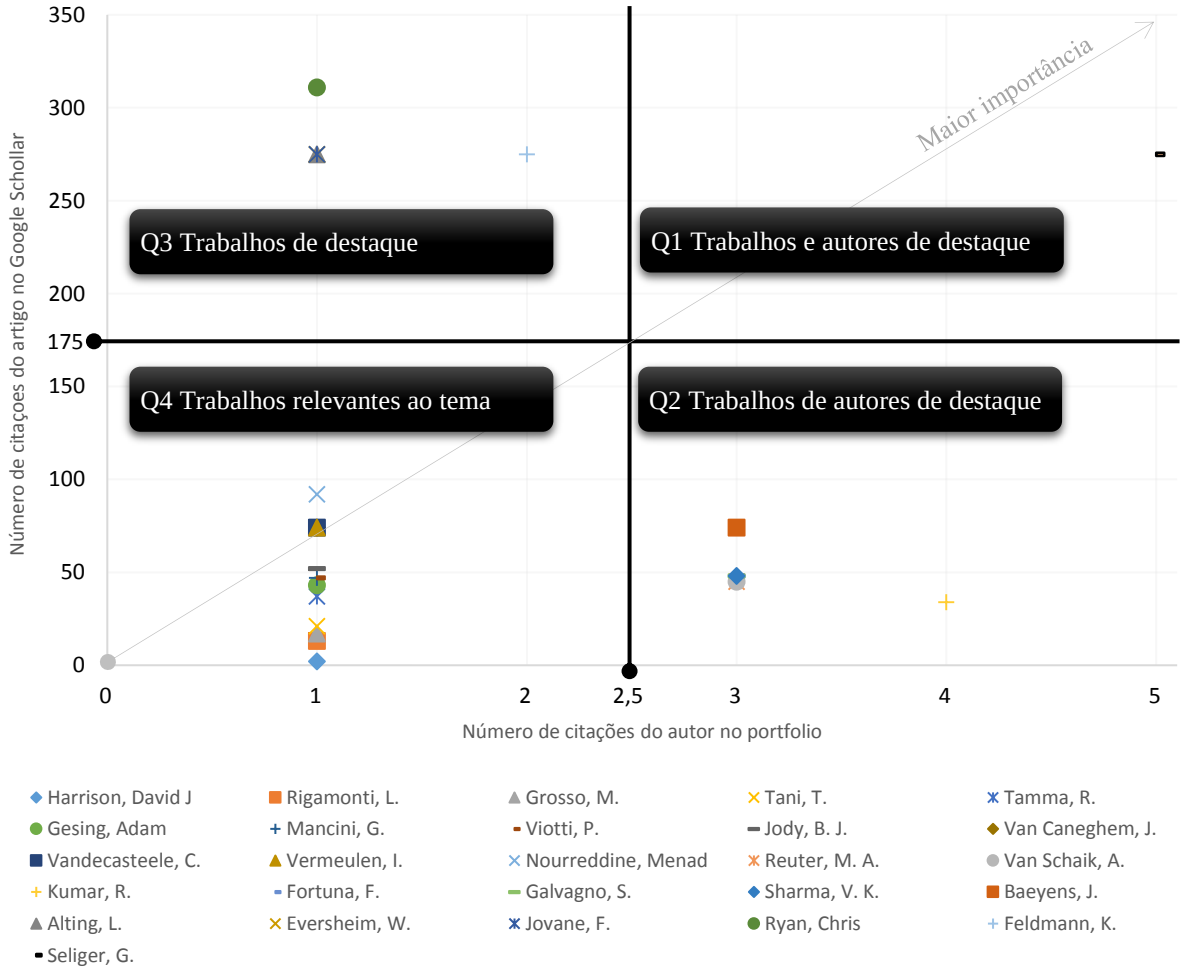


Figura 14 – Classificação dos artigos conforme relevância acadêmica.

Fonte: Adaptado de Ensslin *et al.* (2010).

Fruto dessa análise, a

Figura 14 apresenta o gráfico com as duas dimensões definidas, de forma a classificar os artigos conforme sua relevância acadêmica e os artigos que se destacaram nessa análise. Nesse sentido, os autores são então distribuídos em quatro quadrantes de reconhecimento científico e respectiva importância, onde o quadrante 1 é o mais relevante, tendo revelado o trabalho de Seliger *et al.* (2002), seguido pelos quadrantes 2,3 e 4 e respectivos autores alocados.

2.3.3.4 Considerações sobra a análise bibliométrica

O objetivo desta atividade se centrou em duas etapas:

i. Apresentar um processo sistemático para selecionar referências bibliográficas e compor um referencial teórico, sobre o contexto dos processos de EFVs relevantes à eficiência energética nos PRs. Foram apresentados os procedimentos para a seleção da literatura mais relevante sobre o tema, realizando análises para averiguar os principais trabalhos, autores e periódicos que publicaram sobre o tema;
ii. Recuperar da literatura as EFVs e PRs tidos como eficientes. Os resultados de tal entrega serão apresentados adiante na seção 2.3.4.

Tal processo, conforme ilustrado na Figura 15, possibilitou realizar uma seleção sistemática de referências possíveis, que se iniciou com 389 trabalhos e culminou em um portfólio composto de 32 artigos explicitados na Tabela **6**.

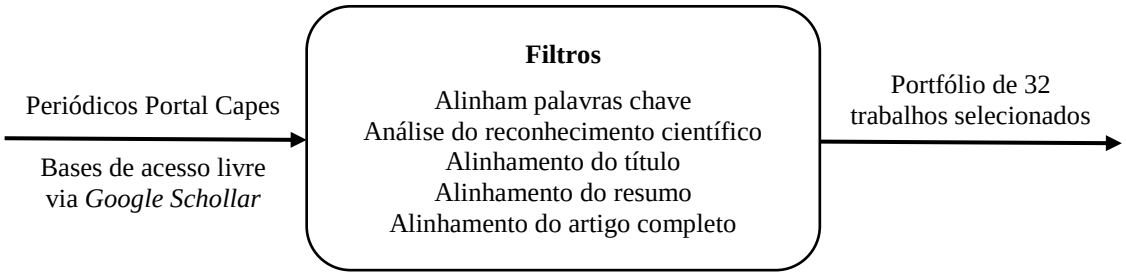


Figura 15 – Resumo do processo para seleção de referências bibliográficas.
Fonte: Adaptado de Ensslin *et al.* (2010).

O processo permitiu identificar que o tema da eficiência energética é frequentemente abordado pela grande maioria dos muitos autores (98 autores somente no portfólio), entretanto, pela profundidade com que o fazem, é possível dividir os trabalhos dois grupos:

i. Abordagem profunda, quantitativa e detalhada sobre eficiência energética, porém focada na EFV de descarte por incineração com recuperação de energia; e
ii. Abordagem superficial, limitando-se a citar a importância da eficiência energética porém, sem apresentar investigações profundas dos processos industriais que envolvem todas as EFVs ou PRs diversos.

Sobre o segundo grupo acima, é digno de nota que a revisão tenha permitido encontrar em uma recente e extensa revisão bibliográfica no trabalho de Ma; Kremer (2016, p. 31) em um jornal de JCR 1,458, que buscou entre outros aspectos, mapear a literatura que tratasse do consumo ou da eficiência energética dos PRs presentes nas EFVs, tendo afirmado não encontrar literatura a respeito. Tais fatos corroboram com a oportunidade de pesquisa argumentada na seção 1.1.2. e sugerem que os resultados desta revisão bibliométrica possam vir a colaborar no tratamento dessa lacuna.

2.3.4 Projeto e desenvolvimento da solução

Nos moldes da proposta de Peffers *et al.* (2007) esta seção deve dar início à construção do projeto e desenvolvimento da solução que, nesta atividade, consiste em resgatar, por meio da literatura selecionada na revisão bibliométrica, as EFVs e PRs tidos como processos praticados e eficientes. Dessa forma, a seguir são descritas cada EFV e PR quanto aos seus princípios, processos e limitações de forma a justificar àqueles que então serão selecionados para a análise por exergia.

2.3.4.1 Reuso

O Reuso é a segunda negociação de um produto para utilização como foi originalmente criado (OVERBY, 1979; ISHII, KOSUKE *et al.*, 1994; LUTTROPP, 1997; NILSSON, 1998).

Com um estudo centrado na eficiência da EFVs para a tratativa de *e-waste*, Balkenende *et al.* (2015) adotando o conceito de anti-obsoletismo, listam aspectos presentes no projeto dos PFVs e altamente impactantes para a eficiência e viabilização da EFV Reuso. Os principais aspectos relacionam-se à durabilidade, dado que possuem alta performance e grande confiabilidade, ou ao fato de serem usados por muito tempo, dado que possuem um roteiro de manutenção, são atualizáveis, adaptáveis, possuem estilo de *design* atemporal; e antecipam a legislação (i.e. toxicidade, reciclabilidade, desmontabilidade).

Embora a EFV Reuso seja, do ponto de vista ambiental a ideal e do ponto de vista técnico possível, esta EFV possui um caráter predominantemente estático pois representa de forma limitada as mudanças do produto com relação a atualização tecnológica ou a evolução do seu mercado. Estas características têm forte influência sobre a decisão de descartar os PFVs, de acordo com diferentes comportamentos do consumidor e de sua interação com os produtos (ROSE, CATHERINE MICHELLE, 2000).

Vários estudos reconhecem que aspectos não técnicos e comumente relacionados à aparência do produto ou comportamentos sociais geram o sentimento de obsolescência psicológica, são aspectos de grande importância no processo de decisão para a substituição de um dado produto e assim, afetam o Reuso (NES *et al.*, 1999; GESING, 2004; CARPENTER *et al.*, 2006b; a; SONG *et al.*, 2015) . Como exemplo, Boks *et al.* (1996) demonstraram em um estudo realizado na Holanda, que aproximadamente metade dos primeiros usuários descartam produtos eletrônicos por aumento das exigências de funcionalidade (aspirações mais altas, mesmo que não plenamente utilizadas) e motivos emocionais ("Não gosto mais do produto e posso me dar ao luxo de comprar um novo").

Dessa forma e conforme exposto pela revisão de literatura, a EFV Reuso é, por definição, um processo de intervenção nula sobre o PFV (OVERBY, 1979; ISHII, KOSUKE *et al.*, 1994; LUTTROPP, 1997; NILSSON, 1998). Além disso, é predominantemente afetada por aspectos subjetivos, tais como comportamento humano de consumo e incertezas sobre o avanço da tecnologia.

A fim de viabilizar a análise de exergia sobre a EFV Reuso, faz-se necessário uma revisão de contexto sobre o que se defini por Reuso. Segundo a definição adotada pela diretiva europeia (DIRETIVA 2000/53/EC, 2012) de veículos em fim de vida, Reuso significa qualquer operação através da qual os componentes de PFVs, e não necessariamente o produto como um todo, sejam reutilizados para o mesmo fim que foram concebidos.

Dessa forma, nesse estudo adota-se que um PFV é composto por subsistemas ou componentes, passiveis de análise como um "potencial de economia" da exergia demandada nas fases de manufatura (matérias primas e processos fabris) e que foi agregada ao PFV.

2.3.4.2 Manutenção

Também conhecida como serviço essa EFV é, a exemplo da EFV Reuso, outra maneira de prolongar a vida útil de um produto reparando ou reconstruindo o produto utilizando peças de manutenção no local onde o produto está sendo usado (OVERBY, 1979; ISHII, KOSUKE *et al.*, 1994; LUTTROPP, 1997; NILSSON, 1998).

Visando a eficiência dessa EFV, estudos têm sido desenvolvidos buscando prognósticos de tempo de vida por meio do monitoramento *online* por meio de sensores embutidos para fins de estudo e aprimoramento da qualidade, dos testes, da manutenção e eventuais controles de cobrança (ROSE, CATHERINE MICHELLE, 2000).

Balkenende *et al.* (2015) listam aspectos presentes nos PFVs, altamente impactantes para a eficiência da EFV manutenção, tais como fácil limpeza, desmontagem e montagem e permite limpeza e manutenção no local.

Ressaltando a necessidade de desmontagem, outros autores sugerem subdividir essa EFV em:

i. **Serviço**, que inclui atividades como medição, testes, ajustes de componentes, substituindo componentes de desgaste por uso, e manutenção do produto com consumíveis necessários para manter a funcionalidade do produto como lubrificação, limpeza, troca de óleo são alguns exemplos de manutenção e

serviços produto. A desmontagem é necessária para a maior parte destas operações (ZIOUT, 2013).

ii. **Reparo**, como processo cuja finalidade é restaurar a funcionalidade original e desempenho de um produto com defeito. Geralmente requer desmontagem parcial para substituir uma peça ou sub-montagem com defeito. Aqui a facilidade de desmontagem é crucial para minimizar o tempo e custo de reparo (ZIOUT, 2013)..

iii. **Reconfiguração** de produtos modulares, visando atualizações ou incremento de funções específicas, notando ser necessária a desmontagem parcial (KATZ, 2006).

Neste ponto é possível notar que, tanto viabilidade quanto a eficiência da EFV manutenção estão diretamente associadas ao processo de desmontagem seletiva. Tal processo consiste na remoção de componentes que permitam acesso àqueles componentes ou módulos que requerem manutenção ou reparo. No contexto das EFVs, operações destrutivas e semidestruídas podem ser necessárias, mas do ponto de vista da EFV manutenção, ela será tão eficiente quanto mais ágil e menos destrutiva (LAMBERT *et al.*, 2004, p.34).

Como possível solução e ainda na busca por eficiência das EFVs, as metodologias "Design for X" (Projeto para característica X) ganham destaque entre as pesquisas visto que são eficazes na concepção de produtos sustentáveis (ZIOUT, 2013). Nessas metodologias o X representa o objetivo do projeto, tais como a concepção para a desmontagem, manutenção ou reparo, modularidade, Reciclagem, Reuso, Remanufatura e meio ambiente (KRIWET *et al.*, 1995; HUANG *et al.*, 2012).

Em conclusão, como EFV manutenção é considerada como um processo com elevado grau de incerteza, e altamente dependente de características de projeto de cada produto e, dessa forma, uma candidata inviável para a construção de um método por análise de exergia com suficientes níveis de abstração e generalização e portanto, será desconsiderada no método a ser proposto.

Entretanto, ao se aprofundar no estudo da EFV Manutenção, foi possível recuperar da literatura a importância dos processos de desmontagem para com várias EFVs e PRs e assim, a próxima seção trará a devida caracterização e relevância desse subprocesso para com as próximas EFVs e PRs.

2.3.4.3 Desmontagem

A desmontagem é tão antiga quanto a humanidade e ainda mais antiga que a montagem com registros que remontam de processos de extração (ou desmontagem) com o intuito de extrair a carne de animais e, no contexto industrial, de processos meticulosamente elaborados e aplicados em matadouros (LAMBERT *et al.*, 2004, p.34).

A desmontagem no âmbito dos PFVs tem um papel fundamental para alcançar o ciclo fechado no ciclo de vida do produto (MASUI *et al.*, 1999). Conforme revela a revisão de literatura na seção "2.3.4.2 Manutenção", quando se objetiva a eficiência em certas EFVs a desmontagem é classificada como extremamente importante por diversos autores e, dessa forma, recebe nesse trabalho uma subseção específica, introduzida nesse momento já que boa parte da eficiência das próximas EFVs dependem em muito desse subprocesso.

A desmontagem, também conhecida como demanufatura, pode ser definida como o desmembrar de um produto nas suas partes com os objetivos de reutilizar aquelas em boas condições, de permitir a Remanufatura e, por fim, a Reciclagem do restante dos componentes com menores níveis de mistura. É uma estratégia que se concentra na recuperação de ativos de produtos como uma tática de abordagem para resíduo mínimo (DUFLOU *et al.*, 2008). Dessa forma, a desmontagem não deve ser vista como uma EFV mas como um processo que viabiliza e pode compor o processo geral de outras EFVs a serem discutidas adiante.

Segundo resultados da pesquisa, é possível notar que a desmontagem de PFV é motivada por três objetivos principais (ROSE, CATHERINE MICHELLE, 2000; DUFLOU *et al.*, 2008; ZIOUT, 2013):

i. Recuperar materiais secundários de forma pura (evitar moagem e mistura);
ii. Isolar materiais de alto impacto ambiental de outros materiais; e
iii. Viabilizar e/ou potencializar outras EFVs como Manutenção, Remanufatura e Reciclagem com desmontagem.

É comum encontrar na literatura autores que sugiram que a desmontagem completa seria ideal porém, ainda que possa parecer uma maneira de minimizar impactos ambientais, outros estudos concluem que a tecnologia atual e valores de mercado praticados para

componentes ou materiais reciclados, tornam a atividade economicamente insustentável. (BHAMRA, 1997; ROSE, CATHERINE MICHELLE, 2000).

Dessa forma, centrados na eficiência econômica do processo de desmontagem, Jovane *et al.* (1993) defendem que o princípio orientador na desmontagem é remover primeiro as peças mais valiosas, interrompendo o processo de desmontagem quando o retorno econômico sobre a operação se tornar inviável. Seguindo este princípio econômico, outros autores defendem que o limite na desmontagem pode ser definido segundo a Figura 16 (SIMON, 1991; FELDMANN *et al.*, 1993).

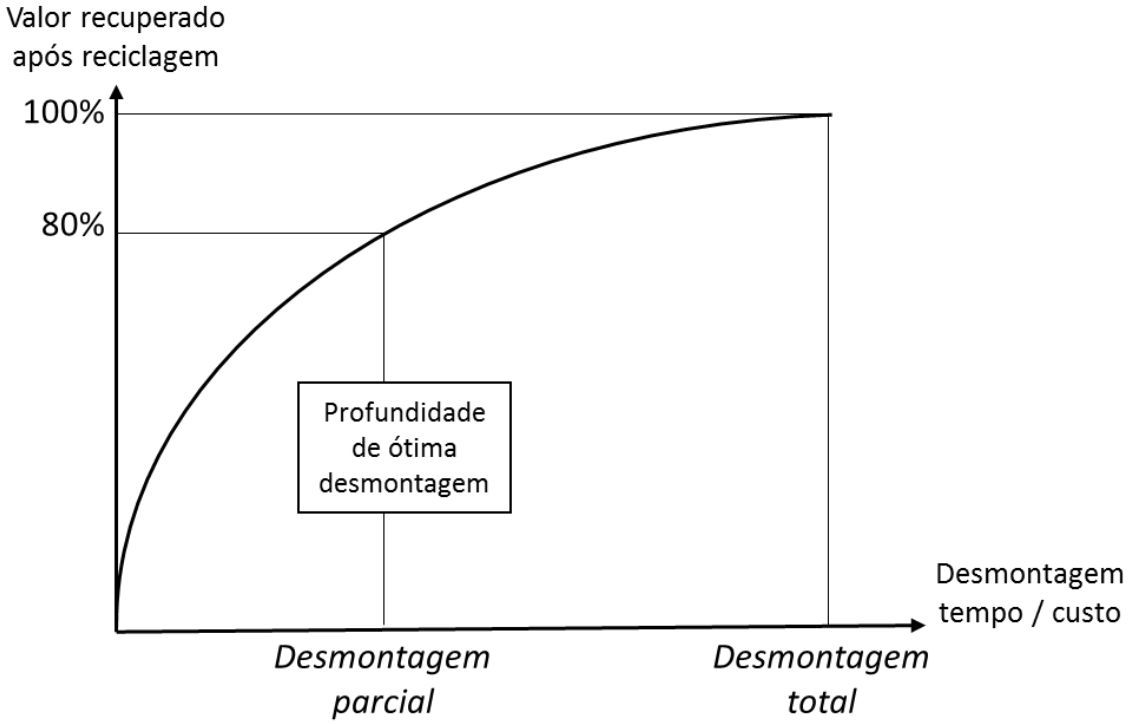


Figura 16 – Limite da desmontagem baseada na viabilidade econômica.
Fonte: Adaptado de Jovane *et al.* (1993).

Entretanto, apesar de sua contribuição para com propósitos econômicos, é possível notar que pesquisas com tal foco frequentemente desconsideram barreiras técnicas impostas pela sequência de desmontagem, uma vez que para alcançar um determinado componente, independentemente de seu valor econômico, frequentemente são necessários desmontar outros componentes prioritariamente.

Na busca por equilíbrio, estudos buscam formas ideais de desmontagem para recuperar componentes preservando suas funções e seu valor agregado, em menores tempo,

custo e etapas. Boks *et al.* (1996) abordam a questão comparando tempos de montagem da fase de manufatura usando diferentes métodos de desmontagem.

Boks *et al.* (1998) realizam um estudo refletindo as opiniões de um painel de 70 especialistas avaliando as potenciais e futuras tecnologias de desmontagem para os PFVs eletrônicos. Entre os resultados obtidos, não se acredita que a desmontagem totalmente automatizada venha a ser, devido à baixa eficiência tecnológica, economicamente viável antes de 2020.

Com o propósito de auxiliar na complexa busca pelo processo de desmontagem ideal, várias pesquisas aplicaram a experiência adquirida com o *Design For Assembly* (DFA - Projeto para Montagem) para propor ferramentas na forma de softwares de desmontagem; geralmente calculando e simulando vias potenciais de desmontagem, identificando o caminho mais rápido e revelando obstáculos (ISHII, KOSUKE *et al.*, 1994; ISHII, K., 1995; ALLEN *et al.*, 1998; KNIGHT *et al.*, 1999).

Em uma revisão dos últimos 10 anos, focada em eficiência e viabilidade da desmontagem, Duflou *et al.* (2008) afirmam que as conclusões nos círculos acadêmicos e industriais não foram consistentes em definir se a desmontagem completa do PFV, como um paradigma de fim de vida, é realmente um meio viável para alcançar uma economia de circuito fechado. Entretanto existe amplo consenso em afirmar que a eficiência dos processos de desmontagem pode ser significativamente influenciada por uma otimização da estrutura do produto (BOOTHROYD *et al.*, 1992; HARJULA *et al.*, 1996; MEERKAMM, 2003).

Com um estudo centrado na eficiência das EFVs para a tratativa de *e-waste*, Balkenende *et al.* (2015) listam aspectos presentes no projeto dos PFVs altamente impactantes na eficiência dos processos de desmontagem. São eles:

Quanto às conexões:

i. Rápidas e fáceis;
ii. Demandam uso e diversidade limitada de elementos de fixação; e
iii. Demandam uso e diversidade limitada de ferramentas.

Quanto a arquitetura de produto:

i. Simplificada;
ii. De fácil acesso aos componentes; e
iii. Apresenta clara sequência de desmontagem.

Em um estudo de caso, Duflou *et al.* (2008) apresentam um trabalho sobre a eficiência de desmontagem de uma câmera fotográfica, com o intuito de quantificar a eficiência gerada no processo de desmontagem, quando o projeto do produto é concebido de forma a facilitar o processo de desmontagem. Em contrapartida, reconhecendo que de forma pragmática, que o cenário ideal seria àquele onde todos os produtos sejam tratados tal como recebidos, por instalações devidamente preparadas para lidar com sua desmontagem (SCHOLZ-REITER *et al.*, 1999; SELIGER *et al.*, 2002).

Em seu estudo, Duflou *et al.* (2008) apontam que as fronteiras entre ambos os cenários variam significativamente conforme o produto e, portanto, diferentes tipos de soluções técnicas devem ser adotadas. Dito isto, uma revisão é apresentada descrevendo ferramentas genéricas de automação e sistemas de fixação desenvolvidos para aumentar a eficiência de uma ampla gama de operações de desmontagem. Complementar aos esforços de automação, resgata o estado-da-arte e descrevendo uma série de inovadores sistemas de fixação em desenvolvimento que podem contribuir para uma mudança de paradigma nos métodos de desmontagem, de forma a alcançar produtos que se auto desmontem e assim, aproximar-se eficientemente da desmontagem completa. Outros autores classificam tal abordagem como tecnologias disruptivas e vêm sendo pesquisadas sobre a denominação de Desmontagem Ativa, estimando que uma melhoria de 200% -250% em eficiência pode ser conseguida (WILLEMS, 2007). Por fim, conforme resultados obtidos, admitem que em um modelo de negócio fechado, onde o projeto, fabricante e reutilizador sejam um único responsável, altos níveis de automação e eficiência são possíveis, porém, com a tecnologia atual, fica claro que tal nível de automação e portanto de eficiência não é possível para qualquer PVF por meio de uma automação genérica (WILLEMS *et al.*, 2006).

Entre as áreas de desdobramento dentro do processo de desmontagem, estão sendo desenvolvidas pesquisas focadas no planejamento do processo de desmontagem em instalações desenvolvidas especificamente para este fim (CUI, J. *et al.*, 2003). Dessa forma, as seguintes fases para o desenvolvimento de um plano de processo de desmontagem são propostas (GUNGOR *et al.*, 1998; MOORE *et al.*, 1998):

i. Análise de entrada e saída dos PFV: Nesta fase, componentes e materiais reutilizáveis, valiosos e perigosos são definidos. Após a análise preliminar de custos, a desmontagem ideal é identificada;
ii. Análise de montagem: Na segunda fase, elementos de união, hierarquia de componentes e sequências de montagem são analisados;

iii. Análise de incertezas: Advêm de peças defeituosas ou junções no produto de entrada, do *upgrade*/*downgrade* do produto durante o uso pelo consumidor e danos decorrentes da desmontagem; e
iv. Determinação da estratégia de desmontagem: Na fase final é decidido se a desmontagem a usar será destrutiva ou não destrutiva.

Por fim, segundo confirma a literatura, a desmontagem é um subprocesso de elevado impacto para várias EFVs e PRs e será considerada como um subprocesso dentro das respectivas EFVs aplicáveis, conforme sejam descritas e selecionadas a seguir.

2.3.4.4 Remanufatura

A mudança atual de paradigma na manufatura implica considerar vários aspectos do ciclo de vida dos produtos e otimizar seu valor e benefícios, incluindo as fases definidas nas EFVs adotadas (DUFLOU *et al.*, 2008). Ainda mais, seu propósito final deve centrar-se em prover funcionalidade e/ou benefício ao invés de vender produtos (TAKATA, 2007).

Nesse contexto, destaca-se a Remanufatura, também denominada por reconstrução. Entretanto existem diferentes definições para a Remanufatura. A APRA (2016) define Remanufatura como "o processo de restauração de produtos duráveis usados ou descartados à condição de novo". Em um raciocínio semelhante Sundin *et al.* (2005) definem Remanufatura como "o processo de reconstrução de um produto, no qual o produto é desmontado, limpo e inspecionado; componentes defeituosos são substituídos; e o produto é remontado, testado e inspecionado novamente para garantir que atenda ou exceda às normas de produtos recém-fabricados ", sendo esta última, a definição predominante e adotada por vários outros autores (CLEGG *et al.*, 1995; STEINHILPER, 1998; IJOMAH *et al.*, 1999; KERR *et al.*, 2001).

Outros autores definem a Remanufatura por meio da caracterização do seu processo, onde quantidades de produtos semelhantes são trazidos para uma instalação e desmontados, mantendo a integridade original dos componentes inalterada ou reestabelecida por pequenos reparos (ROSE, CATHERINE MICHELLE, 2000; DUFLOU *et al.*, 2008). Tal processo difere da Reciclagem tradicional que objetiva predominantemente a recuperação de material e em alguns casos de energia porém, sem conservar qualquer estrutura do produto (OH

et al., 2006). Os componentes podem ser reutilizados quando o desgaste da vida útil é mais longo do que o ciclo tecnológico. Na maioria dos casos, existem importantes oportunidades de mercado para estas peças (ROSE, CATHERINE MICHELLE, 2000).

A literatura revela consenso ao afirmar que a produção e consumo sustentável só é possível com sistemas fechados, onde recursos são recuperados do fluxo de resíduos de um PFV. No entanto, um sistema que "fecha o ciclo" por meio da Reciclagem pode vir a ser apenas ligeiramente mais eficiente ambiental e economicamente do que aquele que descarta o PFV como resíduo. Isso se dá pois em cada fase dos processos de um sistema de reciclagem fechado, energia é gasta e, dependendo dos detalhes do sistema, isto pode representar uma impacto ambiental significativo (STEINHILPER, 1998).

Com um estudo centrado na eficiência da EFVs para a tratativa de *e-waste*, Balkenende *et al.* (2015) listaram aspectos presentes no projeto dos PFVs e altamente impactantes na eficiência dos processos de Remanufatura. Como resultado foram destacados os principais, tais como o uso de componentes modulares, a fácil leitura e identificação dos componentes, o uso de interfaces padronizadas e a compatibilidade para frente e para trás, permitindo a atualização e Reuso.

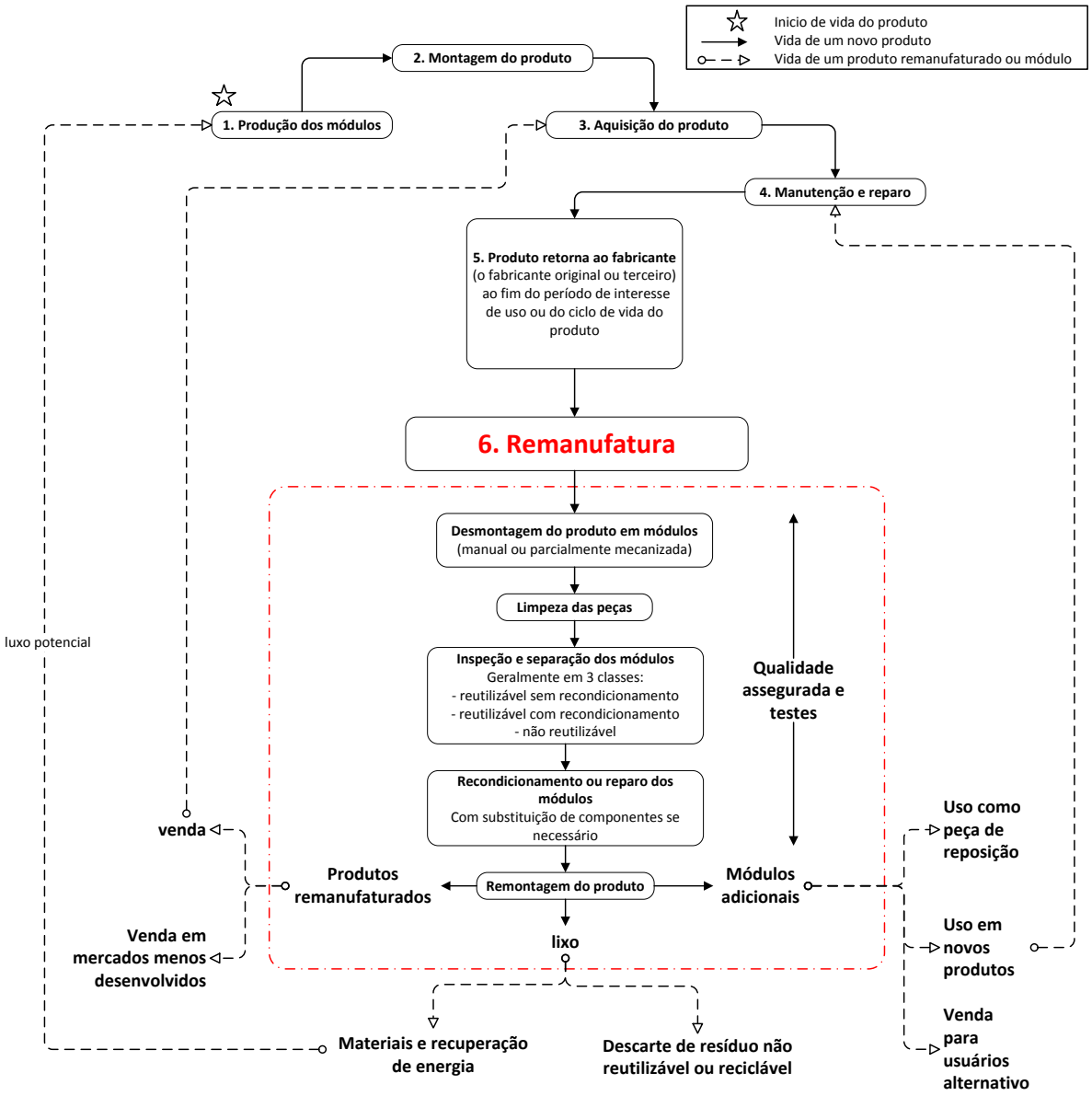


Figura 17 – Processo de Remanufatura.

Fonte: Adaptado de Kerr *et al.* (2001).

Conforme ilustrado na Figura 17, a Remanufatura como EFV pode ser vista como uma extensão ou etapa da EFV Reuso, combinada com a EFV Manutenção. Por fim, de modo a cumprir o propósito de selecionar um processo de Remanufatura tido como eficiente, é então adotado o processo do passo 6 nos moldes de Kerr *et al.* (2001) a fim de compor os passos que representarão as melhores práticas nas EFVs dentro dos cenários a serem desenhados.

2.3.4.5 Reciclagem

Neste momento, dada a reconhecida influência na eficiência da reciclagem, atribuída pelo processo de desmontagem, esta EFV é, por definição, dividida em dois processos caracterizados por com ou sem desmontagem, conforme descrito a seguir (OVERBY, 1979; ISHII, KOSUKE *et al.*, 1994; LUTTROPP, 1997; NILSSON, 1998).

2.3.4.5.1 Reciclagem com desmontagem

A reciclagem com desmontagem visa a recuperação de material puro e útil para aplicação em novos produtos. A desmontagem em frações de material aumenta o valor dos materiais reciclados por meio da remoção de contaminantes, materiais perigosos ou componentes compostos por materiais de alto valor. Nota-se que para este último, são ainda predominantemente separados por métodos manuais de desmontagem (OVERBY, 1979; ISHII, KOSUKE *et al.*, 1994; LUTTROPP, 1997; NILSSON, 1998).

A desmontagem do PFV requer mão de obra especializada, tempo e outros recursos que podem tornar a desmontagem economicamente inviável (KRIWET *et al.*, 1995). Segundo demonstrado por Ziout (2013) a desmontagem será eficiente e viável quando apresente, além da mão de obra especializada, as seguintes características:

i. Praticada em instalações especializadas e específicas (nível sistema);
ii. Planejamento da desmontagem (nível processo); e
iii. Produto projetado para desmontagem (nível projeto do produto).

Como na seção “2.3.4.2 Manutenção”, em subseção específica a Desmontagem já foi descrita e caracterizada quanto à revisão de literatura, neste ponto a pesquisa limita-se a recuperar um processo tido como eficiente para a Reciclagem que inclua a desmontagem.

Em um relatório realizado na Suécia, para uma típica e eficiente operação de reciclagem de PFVs com elevado grau de eletrônica, a Ragn-Sells Elektronikåtervinning (2000)

indica que a maioria das plantas de reciclagem ainda utilizam desmontagem manual e que uma grande variedade de ferramentas está envolvida no processo.

Por fim, para cumprir o propósito de selecionar um processo de reciclagem com desmontagem tido como eficiente, é então adotado o processo descrito na Figura 18.

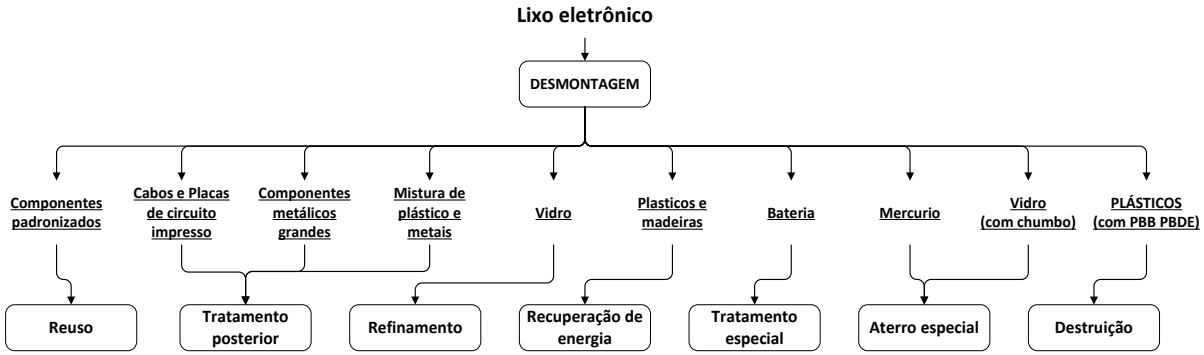


Figura 18 – Processo de desmontagem de PVF eletroeletrônico.

Fonte: Adaptado de Ragn-Sells Elektronikåtervinning (2000).

Entretanto é importante notar que a etapa de desmontagem com fins de reciclagem caracteriza-se, com a tecnologia corrente, altamente dependente do projeto do PFV. Ainda que a Reciclagem com desmontagem seja extremamente relevante, tamanha incerteza quanto à quantidade, tipo e natureza da infraestrutura necessárias pode vir a comprometer o cálculo de exergia para este subprocesso e assim, para o todo. Nesse momento da pesquisa imagina-se que a viabilidade deverá ser cuidadosamente reavaliada, conforme se verifique a robustez dos dados disponíveis para aplicação do cálculo por exergia.

2.3.4.5.2 Reciclagem sem desmontagem

A Reciclagem tradicional se caracteriza por um processo que denota recuperação material e, em alguns casos de energia, sem que seja conservada qualquer estrutura dos PFVs (OH *et al.*, 2006).

Para recuperação dos materiais se faz uso do processo de trituração ou moagem, o qual tem por objetivo reduzir o tamanho do material a fim de liberá-lo e facilitar sua classificação. O material triturado é posteriormente separado usando métodos baseados em diversos princípios físicos i.e. magnéticos, de densidade ou outras propriedades intrínsecas de cada material. (OVERBY, 1979; ISHII, KOSUKE *et al.*, 1994; LUTTROPP, 1997; NILSSON, 1998; CASTRO, M. *et al.*, 2007).

A moagem bem como demais processos se dão normalmente em instalações de reciclagem, englobando PFVs desde de resíduos de automóveis e outros materiais, incluindo bens de consumo duráveis (como eletrodomésticos) e outras sucatas de ferro e aço conforme (JODY, B. *et al.*, 2011).

Como resultado da variedade de PFVs de entrada no processo de moagem, o típico resíduo desse processo, doravante denominado resíduo de produto triturado (RPT), é composto tipicamente por uma mistura heterogênea de metais residuais ferrosos e não ferrosos (5-23%), plásticos (20-49%), borracha (3-38%), têxtil e material de fibra (4-45%), madeira (2-5 %), e vidro (2-18%) (GRANATA *et al.*, 2009; MORSELLI *et al.*, 2010). Sendo assim, os processos de separação que se seguem à moagem são igualmente variados em princípios de funcionamento e eficiência.

Em uma revisão bem estruturada Cui, Jirang *et al.* (2003) apresenta os principais processos praticados para a separação dos materiais posteriormente à moagem, listados a seguir em adição do processo triboelétrico nos moldes de Dodbiba *et al.* (2005):

i. **Triagem por peneiramento (*screening*):** Não é exclusivamente aplicada com o propósito de fornecer tamanho uniforme para determinado processo mecânico, mas também porque nos metais o tamanho das partículas, sua forma e propriedades são diferentes daquelas dos materiais plásticos e materiais cerâmicos. O principal método de triagem usa a tela rotativa ou tamboreamento, sendo amplamente utilizado em sucata de automóveis e processamento de resíduos sólidos urbanos. A

triagem vibratória também é comumente usada, em particular em locais de recuperação de metais não ferrosos, porém o *wire blinding*[10] é um problema recorrente e torna o processo ineficiente e pouco confiável (WILSON *et al.*, 1994);

ii. **Separação por forma (*shape separation*):** Seu principal propósito é controlar as partículas em pó dos processos industriais (FURUUCHI, M. *et al.*, 1988; FURUUCHI, MASAMI *et al.*, 1992). A forma de separação por placa inclinada e peneiras é o método mais utilizado na indústria de reciclagem (KOYANAKA *et al.*, 1997; GUNGOR *et al.*, 1998). Transportadores inclinados e placas vibratórias inclinadas foram usados como separadores de forma de partículas para recuperar cobre, a partir de resíduos de cabos elétricos (KOYANAKA *et al.*, 1997), sucatas de placas de circuito impresso (GUNGOR *et al.*, 1998), e resíduos de televisores e computadores pessoais no Japão (CUI, J. *et al.*, 2003);

iii. **Separadores magnéticos:** São comumente separadores de baixa intensidade conhecidos como corrente de *Eddy* ou simplesmente *Eddy*, sendo amplamente utilizados para a separação de metais ferromagnéticos de metais não-ferrosos e outros resíduos não magnéticos. Durante a última década, tem havido muitos avanços no projeto e operação de separadores magnéticos de alta intensidade, principalmente pela introdução de ímãs permanentes de ligas de terras raras, capazes de fornecer alta intensidade e maior eficiência. Segundo Harper (1992), o uso de separadores de alta intensidade torna possível separar uma série de ligas de cobre: Al bronze multicomposto; Mn bronze multicomposto (latão especial); Sn e Sn bronze multicomposto, Pb e Pb bronze multicomposto e bronze com baixo teor de Fe.

iv. **Separação eletrostática corona:** É uma técnica especialmente apropriada para partículas consideradas finas de tamanho entre 0,1 a 5 mm (HIGASHIYAMA *et al.*, 1998; MEIER-STAUDE *et al.*, 2000). É um processo usado extensivamente na mineração, com aplicações nos campos de reciclagem e recuperação de material porém em estágio embrionário (BOTSH *et al.*, 1997).

v. **Separação triboelétrica:** É composto por seis componentes: um alimentador, um ventilador, um ciclone (nomeado como tribo-ciclone), dois eletrodos, uma fonte de

[10] Dado que o processo se baseia no peneiramento de partículas através de uma tela, os fios da tela estão sujeitos a falhas que ocasionam a passagem desavisada de partículas de tamanho incorreto, assim denominado *wire blinding*. Suas principais causas são: fadiga, ruptura, deslocamento, desgaste e deformação do fio (WILSON *et al.*, 1994).

alimentação de corrente continua e caixas de coleta. O tribo-ciclone utiliza a força centrífuga para carregar eletricamente as partículas, devido à sua aceleração e fricção contra seu revestimento interior (superfície de carga) a qual é composta de um material plástico que está entre os materiais plásticos na mistura a ser separada. O campo eléctrico foi criado por dois eléctrodos usando Cu ligados à fonte. A separação foi efetuada utilizando alta voltagem, porém o consumo de energia total é muito baixo, porque a corrente foi limitada a alguns miliampères (DODBIBA *et al.*, 2005). É importante notar que esta técnica oferece inúmeras vantagens, sendo uma das mais eficientes para a separação de polímeros. Suas principais vantagens são a independência da forma das partículas, baixo consumo de energia, alta eficiência (STAHL *et al.*, 1996; HIGASHIYAMA *et al.*, 1998; MEIER-STAUDE *et al.*, 2000).

vi. **Separação por densidade:** É largamente utilizada na separação de metais e não metais (SCHUBERT, 1991). Baseia-se no princípio de que a intensidade da gravidade separa materiais de diferentes pesos específicos por seu movimento relativo, em resposta à força da gravidade combinada a uma ou mais forças. As forças atuantes além da gravidade e comumente em resistência ao movimento, assemelha-se a resistência oferecida para o escoamento de um fluido, tal como água ou ar (WILLS, 1988). É importante notar que a eficiência de tal processo é altamente dependente não só da densidade das partículas, mas também do tamanho e forma, de modo que processos prévios de controle de tamanho das partículas (i.e. triagem) são necessários;

vii. ***Jigging*:** é um método de separação baseado na diferença de densidade dos materiais em um fluxo vertical e oscilante de água e de direção variável. É um dos mais antigos métodos de concentrar por gravidade, sendo amplamente utilizado na indústria de mineração. Entre suas vantagens destacam-se a robustez, alta capacidade por unidade de superfície, baixos custos operacionais e adequação para processar grandes quantidades de partículas pequenas. Em exemplo, no tratamento de sucata triturada de automóveis de 4 a 16 mm, a fração não-ferrosa pode ser separada por *Jigging* (DE JONG *et al.*, 1997). Uma das aplicações mais comuns do *jigging* na indústria de reciclagem é a separação de triturados em "leves e pesados " (DERKS *et al.*, 1997). Entretanto a significativa heterogeneidade e alta complexidade dos PVF com eletrônica embarcada torna difícil operar um processo *jigging* e pode comprometer a separação (SCHUBERT, 1991).

Com um estudo centrado na eficiência da EFVs para a tratativa de *e-waste*, Balkenende *et al.* (2015) listam aspectos presentes no projeto dos PFVs e altamente impactantes na eficiência dos processos de reciclagem sem desmontagem. São eles:

Quanto aos materiais:

i. Evitar uso de revestimentos;
ii. Limitar o uso de diferentes materiais;
iii. Uso exclusivo de materiais recicláveis; e
iv. Usar preferencialmente materiais puros.

Quanto aos componentes eletrônicos: Fácil e rápida detecção de materiais.

Quanto às conexões:

i. Separação por moagem para partes de materiais uniformes; e
ii. Separação moagem para partes de tamanho relativamente grandes (> 1cm).

Devido à complexidade dos resíduos de moagem, a recuperação de materiais recicláveis em uma única etapa não se mostra um processo prático. Portanto, a pré-concentração dos materiais previamente a certos processos de separação (acima citados) é necessária (JODY, B. *et al.*, 2011). Dessa forma, com base na literatura encontrada e a fim de cumprir o propósito de selecionar um processo de Reciclagem sem desmontagem e tido como eficiente, é então adotado o processo descrito na Figura 19 incluindo suas sub-etapas.

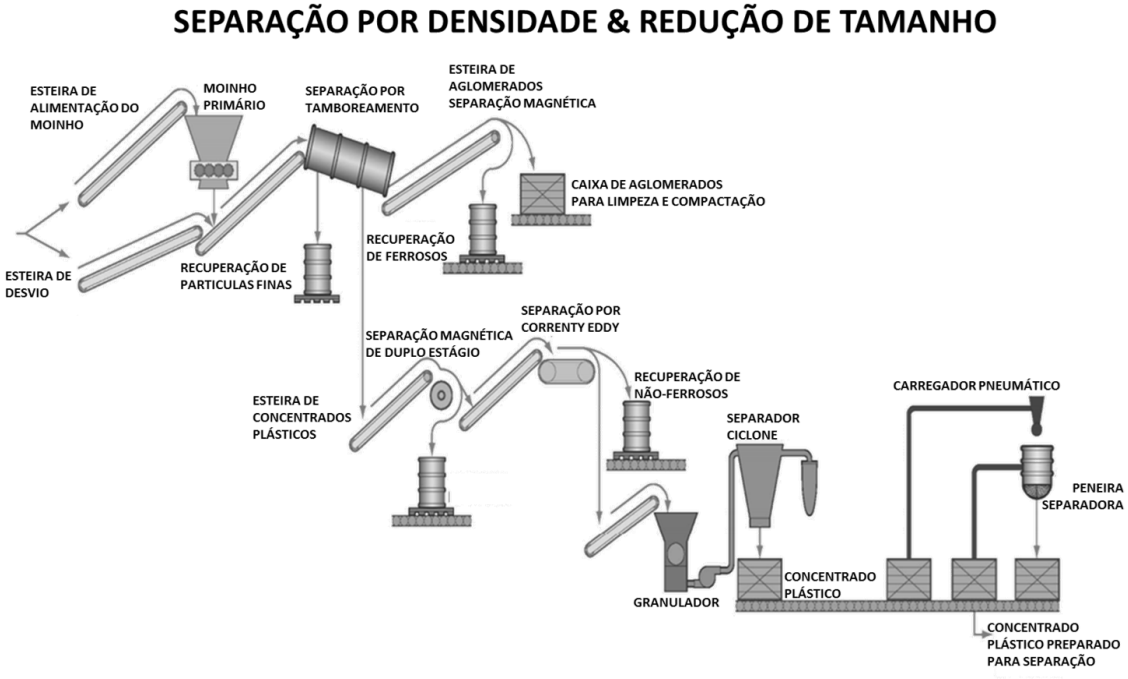


Figura 19 – Principais operações da unidade de separação mecânica da *Argonne*®.
Fonte: Adaptado de Jody, B. et al (2011).

2.3.4.6 Descarte

É a destinação do produto para aterro ou incineração, sendo que esta última pode se dar com ou sem recuperação de energia (OVERBY, 1979; ISHII, KOSUKE *et al.*, 1994; LUTTROPP, 1997; NILSSON, 1998; ROSE, C. M. *et al.*, 2001).

Neste ponto da pesquisa já é possível observar que, segundo a tecnologia corrente, para nenhum dos processos das EFVs anteriormente descritas declarou-se atingir 100% de eficiência em termos de separação completa e recuperação de materiais. Portanto, neste estágio, mesmo que EFVs anteriores já tenham sido praticadas, implica dizer que ainda existem resíduos, caracterizados por uma dada mistura de materiais, oriundos dos diferentes PFVs, sobretudo dos processos de moagem e separação durante a reciclagem.

A tratativa desse resíduo é complexa porque este resíduo é muito heterogêneo e instável. Isso se dá devido à variação dos diferentes tipos de materiais de entrada tais como partes de automóveis e produtos de linha branca, segundo sejam triturados em diferentes proporções e tipos (MIRABILE *et al.*, 2002).

Em um estudo centrado na recuperação de veículos em fim de vida, Nourreddine (2007) usa o termo *fluff* para denominar tal resíduo. Ainda que variado, a partir de uma operação padronizada de trituração no Canadá, a partir de diversos PFVs como eletrodomésticos e eletrônicos, sua composição típica foi fisicamente caracterizada por uma densidade de 405 kg/m³, contendo 6% de umidade, 18% do resíduo é de partículas médias (> 25,5 mm), 37% de partículas finas (<2 mm) e valor calorífico de 11,8 MJ / kg.

A fim de compreender que tratativas e processos serão aplicados a este resíduo na EFV Descarte, é também importante identifica-lo em termos de composição material. Dessa forma, o *fluff* é materialmente caracterizado segundo a Figura 20.

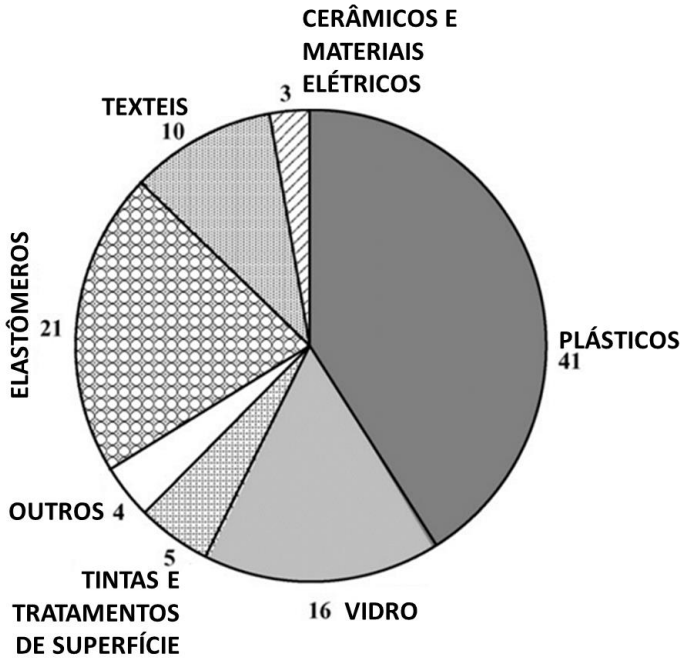


Figura 20 – Composição material do *fluff*.

Fonte: Adaptado de Mirabile *et al.* (2002).

Mesmo que nesse estágio o maior volume de metais já tenha sido extraído, o resíduo *fluff* ainda contém traços de metais pesados tais como: zinco, chumbo e cobre, onde os mais frequentes são Zn e Cu, com um teor de 1%. Os resíduos de Pb são de 0,25% e menores que 0,05% para Cd e Cr (NOURREDDINE, 2007). De acordo com o protocolo de Quebec, verificou-se que o zinco é o mais lixiviável[11] com cerca de 250 mg/l. Cd, Cu e Cr estão a menos

[11] Lixiviação é a solubilização de constituintes químicos pela ação de um fluido, comumente a chuva (WIKIPEDIA, 2016d).

de 1 mg/l. No entanto, o chumbo é um problema potencial com a concentração média de 7,0 mg/l, excedendo o limite superior estabelecido em 5 mg/l. Em termos ambientais, ainda que análises de lixiviação e toxicológicas mostrem que o *fluff* possui baixa toxicidade e fraca propensão à mutação, a presença de metais pesados representa um entre vários problemas potenciais (DAY *et al.*, 1993).

Do ponto de vista da sua manipulação, o resíduo *fluff* é leve e volumoso com riscos à queima por ignição espontânea. Diversas restrições legais impõem a necessidade de se evitar o aterro, de estimular a reciclagem de materiais e recuperação de energia, de forma a desenvolver vias adicionais de recuperação pós-moagem, notando que ainda hoje, essas novas tecnologias sejam raramente aplicadas em escala industrial (LASSESSON, 2008; UJSAGHY, 2008; VIEITEZ *et al.*, 2011).

Dessa forma, de acordo com a rota que se adote no tratamento do resíduo *fluff*, uma determinada sequência de processos e propósitos serão então aplicados, segundo ilustra a Figura 21.

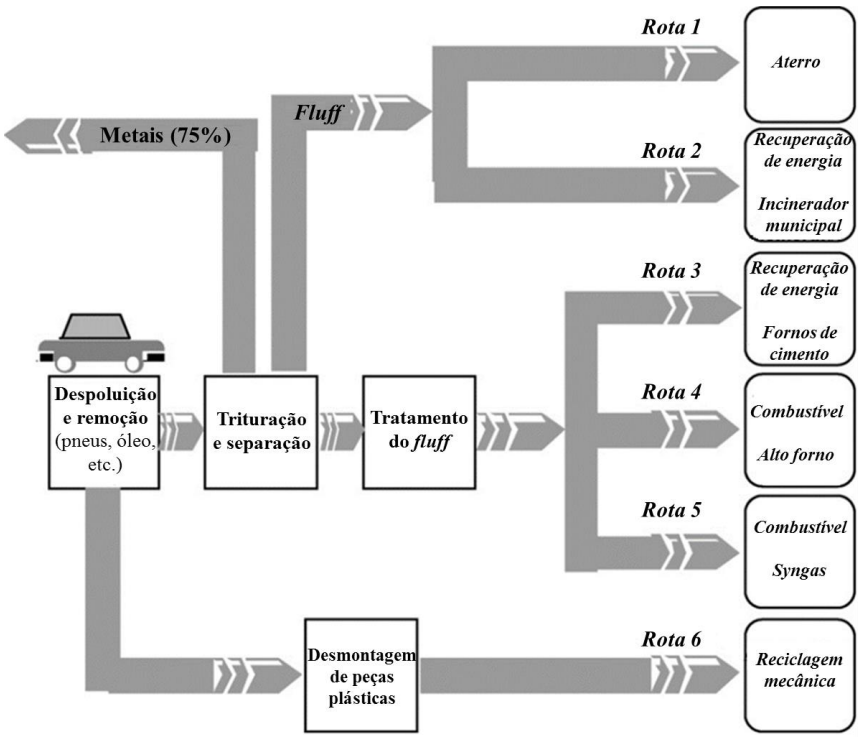


Figura 21 – Rotas de tratativa dos *fluff*.

Fonte: Adaptado de Nourreddine (2007).

Segundo a Figura 21, as tratativas e processos anteriores (i.e. trituração e desmontagem) assim como neste trabalho, já foram realizadas, restando portanto empregar as

rotas sugeridas às classificações das EFVs identificadas previamente. Para tal, esta seção será a seguir dividida em descarte com e sem recuperação de energia, de modo que as respectivas rotas e processos de tratamento do resíduo *fluff* sejam demonstradas.

2.3.4.6.1 Incineração com recuperação de energia

A décadas se sabe que a queima do resíduo *fluff* em aterros deve ser evitada, dado que os contaminantes liberados são altamente poluentes (RYAN *et al.*, 1993).

Em contrapartida, plantas de recuperação de energia compostas por incineradores modernos são capazes de funcionar continuamente com apenas uma ou duas paradas anualmente e programadas, resultando em uma disponibilidade de até 92%. Sabe-se que com uma recuperação de calor orientada ao aumento da temperatura do vapor em cerca de 4 Mpa, já se torna possível gerar energia elétrica com uma eficiência de conversão de calor-potência de 15 a 24%. Tais características levariam a crer, à primeira vista, que a incineração do *fluff* diretamente em tais plantas, apresenta vantagens óbvias, entretanto, tal incineração não é recomendada por ambos os fatores, técnicos e ambientais. Devido às características de fusão de alto poder calorífico, esse resíduo queima de forma demasiadamente rápida, levando a uma combustão incontrolável e com isso à falta de oxigênio, à aglomeração de resíduos da queima, e à passagem de resíduos leves não queimados (BUEKENS *et al.*, 2014a).

Como solução, praticam-se processos em que sua mistura com outros combustíveis ou mesmo outros resíduos de poder calorífico inferior, acabam por facilitar a incineração e melhorar a eficiência em plantas de incineração com recuperação de energia. Dessa forma, a coincineração pode ser realizada em uma ampla gama de incineradores tais como: fornos mecânicos à grelha, de leito fluidizado e câmaras vortex de combustão, fornos rotativos e fornos de cimento. Tal solução é comumente denominada “solução por diluição”, pelos operadores de incineradores de resíduos perigosos devidamente licenciados (BUEKENS *et al.*, 2014a).

Dessa forma, a fim de cumprir o propósito de selecionar um processo de incineração tido como eficiente, deverá ser adotado um dos processos propostos por Nourreddine (2007), uma vez que a incineração com recuperação de energia se dá de forma eficiente no tratamento do *fluff*, para os processos de alto-forno e em fornos de cimento, segundo já apontado na Figura 21 e descritos a seguir.

i. **Incineração em alto-forno:** Tal processo já deu provas de que pode ser ecológica e economicamente viável para reciclar materiais residuais beneficiados com adequado potencial energético. Nele o *fluff* é injetado em um alto-forno como um redutor auxiliar (BUEKENS *et al.*, 2014a). Segundo experimentos, revela-se que as condições necessárias em termos atmosféricos e de temperatura, caracterizam o processo, mesmo com a adição do *fluff* como de alto-forno normal, além de permitir a destruição completa de compostos orgânicos e evitar a formação de dioxinas. (LUENGEN *et al.*, 2003). Em um estudo que revisa e verifica as diferentes configurações desse processo, Nourreddine *et al.* (2007) demonstraram que a injeção do *fuff*, predominantemente composto por materiais poliméricos (plásticos), revela-se tecnicamente viável e financeiramente rentável. Resíduos foram testados quanto à sua adequação como agentes redutores em altos-fornos, em substituição ao carvão ou óleo, notando ainda que este resíduo se assemelha aos agentes redutores aplicados em indústrias metalúrgicas. Por fim, aponta que empresas como a *Stahlwerke Bremen* na Alemanha e NKK (*Nippon Kokan Kabushiki Kaisha*) no Japão, adotam com sucesso tal processo, minimizando as emissões de CO2, NOx e SOx além de economizar cerca de 40% em energia.

ii. **Incineração em fornos de cimento:** A fabricação de cimento é de consumo intensivo de energia, com os custos de energia de até 50% dos custos de produção. Em certas usinas a substituição de combustíveis fósseis por resíduos chega a 80% e assim, os benefícios econômicos tornam-se óbvios (BOUGHTON, 2007; AL-SALEM *et al.*, 2010). Entretanto, certos estudos revelam que a prática de taxas superiores a 50% têm efeito negativo na qualidade do produto além de elevar custos de manutenção (GENDEBIEN *et al.*, 2003). Ainda assim, sua prática é largamente adotada e somente na Europa, a indústria de cimento tornou-se o maior consumidor de combustíveis secundários de resíduos industriais, com mais de 100 fornos de coincineração de diferentes tipos e quantidades (GENDEBIEN *et al.*, 2003; GENON *et al.*, 2008). Um forno de cimento é um forno rotativo, com um comprimento de até 200m. O fluxo de entrada dos sólidos flui em sentido contrário ao dos gases de combustão. O longo comprimento do forno assegura um tempo de permanência suficiente dos gases de incineração a altas temperaturas, sendo tipicamente alcançados cerca de 8s a temperaturas acima de 1200 ◦C (MURRAY *et*

al., 2008; AL-SALEM *et al.*, 2010). Entretanto, é importante notar que esta opção como EFV é regulada por regulamentações específicas i.e. diretivas da UE, onde 10% é a percentagem máxima de *fluff* a ser usado para recuperação de energia.

2.3.4.6.2 Incineração sem recuperação de energia

Após a análise de 82 estudos centrados no gerenciamento de EFVs, em sua maioria ACVs, Morris *et al.* (2013) identificam que o processo de incineração sem recuperação de energia é frequentemente referenciado apenas com o termo "incineração". Tal pratica se dá comumente em instalações denominadas incineradores municipais de lixo sólido (SEYLER *et al.*, 2005).

De forma geral, há mais instalações que produzem pouco ou nenhum calor do que existem plantas que produzem pouca ou nenhuma eletricidade, uma vez que seu objetivo não é a recuperação de energia que em sua maioria é reaproveitada e consumida em processos internos (BUWAL, 2001; DOKA, 2007). Na Figura 22 é então caracterizada a tecnologia adotada para fins desse estudo, notando que os números sobre os caminhões dão o peso aproximado dos resíduos sólidos de saída.

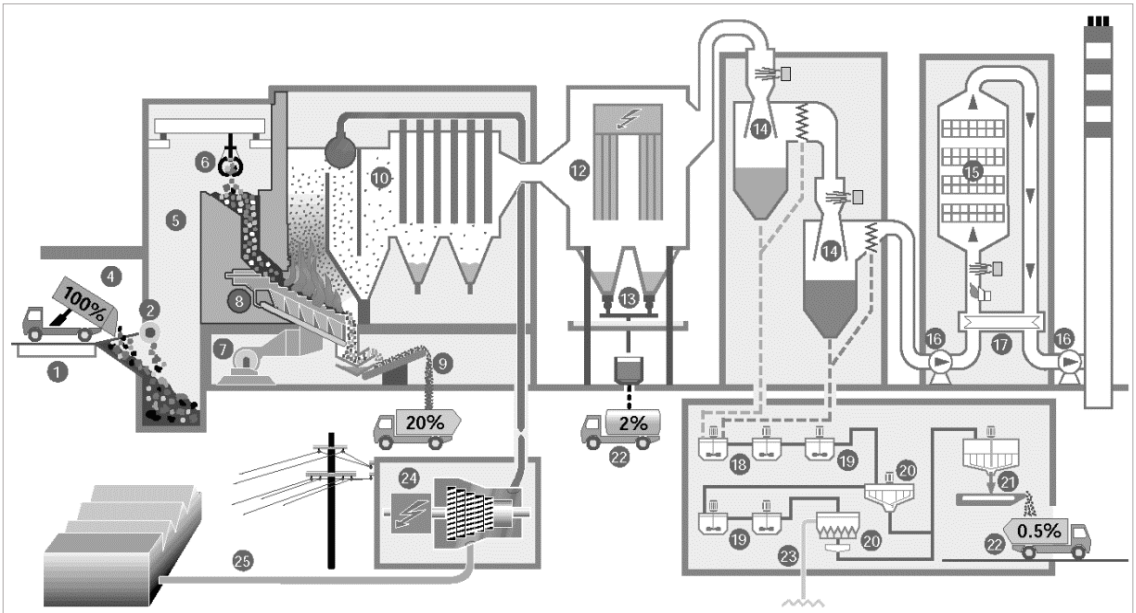


Figura 22 – Típico incinerador de resíduos sólidos na Suíça.

Fonte: Adaptado de Doka (2007).

2.3.4.7 Aterro

Na ausência de soluções melhores ou acessíveis, o descarte por meio de aterro tem sido a via de eliminação tradicional para o descarte de inúmeros resíduos da incineração, inclusive o *fluff* (RYAN *et al.*, 1993; TOJO *et al.*, 2011).

Aterros sanitários são projetados para conter vários resíduos, no entanto, existe uma tendência de que tal prática se torne de custo proibitivo ou seja banida, como já acontece em algumas partes do mundo; i.e. no estado da Califórnia nos Estados Unidos da América. Muitas vezes, uma análise do potencial para a lixiviação é exigida para avaliar a aceitabilidade de resíduos em aterros. Nesse contexto, subprocessos com custos adicionais acabam sendo impostos como: a adição e mistura com carbonato de cálcio (CaCO3) a fim de diminuir a

lixiviação para águas subterrâneas, ou o processo de lavagem, na obtenção da qualidade de armazenamento final necessária a fim de evitar a recusa pelo aterro sanitário; neste último i.e., dado ao teor excessivo de bisfenilpoliclorado (RYAN *et al.*, 1993; SANDOVAL, 2009). Sendo assim, a EFV aterro, quando considerada deve levar em conta estes processos.

É digno de nota que Morris *et al.* (2013) tenham destacado que a EFV aterro, também possui uma categoria que, no contexto de resíduos orgânicos, permite a recuperação de energia pela sua decomposição e geração de gás metano, entretanto, no contexto dos resíduos de PFV, dada sua composição típica (*fluff*) conforme apontado por Mirabile *et al.*(2002) na Figura 20, fica claro que tal tratativa possui baixo ou nenhum potencial de aplicação na tratativa no universo de materiais predominantemente usados nos PFVs.

2.3.5 Síntese da revisão bibliométrica sobre PRs e EFVs

A revisão faz cinco importantes contribuições. Primeiramente quando identifica as EFVs e confirma sua priorização geralmente aceita pela comunidade científica como Reuso, Manutenção, Remanufatura, Reciclagem e Descarte, onde Reuso é a mais indicada e Descarte a menos indicada.

Em segundo, quando identifica quais são os PRs que, uma vez executados, levam à caracterização de adoção e aplicação de uma dada EFV. Nesse sentido, revela-se que as EFVs Manutenção e Remanufatura na verdade se caracterizam como PRs que levam a EFV Reuso.

Em terceiro, quando revela que a EFV Reciclagem se dá pelo processo de desmontagem. O processo de desmontagem, por sua vez, pode ser de natureza não destrutiva, onde características funcionais de componentes são mantidas ou destrutiva, também conhecida como moagem onde os PFV são fragmentação em partes menores que visem a recuperação de materiais. A desmontagem não destrutiva tem dois objetivos principais: (i) A desmontagem cuidadosa de um dado componente extraído em condições apropriadas, objetivando e viabilizando a EFV reuso; ou (ii) a separação de materiais por classes, previamente ao processo de moagem, de forma a obter materiais separado com maior grau de pureza, ou seja, menor contaminação.

Em quarto, a EFV Descarte se realiza pelos PRs de Aterro e Incineração. Adicionalmente revela-se que a incineração se caracteriza por ser com ou sem recuperação de energia, notando que a energia recuperada pode ser de natureza elétrica, térmica ou ambas.

Por fim, a EFV Aterro caracteriza-se por processos de analise, classificação e eventualmente de tratamento prévio buscando neutralizar os resíduos previamente ao aterro.

3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

O presente capítulo apresenta considerações sobre o delineamento das características de pesquisa bem como dos procedimentos a serem adotados, das atividades a realizar e dos resultados esperados a fim de atingir o propósito principal da pesquisa.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa é considerada do tipo aplicado, pois gera conhecimentos para aplicação prática dirigida à solução de problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais (GIL, 2010).

Segundo Gil (2010), quanto à abordagem do problema, a pesquisa é qualitativa, uma vez que a revisão da literatura e dos métodos capta as informações qualitativas dos autores e o resultado dessa etapa é de caráter descritivo, feito por meio de análise indutiva dos dados. No que diz respeito aos objetivos, a pesquisa é do tipo exploratória, buscando estudar uma abordagem que até agora não foi estudada com o objetivo proposto na comunidade acadêmica e industrial, tendo como resultado, dados que suportam a seleção e adoção de métodos de reciclagem e EFV por meio de critérios de eficiência energética, além de estimular a formação de novas hipóteses e oportunidades de pesquisas.

Por fim, em relação aos procedimentos técnicos, as duas pesquisas realizadas são do tipo bibliográfica, e neste trabalho elaboradas a partir de material já publicado, constituído principalmente de artigos de periódicos, livros, dissertações ou teses, bases de dados e, por fim, com material disponibilizado na Internet, buscando auxiliar nas etapas iniciais do desenvolvimento do estudo (GIL, 2010).

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia utilizada na pesquisa é baseada na metodologia *Design Science Research* (DSR) nos moldes sugeridos por Peffers *et al.* (2007). A ciência natural busca entendimento e explicação para fenômenos, enquanto a metodologia DSR preocupa-se em desenvolver os caminhos para alcançar objetivos e, nesse sentido, a pesquisa é prescritiva pois objetiva melhorar o desempenho de processos artificiais (eficiência energética nos processos de reciclagem) e para tal, busca desenvolver artefatos que permitam atingir tais objetivos (MARCH *et al.*, 1995). Segundo Kroll; Kruchten (2003), um artefato consiste em uma parte de informação gerada, alterada ou usada em um processo. Tais artefatos podem assumir quatro tipos diferentes de formatos (MARCH *et al.*, 1995):

a) Construções: consistem em linguagens ou conceitos básicos para caracterizar um fenômeno;
b) Modelos: descrevem situações, atividades e seu fluxo de trabalho;
c) Métodos: caminhos que devem ser seguidos para buscar os objetivos; e
d) Implementações: aplicações físicas para realizar determinadas atividades.

Dessa forma, o artefato proposto neste trabalho consiste em um método, entretanto composto por várias partes identificadas nos processos de reciclagem, nas EFV e na aplicação do conceito de exergia.

De acordo com Goes (2014), o objetivo da metodologia DSR não é testar ou criar novas teorias, mas criar conhecimento por meio de soluções significativas e validadas por meio de provas de conceito, uso e valor, além de comunicar os resultados ao público adequado. Sendo assim, o método proposto neste trabalho utilizará como prova de conceito (i.e. objeto de demonstração) um exemplo teórico de problema, relacionado a um produto em fim de vida. Uma vez conhecidos os requisitos da abordagem por exergia para fins de mensuração da eficiência energética, cada um dos processos identificados tem sua eficiência calculada por meio da abordagem proposta, sendo posteriormente organizados e tabulados de forma identificar processos mais eficientes e propor um cenário de reciclagem hipoteticamente ideal do ponto de vista da eficiência energética.

3.3 PLANEJAMENTO DOS TRABALHOS

Nesta seção são descritos o planejamento, as fronteiras e a gestão do projeto de pesquisa, de forma tal que sejam relacionadas as atividades da DSR a cada objetivo específico. Como consequências, os recursos foram estimados, um cronograma geral foi diagramado e entregas foram pré-estabelecidas para assegurar o tratamento dos riscos e a qualidade dos resultados.

3.3.1 Definição do escopo

O escopo do trabalho consiste em responder as questões de pesquisa levantadas (seção1.2.1) e satisfazer os objetivos específicos (seção 1.2.2), por meio de cenários extraídos e adaptados da literatura existente, seguindo o procedimento metodológico DSR proposto.

Nos moldes da DSR e sendo a entrega deste trabalho a proposta de um método, cabe estabelecer, desde já, critérios que serão perseguidas ao longo da construção do artefato a fim de certificar de que a pesquisa está no sentido dos objetivos propostos e por fim, uma vez avaliados os resultados, permitirão validar a solução (LACERDA *et al.*, 2013). Portanto, os critérios são demonstrados no Quadro 11.

Forma de avaliação	**Método**	**Métrica ou Critério**	**Base lógica**
Experimental	Simulação: Executar o artefato com dados reais ou artificiais	Usabilidade	- Comparação - Validação - Minimalismo - Utilidade - Eficácia (bom para) - Eficiência (rapidez)
Analítico	Demonstrar as propriedades ótimas inerentes ao artefato	Desempenho	- Precisão - Representação da realidade - Flexibilidade

Quadro 11 – Métodos para avaliação dos artefatos.

Fonte: Adaptado de Von Alan *et al.* (2004 p. 86).

É importante notar que, mesmo tendo a abordagem de exergia aplicações diretas relacionadas aos custos oriundos da eficiência, ou falta dessa, nos processos industriais, inclusive na reciclagem, a presente pesquisa reconhece, porém não objetiva expressar em termos monetários, os resultados encontrados.

Por fim, não foram encontrados dados de exergia que representassem os esforços para a limpeza e inspeção, mas apenas a mão de obra e infraestrutura predial envolvidas.

No que diz respeito à EFV Reuso, notam-se duas limitações. Da mesma forma, não foram encontrados dados de exergia sobre esforços para a operação de reparo dentro da EFV Reuso e portanto, o estudo aqui realizado representa um ganho considerado relativamente maior que o real. Isso se dá pois uma vez que a operação de reparo não pode ser quantificada, assume-se que 100% dos módulos escolhidos para reuso estão em condições. Entretanto, analogamente a outras operações manuais (i.e. desmontagem manual) pode-se esperar que as diferenças não sejam tamanhas que comprometam os resultados encontrados ou a validade do método.

3.3.2 Atividades de pesquisa

As atividades de investigação em DSR consistem em construir e avaliar. Construir refere-se à construção do artefato, o que demonstra que um tal artefato pode ser construído, enquanto avaliar, se refere ao desenvolvimento de critérios e avaliação do desempenho do artefato contra tais critérios (MARCH *et al.*, 1995). A fim de realizar tais atividades, Peffers *et al.* (2007) propõem as seguintes etapas para tal metodologia:

i. Identificação do problema e motivação da pesquisa;
ii. Definição dos objetivos da solução;
iii. Realização do projeto e desenvolvimento da solução;
iv. Demonstração da solução;
v. Avaliação da solução; e
vi. Comunicação dos resultados.

Com base na proposta de Peffers *et al.* (2007), a fim de responder as questões e satisfazer de forma tangível aos objetivos do trabalho (seções 1.2.1 e 1.2.2), são então pré-

estabelecidos no Quadro 12, apresenta uma relação entre atividades que compõem o procedimento metodológico, os objetivos específicos e as entregas previstas para a pesquisa e, adicionalmente, um guia ao leitor das seções onde podem ser encontradas.

Fases	Objetivos específicos	Etapas DSR Peffers *et al.* (2007)	Atividades	Entregas	Ferramentas ou dados necessários
Projeto de pesquisa	**O1.** Resgatar metodologia para a abordagem por exergia, descrevendo as inter-relações e relevâncias para com a sustentabilidade e eficiência nos processos de reciclagem;	i. Identificar problema e motivação da pesquisa;	**A1.** Revisar bibliografia e redigir o projeto de dissertação;	Projeto de Dissertação (Seção 1.1).	-
		ii. Definir os objetivos da solução	**A2.** Revisar bibliografia com mapeamento de oportunidades;	Hipóteses e objetivos de pesquisa no projeto de dissertação (Seção 1.1.2).	Método de revisão da literatura do tipo bibliográfico.
	O2. Conhecer e selecionar as PRs praticados ao longo das EFVs e tidos como eficientes;	iii. Projeto e desenvolvimento da solução;	**A3.** Realizar revisão bibliométrica visando conhecer e selecionar os processos de EFVs e PRs relevantes ao contexto da análise por exergia;	Seção que resgate, descreva e selecione os PRs nas EFVs tidos como eficientes e passiveis de análise por exergia. (Seção 2.3)	Método de revisão da literatura do tipo bibliométrico.
Pesquisa	**O3.** Identificar fontes de dados de exergia presentes nas EFVs e PRs;	iii. Projeto e desenvolvimento da solução;	**A4.** Identificar ferramentas para o desenvolvimento do método.	Seção com uma coletânea das ferramentas aplicadas ao método contendo a base de dados exergéticos, ferramentas de cálculo e ferramenta de apoio à decisão (Seção 4.2).	- Base de dados ECO-INVENT (2016); - Ferramenta de cálculo SIMAPRO (2016); e - Processo Analítico de Hierarquia (AHP)
	O4. Definir cenários relevantes que incluam EFVs e PRs;	iii. Projeto e desenvolvimento da solução;	**A5.** Definir os cenários de análise.	Seção que descreve e justifica os cenários a compor o método. (Seção 4.3.1)	- Atividade **A3** (Seção 2.3).
	O5. Demonstrar a solução resultante do método proposto; e	iv. Demonstração da solução;	**A6.** Definir o método.	Seção que apresenta e descreve o método proposto (Seção 4.3.2).	-
	O6. Avaliar e validar o método proposto.	v. Avaliação da solução;	**A7.** Definir produto de referência; **A8.** Aplicar o método proposto; e **A9.** Avaliar o método.	Seção que justifica o PFV adotado, aplica e avalia o método. (Seção 4.4)	- Atividade **A5**; - Base de dados ECO-INVENT (2016); - Ferramenta de cálculo SIMAPRO (2016); e - Processo Analítico de Hierarquia (AHP).
	O7. -	vi. Comunicação dos resultados.	Esta última etapa da metodologia DSR não faz parte do escopo deste trabalho.	Tal comunicação refere-se a publicações científicas sobre a pesquisa e portanto, sucede a execução deste.	-

Quadro 12 – Relação entre metodologia DSR, objetivos específicos, atividades e entregas.

Fonte: Autoria própria.

A partir deste ponto a pesquisa encontra-se delineada em termos de objetivos, metodologia cientifica, entregas, ferramentas e dados necessários e, dessa forma, os capítulos seguintes passam a realizar as entregas predeterminadas ao longo do desenvolvimento do trabalho até este ponto.

4 RESULTADOS DA DSR NA CONSTRUÇÃO DO MÉTODO

Este capítulo é subdividido em seções que correspondem, uma a uma, às atividades descritas no Quadro 12, de forma a evidenciar os resultados na forma de entregas previstas segundo a metodologia DSR, buscando então atingir a cada objetivo específico e construir o método de avaliação por abordagem de exergia.

4.1 ATIVIDADES 1, 2 E 3 DA METODOLOGIA DSR

Os trabalhos realizados a fim de atingir ao objetivo específico "O1. Resgatar metodologia para a abordagem por exergia, descrevendo as inter-relações e relevâncias para com a sustentabilidade e eficiência nos processos de reciclagem;" foram desenvolvidas preliminarmente, ainda na fase de projeto de pesquisa, já apresentadas nesse documento na Seção 1.1 e Capítulo 2, sendo a seguir, apresentadas em síntese e nos moldes da metodologia DSR, apenas para fins de evidencia-las.

4.1.1 Pesquisa bibliográfica sobre o conceito de exergia

Em síntese a pesquisa bibliográfica inicial sobre exergia e reciclagem contribuiu para:

i. Resgatar publicações sobre o histórico e a situação atual da pesquisa relacionada;
ii. Conhecer sobre os conceitos fundamentais a respeito do assunto e das inter-relações entre sustentabilidade, exergia e reciclagem;
iii. Identificar na literatura publicada as temáticas menos exploradas e eventuais lacunas e oportunidades a respeito do tema pesquisado.

4.1.2 Identificar problema e motivação da pesquisa e definir os objetivos

Nos moldes da DSR na proposta de Peffers *et al.* (2007), foram relacionadas e realizadas as seguintes entregas:

i. Problematização, hipóteses e objetivos de pesquisa, registrados no projeto de pesquisa e neste documento apresentadas nas seções 1.2 e 1.3;
ii. Projeto de dissertação; e
iii. Artigo de revisão bibliográfica publicado em congresso científico internacional contendo o portfólio de artigos relevantes.

4.1.3 Pesquisa bibliométrica sobre EFVs e PRs

Em síntese a pesquisa bibliométrica sobre EFVs e PRs contribuiu para:

i. Resgatar publicações sobre o histórico e a situação atual das EFVs e PRs, representando o estado da arte expressa em termos de eficiência energética ou de recuperação de materiais;
ii. Conhecer sobre os conceitos fundamentais envolvendo EFVs, PRs e suas interações quando visada a eficiência na reciclagem; e
iii. Compor a lista básica de PRs adotados para a construção dos cenários de análise.

4.2 (ATIVIDADE 4) IDENTIFICAR FERRAMENTAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

Nos moldes da DSR, esta seção visa justificar a escolha das ferramentas para o desenvolvimento do artefato, explicitar seus componentes as relações causais que geram o efeito desejado para que o artefato realize seus objetivos. Sendo assim, a seguir serão descritos

as fontes de dados e os caminhos que levaram à sua seleção. Em seguida, os fluxos de exergia serão relacionados com os PRs e como se pretende utilizá-los.

4.2.1 Fontes de dados de exergia

O cálculo pelo método de exergia mostra-se especialmente desafiador pela diversidade e amplitude do dados necessários, sobretudo quando proposto a avaliar EFVs, seus diversos PRs e aspectos de sustentabilidade (BÖSCH *et al.*, 2006; DEWULF, J. *et al.*, 2007; IGNATENKO *et al.*, 2007; DEWULF, JO *et al.*, 2008). Ha quase uma década Ignatenko *et al.* (2007), em um estudo centrado na análise da reciclagem por abordagem de exergia, já alertava para a indisponibilidade de dados robustos e às limitações a que se expõe os resultados de uma dada pesquisa diante da necessidade de suposições. Buscando resolver esta lacuna, vários autores reconhecem as dificuldades e o esforço necessários no levantamento de tais dados e assim, advogam a favor da inclusão de dados para cálculo de exergia em extensas, maduras e já consolidadas bases de dados de ACV (ROSE, C. M. *et al.*, 2001; BÖSCH *et al.*, 2006; DEWULF, J. *et al.*, 2007; FRISCHKNECHT *et al.*, 2007; HAMUT *et al.*, 2014; BALKENENDE *et al.*, 2015).

Em busca de solução o trabalho de Bösch *et al.* (2006) destaca-se por se alinhar aos propósitos desse trabalho, uma vez que tem por objetivo disponibilizar os dados de exergia não somente para pesquisas em ACV, mas também para as comunidades de pesquisa fora desse quadro escopo. Tal trabalho se realiza ao fazer uso do grande corpo de dados do Inventário da ACV (ICV), uma vez que dados de exergia não estão tão prontamente disponíveis como dados de ACV (BÖSCH *et al.*, 2006).

Portanto, decide-se por lançar mão de uma base de dados de ACV ou de seu inventário (ICV), que contenha os dados necessários à abordagem por exergia nos processos revelados pela análise bibliométrica como relevantes às EFVs. Assim sendo, resta definir qual base de dados será adotada, uma vez que inúmeras bases já foram ou vêm sendo desenvolvidas, i.e. ECOINVENT (2016), EMERGY (2016) e NREL (2016). Uma grande diversidade de bases e iniciativas são encontradas e detalhadas nos trabalhos de Van Hoof *et al.*(2001) e Norris *et al.* (2002) incluindo listagens e descrição das diversas bases disponíveis.

No entanto, segundo resultados de alguns estudos de caso, é possível perceber que certos bancos de dados apresentam divergências entre si, bem como quando comparados com simuladores, i.e. no contexto químico-industrial (JIMÉNEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2000; VILLALBA *et al.*, 2006). Dessa forma, tais divergências podem limitar o uso desses dados e faz-se necessária cautela e critério em sua escolha (RUIZ-MERCADO *et al.*, 2014).

Nesse sentido, a fim de elaborar critérios de qualidade para a seleção da base de dados, são encontradas normas internacionais i.e. ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006), elaboradas buscando assegurar robustez dos dados e confiabilidade aos resultados obtidos. Ao se prosseguir pela busca de bases de dados que contenham não somente dados de exergia, mas também os critérios definidos nas normas, destaque-se a base de dados do ECOINVENT (2016). No que tange à tratativa e qualidade dos dados, sua documentação contempla uma estruturada metodologia que em muito se assemelha ao processo de validação da produção cientifica. Tal metodologia evidencia diversos critérios que visam atender às normas e, em certos casos, vão além destas. Dessa forma o referido documento declara (WEIDEMA *et al.*, 2013):

> Para lidar com o aumento do número de conjuntos de dados (*datasets*[12]), e o resultante aumento da demanda por controle de qualidade e avaliação, um conselho editorial foi estabelecido. Ele é composto por mais de 50 editores, todos especialistas em suas áreas. Cada editor abrange uma área de atividade econômica (i.e. agricultura, mineração, produção de produtos químicos, etc.), uma região geográfica específica, um tipo específico de emissões ou critérios específicos do banco de dados tais como a incerteza, a fim de garantir a comunicação coerente nos conjuntos de dados em diferentes atividades industriais. Cada conjunto de dados passa por pelo menos 3 editores, onde pelo menos um para a atividade econômica e pelo menos dois editores transversais. As funções de administrador de banco de dados como presidente do conselho editorial, resulta em um painel de revisão crítica de acordo com a ISO 14040 (2006). O processo de revisão e todos os comentários dos revisores são documentados e armazenadas pelo ECOINVENT (2016). Os nomes e a revisão final com os comentários dos editores são armazenados diretamente nos conjuntos de dados.

Ainda mais, a base de dados do Ecoinvent (2016) já foi adotada anteriormente por outros autores com objetivos semelhantes e alinhados com os propósitos deste trabalho. Por exemplo Rigamonti *et al.* (2014) cria cenários de avaliação na gestão de resíduos plásticos, Passarini *et al.* (2012) na avaliação de resíduos provenientes da moagem de automóveis em fim de vida, Syrrakou *et al.* (2006) na avaliação de eficiência energética de uma janela fotocrômica aplicada em edifícios, Alston *et al.* (2011) na análise da EFV incineração pelo processo de pirolise, destinada ao tratamento de resíduos de PFV eletrônicos, Welz *et al.* (2011), Usón *et al.* (2011) na avaliação da eficiência energética de meios de transporte e por

[12] Uma *"dataset"* é uma coleção de dados normalmente tabulados, onde para cada elemento se indicam várias características (WIKIPEDIA, 2016c).

fim e não menos importante Dewulf, J. *et al.* (2007) alega que um grande esforço já foi gasto no desenvolvimento de bases de dados de ICV, tais como o Ecoinvent (2016) e que este contêm dados sobre milhares de processos técnicos.

Dessa forma e segundo argumentado, acredita-se ter suficientemente justificada a escolha pela base de dados do Ecoinvent (2016).

4.2.2 Utilização dos dados de exergia

O portfólio de literatura levantado permitiu verificar que a ampla variedade de dados necessários e consequentemente a elevada carga de cálculos para a abordagem por exergia comumente pressiona os pesquisadores a fazer uso de ferramentas de apoio na forma de softwares, tendo se destacado as seguintes:

- Ferramenta de apoio FACTSAGE 5.0 (2002.), identificada nos trabalhos de Ignatenko *et al.* (2007) na avaliação da eficiência de recursos em sistemas de reciclagem e Reuter *et al.* (2006) na determinação de limites para a reciclagem de veículos em fim de vida;
- Ferramenta de apoio ASPEN PLUS® (2011), identificada nos trabalhos de Querol *et al.* (2011) aplicando exergia na análise termo econômica de processos, Bram *et al.* (1997) e no projeto termodinâmico de um ciclo evaporador e Dincer *et al.* (2014) na avaliação exergética de sistemas de produção de hidrogénio;
- Ferramenta de apoio EES® (2004) em (Ortiz *et al.* (2013) seminário de conceituação e aplicação de exergia e Alves (2004) na otimização por exergética de uma usina de energia;
- Ferramenta de apoio SIMAPRO (2016), identificada nos trabalhos de Hamut, H. S. *et al.* (2014) na análise de exergia de um veículo hibrido elétrico, Medyna *et al.* (2009) na abordagem por exergia na fase inicial de projeto de produto, Kara *et al.* (2011) energia incorporada das cadeias de abastecimento de fabricação e Paraskevas *et al.* (2015) na avaliação da reciclagem de alumínio.

Entretanto é importante observar que os dados de manufatura em apoio a tais ferramentas nem sempre estão disponíveis ou são representativos das situações enfrentadas pelos processos na indústria e por vezes são estimados com base em pressupostos pouco realistas (DUFLOU *et al.*, 2012). Nesse sentido e conforme previa experiência de outros autores, a ferramenta de apoio SIMAPRO (2016) apresenta vantagens cruciais para com os propósitos dessa pesquisa uma vez que: (i) Preenche a lacuna apontada por Duflou *et al.* (2012) a medida em que incorpora a validada base de dados do Ecoinvent (2016) e (ii) contem, entre os diversos métodos de ACV, também a abordagem por exergia segundo o método CExD nos moldes de Bösch *et al.* (2006).

Dessa forma e segundo argumentado, acredita-se ter suficientemente justificada a escolha pela ferramenta de apoio SIMAPRO (2016) uma vez que esta contém a base de dados de exergia bem como o método de exergia selecionados, tornando-se o elo de ligação entre estes e a plataforma de cálculos.

4.2.3 Cálculo dos fluxos de exergia na ferramenta SIMAPRO

Segundo o método de exergia proposto por Bösch *et al.* (2006) e integrado na ferramenta de apoio SIMAPRO (2016), a lista de diferentes fluxos de exergia considerada para efeito de cálculo refere-se apenas aos recursos energéticos considerados como fonte útil no cenário dos processos industriais e da tecnologia atual. Processos estes que neste estudo, foram pré-selecionados segundo relevou a revisão bibliométrica na seção 2.3, para aqueles processos aplicáveis às EFVs.

A fim de quantificar a demanda de exergia em um dado cenário para um produto ou processo, o indicador CExD é definido como a soma dos fluxos de exergia de todos os recursos necessários para proporcionar um processo ou produto. Neste método a exergia é usada como uma medida da perda potencial e sempre será calculada quando um fluxo de recursos energéticos "úteis" estiver presente (PRÉ, 2014).

Este método foi atrelado diretamente a partir da base de dados do ECOINVENT (2016) na sua versão 2.0. A quantidade de substâncias presentes é compatível com o banco de dados e foi estendida para outros bancos de dados presentes na biblioteca do software (PRÉ, 2014); fato este que permite lançar mão de outras bases de dados também incorporadas no

software SIMAPRO (2016) com rigor semelhante à base de dados do ECOINVENT (2016), ainda que essa última tenha sido usada prioritária e majoritariamente. Tendo em vista que se trata de um cálculo de exergia é importante mencionar que temperatura considerada para o ambiente de referência é de 25 graus Célsius ou 298,15 Kelvin (FRISCHKNECHT *et al.*, 2007).

Quanto à terminologia adotada, cabe destacar ligeiras diferenças entre o trabalho original de Bösch *et al.* (2006) e àquela descrita na base de dados do software na versão CExD v1.05 (ECOINVENT, 2016; SIMAPRO, 2016). As diferenças são então apresentadas no Quadro *13* (FRISCHKNECHT *et al.*, 2007).

Base de dados Ecoinvent v 2.0	**Bösch *et al.* (2006)**
Fóssil	Energia fóssil
Nuclear	Energia nuclear
Eólica	Eólica, solar, energia geotérmica
Solar	Eólica
Água	Hidro energia
Floresta primária	-
Biomassa	Biomassa
Recursos hídricos	Água
Metais	Minérios metálicos
Minerais	Minerais

Quadro 13 – Diferença terminológica entre o CExD e o Ecoinvent/SIMAPRO.

Fonte: Adaptado de Frischknecht *et al.* (2007).

A ferramenta SIMAPRO declara ainda, outras atualizações com respeito ao proposto originalmente por Bösch *et al.* (2006). No que diz respeito aos minérios metalicos, realiza uma ampliação de valores de exergia incorporada. Quanto à dupla contagem, medidas foram tomadas para evita-la (i.e. biomassa em floresta primária). Sobre as eficiências da tecnologia atual, sao consideradas para fluxos de fontes de energias renováveis e não renovaveis e portanto, apresenta resultados mais amplos e precisos. Cabe notar que tabelas atualizadas e descrições completas integradas na ferramenta são encontradas em Frischknecht *et al.* (2007).

4.2.4 Análise decisória por multicritério

Nesta seção são brevemente apresentados o método de análise por multicritério e os motivos que justificam sua adoção como ferramenta de apoio e parte integrante ao método proposto nesse trabalho.

Segundo a fonte material ou de energia a Segunda Lei da Termodinâmica é capaz de avaliar quantitativa (i.e. joules) e qualitativamente (i.e. “renovável” ou “não renovável”) toda a conversão de energia. Este fato que pode tornar difícil julgar e decidir de forma acertada sobre os resultados apontados pela análise de exergia, sobretudo no contexto das EFVs e PRs. Em contrapartida, a tomada de decisão por multicritério é um ramo de pesquisa que propõe métodos de decisão capazes de lidar com critérios tanto quantitativos como qualitativos (YU *et al.*, 2000; CAVALLARO, 2005; WANG *et al.*, 2008).

A Processo Analítico de Hierarquia (AHP) segundo proposto por Saaty (1980), fornece uma metodologia para mensurar o desempenho de dados tanto quantitativos como qualitativos, por meio da decomposição de uma decisão complexa em uma hierarquia. Sua validade é baseada em milhares de aplicações reais utilizadas pelos tomadores de decisão (TZENG *et al.*, 2002; BEGIĆ *et al.*, 2007; SZCZYPIŃSKA *et al.*, 2008; ARAGONÉS-BELTRÁN *et al.*, 2010). Ainda mais, segundo Kasperczyk *et al.* (2006) é reconhecida e largamente aplicada como ferramenta de apoio a fim de lidar com problemas de natureza ambiental e energética (GONZALEZ-TORRE *et al.*, 2004; BEGIĆ *et al.*, 2007; MA *et al.*, 2016b).

Dessa forma, esses fatores serão integrados por meio de um processo de hierarquização de critérios pelo método AHP na forma clássica como proposto por Saaty (1980) e realizado pelos passos propostos por Chan *et al.* (2004). Segundo sugere a DSR, cabe registrar que o modelo adaptado da AHP para a versão com escala *fuzzy* (FAHP) foi cogitado como ferramenta para compor o método, dada a sua capacidade de incorporar a imprecisão do pensamento humano (SALAH-ELDIN). Entretanto a FAHP foi descartada pois, ainda que seja, segundo Saaty, T. L. *et al.* (2007), popular, é argumentado por vários autores os resultados são, frequentemente, os mesmos (SALAH-ELDIN; RAO, 2007). Sendo assim, o incremento de complexidade dos cálculos para a AHP na versão *fuzzy* tornar-se-ia temerário para com a construção do método aqui proposto, no que diz respeito à sua praticidade.

Na AHP clássica, Saaty (1994) demonstra que há dois meios de sintetizar as prioridades das alternativas: o modo distributivo e o ideal. No distributivo, os pesos das alternativas somam 1, sendo adotado quando há dependência entre as alternativas e quando o objetivo é escolher uma alternativa que é melhor em relação a outras. Portanto, o modo distributivo é o modo adotado e mais adequado para os propósitos desse trabalho.

A seguir o método da AHP é descrito de forma breve e mais pragmática, na forma de passos para sua aplicação, nos moldes de Saaty, Thomas L. *et al.* (2012).

Passo 1: Determinar o objetivo da decisão e as variáveis ou atributos adotados como critérios de avaliação para suporte à decisão.

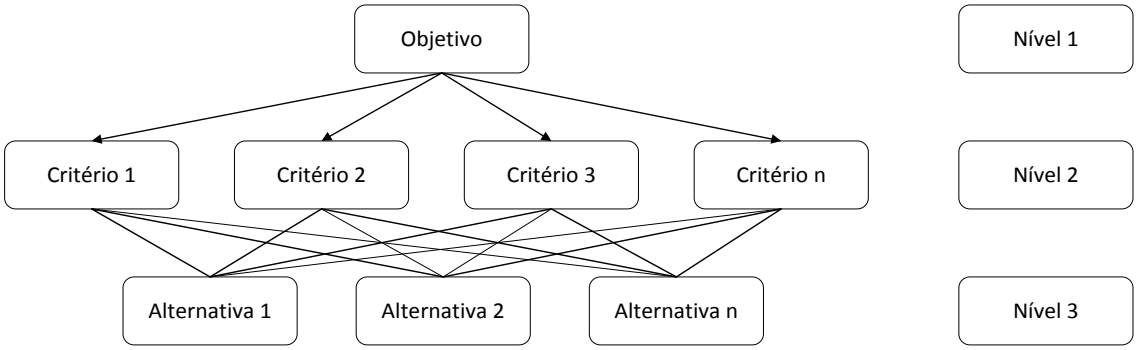


Figura 23 – Objetivo e atributos de avaliação.

Fonte: Adaptado de Hota (2012).

Segundo ilustrado na Figura *23*, existe uma distribuição hierárquica em níveis. O primeiro nível corresponde ao objetivo da decisão e como ele se desdobra para o segundo na forma de critérios de avaliação. O segundo nível corresponde aos critérios de julgamento e como este nível se desdobra pela interação de cada critério com todas as possíveis alternativas. O terceiro nível corresponde a todas as alternativas possíveis dentre as quais se pretende decidir e selecionar apenas uma.

Passo 2: Determinar a importância relativa dos diferentes critérios no que diz respeito ao objetivo da decisão.

Para tal, na AHP, uma hierarquia de comparação paritária é empregada para atribuir pesos relativos aos critérios por meio de sua comparação pareada. Para isso é então adotado um valor de uma escala de importância, a fim de expressar a importância relativa de um critério em relação ao outro, segundo a Tabela 7 (SAATY, T., 1980; MUMMOLO, 1996).

Tabela 7 – Escala numérica de julgamento relativo.

Importância relativa (w_n)	**Definição**	**Descrição**
1	Igual importância	*Duas atividades contribuem igualmente para o objectivo*
3	Importância Moderada	*Experiência importância e julgamento favorecem ligeiramente uma atividade em detrimento de outra.*
5	Forte importância	*Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade em detrimento de outra.*
7	Importância muito forte ou demonstrada	*Uma atividade é favorecida muito fortemente sobre a outra; seu domínio é demonstrado na prática.*
9	extrema importância	*A evidência favorecendo uma atividade em detrimento de outra é da mais alta ordem possível de afirmação.*
2,4,6 e 8		*Valores intermediários*

Fonte: Adaptado de Zopounidis; Pardalos (2010).

Passo 3: Fazendo uso da Tabela 7, montar a matriz de julgamento que levará ao vetor de prioridades, também conhecido como *eigenvector*, que consiste em uma matriz w que expressa a importância relativa de cada um dos critérios de julgamento em relação aos demais.

Segundo Saaty, Thomas L. (1990), "a maneira mais eficaz de racionalizar julgamentos é tomar um par de elementos e compará-los em uma única propriedade sem preocupação com outras propriedades ou outros elementos".

As comparações em pares na AHP assumem que o decisor pode comparar quaisquer pares de elementos E_i, E_j no mesmo nível de hierarquia e fornecer um valor numérico a_{ij} para a relação de sua importância. Se o elemento E_i é preferido sobre E_j então, $a_{ji} > 1$. De forma correspondente, dada à propriedade de reciprocidade, temos que $a_{ji} = 1/a_{ij}$, sendo $a_{ij} > 0$, para $i = 1,2,\dots,n$ e $j = 1,2,\dots,n$. Cada conjunto de comparações para um nível com n elementos requer $n(n-1)/2$ comparações, que são utilizadas para construir a matriz recíproca positiva de pares de comparações $A = [a_{ij}]$, conforme a Equação (11).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

onde, $a_{ji} = 1/a_{ij}$, para $i = 1,2,\dots,n$ e $j = 1,2,\dots,n$.

Dessa forma, para calcular o vetor de prioridades $w = (w_1, w_2, \ldots\ldots, w_n)^T$ pode ser derivado da matriz de pares de comparações pelo método tradicional proposto por Saaty, T. (1980), onde o principal eigenvector da matriz de comparações pode ser usado como um vetor de prioridades para preferências consistentes e inconsistentes (SAATY, THOMAS L., 2003). Segundo Saaty, Thomas L. *et al.* (2012) uma maneira simples de se obter uma aproximação é normalizar os elementos em cada coluna da matriz de julgamento e, em seguida, realizar a média sobre cada linha.

De forma a exemplificar os passos até aqui apresentados, bem como os seguintes, apresenta-se a seguir, um exemplo numérico simples, de uma matriz de comparação recíproca de ordem 3x3, onde se busca saber a preferência entre 3 frutas, de acordo Equação (12).

$$A = \begin{array}{c} \\ maçã \\ banana \\ laranja \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} maçã & banana & laranja \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 5 \\ 3 & 1 & 7 \\ 1/5 & 1/7 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \tag{12}$$

Cada coluna é então somada conforme demonstrado na Equação (13)

$$A = \begin{array}{c} \\ maçã \\ banana \\ laranja \\ Soma = \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} maçã & banana & laranja \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 5 \\ 3 & 1 & 7 \\ 1/5 & 1/7 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{array}{ccc} 21/5 & 31/21 & 13 \end{array} \end{array} \tag{13}$$

Em seguida, cada a_{ij} é dividido pelo resultado da soma de sua respectiva coluna na Equação (13), obtendo então o peso relativo e normalizado, onde a soma de cada coluna passa a ser igual a 1, conforme demonstrado na Equação (14).

$$A = \begin{array}{c} \\ maçã \\ banana \\ laranja \\ Soma = \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} maçã & banana & laranja \end{array} \\ \begin{bmatrix} 5/21 & 7/31 & 5/13 \\ 15/21 & 21/31 & 7/13 \\ 1/21 & 3/31 & 1/13 \end{bmatrix} \\ \begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \end{array} \end{array} \tag{14}$$

Por fim, o vetor de prioridades *w* normalizado pode ser obtido pela média das linhas, ou seja, é obtido por meio da soma dos termos de cada linha multiplicado pelo valor de $1/n$, conforme demonstrado na Equação (15).

$$w = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 5/21 & 7/31 & 5/13 \\ 15/21 & 21/31 & 7/13 \\ 1/21 & 3/31 & 1/13 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}2828 \\ 0{,}6434 \\ 0{,}0738 \end{bmatrix} \quad (15)$$

No exemplo acima a prioridade se dá para maçã com 28,28%, banana com 64,34% e laranja com 7,38%. Logo, é possível afirmar que a fruta preferida é banana, seguida por maçã e laranja. Entretanto, podemos saber mais do que sua classificação. Na verdade, o peso relativo é uma escala de razão que pode ser dividida entre as alternativas. Por exemplo, podemos dizer que a preferência por banana é 2.27 (= 64.34 / 28.28) vezes superior a maçã e que a preferência por banana é 8.72 (= 64.34 / 7.38) vezes mais que laranja.

Passo 4: Calcular o índice de consistência (IC). Segundo Saaty, T. (1980), antes de prosseguir, é necessário verificar a consistência das respostas que levaram às priorizações. Para isso, é necessário encontrar o valor denominado de eigen máximo λ_{max}. O valor eigen máximo é obtido a partir da soma dos produtos entre cada elemento do vetor de prioridades *w* na Equação (15) e a soma das colunas da matriz de comparação recíproca não normalizada na Equação (13). Fazendo uso do exemplo numérico acima, o eigen máximo λ_{max} pode ser encontrado, de forma mais simples e por aproximação, conforme demonstrado na Equação (16).

$$\lambda_{max} = \frac{21}{5}(0{,}2828) + \frac{31}{21}(0{,}6434) + 13(0{,}0738) = 3{,}0967 \quad (16)$$

Segundo Saaty, T. (1980), a consistência de uma matriz de comparação recíproca ocorrerá e será perfeita quando o seu eigen máximo λ_{max} for igual a n. Para estimar a diferença entre estes valores e calcular o o índice de consistência IC usa-se o quociente da Equação (17), para em seguida exemplificar numericamente na Equação (18).

$$\mathrm{IC} = (\lambda_{max} - \mathrm{n})/(\mathrm{n} - 1) \quad (17)$$

$$\mathrm{IC} = (3{,}0967 - 3)/(3 - 1) = 0{,}0484 \quad (18)$$

Segundo Saaty, T. (1980), como regra geral, se o índice de consistência for < 0,1, ou seja, se o erro for inferior a 10%, então há consistência suficiente para prosseguir com os cálculos da AHP. Caso contrário recomenda-se que os julgamentos da matriz de comparação recíproca sejam refeitos. Entretanto, muitos autores argumentam que o erro limitado a no máximo 10% é demasiadamente rigoroso. Vários trabalhos demonstraram que quanto maior o número de critérios de comparação e a dependência entre as alternativas, maior será a tendência à inconsistência, sendo recomendado um número não superior a sete e excepcionalmente chegando, mas não ultrapassando, nove critérios (MILLER, 1956; TRIANTAPHYLLOU *et al.*, 1995; SAATY, THOMAS L *et al.*, 2003). Em suma, para fins de execução deste trabalho adota-se o limite de até 10% (≤ 0,10).

Passo 5: Calcular a Razão de Consistência (RC). Uma medida de consistência pode ser estimada comparando-se o valor do IC com a mesma razão calculada de uma matriz recíproca de julgamentos gerados aleatoriamente e de mesma ordem (SAATY, THOMAS LORIE *et al.*, 1991). O RC é, então, calculado por aproximação segundo a Equação (19) e numericamente exemplificado na Equação (20). Considera-se aceitável uma razão de consistência de até 0,10 e o índice randômico IR, para matrizes de ordem 1 até 15, é um valor calculado em laboratório e disponível conforme Tabela 8.

$$RC = \frac{\text{IC}}{IR} \tag{19}$$

$$RC = \frac{0{,}0484}{0{,}58} = 0{,}083 \text{ , logo < 10% e portanto consistente.} \tag{20}$$

Tabela 8 – Tabela de índices randômicos.

Ordem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

Segundo Alonso *et al.* (2006), outra forma de se encontrar o RC se dá por meio da Equação (21). Esta opção de cálculo mostra-se particularmente útil quando a Tabela 8 de índices randômicos não está disponível ou quando a ordem da matriz supere a ordem 15, ou

seja, supere os limites da Tabela 8. Em seguida o RC é numericamente exemplificado na Equação (22).

$$RC = \frac{\lambda_{max} - \mathrm{n}}{2{,}7699\mathrm{n} - 4{,}3513 - \mathrm{n}} \tag{21}$$

$$RC = \frac{3{,}0967 - 3}{2{,}7699.3 - 4{,}3513 - 3} = 0{,}09 \text{ , logo < 10\% e portanto consistente.} \tag{22}$$

Passo 5: Calcular o peso de cada alternativa em relação às demais alternativas e para cada um dos critérios estabelecidos.

Segundo Saaty, Thomas L. *et al.* (2012), uma vez que o nível 2 da Figura *23*, referente aos critérios de julgamento foi resolvido, devem ser realizadas as comparações de pares das alternativas no nível imediatamente inferior. Para isso, os passos de 2 a 4 serão repetidos para construir M matrizes de comparação recíproca. Entretanto, estas matrizes objetivam a comparação em pares a_{ij} para cada alternativa, a fim de saber quanto uma dada alternativa é melhor em relação a outra em satisfazer cada critério C_n do segundo nível 2 da Figura *23*.

Assim, para o nível 2, existirão tantas matrizes de comparação recíproca A quanto forem os números de critérios C_n, notando que cada matriz será de ordem equivalente ao número de alternativas. O objetivo deste passo consiste em calcular, para cada alternativa, o seu respectivo vetor de prioridades w' normalizado.

Passo 6: Calcular o peso total normalizado de cada alternativa em relação ao o vetor de prioridades *w* normalizado de cada critério estabelecido.

Havendo encontrado, para cada alternativa Altern_n, o seu respectivo vetor de prioridades w' normalizado, o peso total *PT* é apenas normalização da combinação linear do produto da multiplicação entre w' de cada alternativa Altern_n e o vetor de prioridade *w*, conforme a Equação (23).

$$\begin{array}{c} \\ \text{Critério}_1 \\ \text{Critério}_2 \\ \vdots \\ \text{Critério}_n \end{array} \begin{array}{c} \text{Altern}_1 \\ \begin{bmatrix} w'_{C1} \\ w'_{C2} \\ \vdots \\ w'_{Cn} \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \text{Altern}_2 \\ \begin{bmatrix} w'_{C1} \\ w'_{C2} \\ \vdots \\ w'_{Cn} \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \dots \\ \begin{bmatrix} \cdots \\ \cdots \\ \ddots \\ \cdots \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \text{Altern}_n \\ \begin{bmatrix} w'_{C1} \\ w'_{C2} \\ \vdots \\ w'_{Cn} \end{bmatrix} \end{array} \cdot \begin{array}{c} w \\ \begin{bmatrix} w_{C1} \\ w_{C2} \\ \vdots \\ w_{Cn} \end{bmatrix} \end{array} \tag{23}$$

Uma vez encontrado, para cada alternativa o produto p de w'_{Cn} x w_{Cn}, para encontrar o peso total de cada alternativa Altern_n basta então realizar a soma, conforme demonstrado na Equação (24).

$$\begin{array}{c} \text{Altern}_1 \quad \text{Altern}_2 \quad \dots \quad \text{Altern}_n \\ \begin{bmatrix} p_{C1} & p_{C1} & \cdots & p_{C1} \\ p_{C2} & p_{C2} & \cdots & p_{C2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{Cn} & p_{Cn} & \cdots & p_{Cn} \end{bmatrix} \\ \text{PT} = \sum \text{Altern}_1 \quad \sum \text{Altern}_2 \quad \dots \quad \sum \text{Altern}_n \end{array} \tag{24}$$

4.3 ARTEFATO

Nos moldes da DSR segundo proposto por Peffers *et al.* (2007), são descritas a seguir as atividades 5 e 6.

4.3.1 Definir os cenários de análise (Atividade 5)

Nesta seção é realizada a última atividade que, de posse dos resultados, permite propor o método.

Pela definição proposta por Glenn (2003) “um cenário é uma história com causa plausível e ligações de efeito que conectam um estado futuro com o presente, enquanto que ilustram as principais decisões, os acontecimentos e as consequências ao longo da narrativa.” Ainda mais, visto como uma metodologia de pesquisa futura, os cenários têm por objetivo explorar sistematicamente, criar e testar ambos os futuros possíveis e desejáveis para melhor

tomada de decisão. Segundo afirmado por Marques *et al.* (2009), a ciência da sustentabilidade é complexa e incerta. Portanto, a análise de cenários é necessária como meio da identificação de questões fundamentais sobre a sustentabilidade e que determinam prioridades e soluções (SWART *et al.*, 2004).

Para que fosse possível *a priori* desenvolver, para em seguida avaliar o método proposto diante das EFVs e seus processos, mostrou-se necessária uma amostragem representativa de diferentes, relevantes e prováveis cenários. Portanto, múltiplos cenários foram definidos segundo autores e obras com propósitos variados e adoção das EFVs. Os cenários propostos foram selecionados, adaptados ou construídos adotando-se os critérios apontados por Ignatenko *et al.* (2007) a fim de: (i) ilustrar os efeitos da escolha de diferentes rotas de processamento sobre a eficiência e exergia na reciclagem de recursos; (ii) encontrar um equilíbrio ideal entre reciclagem / recuperação, perdas de exergia e utilização de recursos; e (iii) definir uma rota de processos de EFVs exergeticamente melhor.

As obras selecionadas são resultado do portfólio construído por meio da metodologia de revisão bibliométrica anteriormente apresentada nesse trabalho (ROSE, CATHERINE M. *et al.*, 2002; IGNATENKO *et al.*, 2007; JODY, B. J. *et al.*, 2011; PARK *et al.*, 2014; RIGAMONTI *et al.*, 2014).

Em relação aos cenários motivados pela legislação, Bok *et al.* (1998) em um trabalho que compara diferentes legislações e regiões como Estados Unidos, Europa e Japão apontam que a Europa Ocidental claramente lidera a gestão de EFVs de produtos eletrônicos em fim de vida. Portanto, a legislação Europeia é a adotada para a criação dos cenários propostos.

- Cenário 1: EFVs segundo revisão bibliométrica no contexto *Estado da Arte* em termos de eficiência dos PRs*;*
- Cenário 2: EFVs para máxima reciclagem (recuperação máxima de materiais);
- Cenário 3: EFVs para máxima recuperação de energia ou *Waste to Energy*;
- Cenário 4: EFV para legislação, conforme diretiva para lixo eletrônico (DIRETIVA 2012/19/EU, 2012).

A seguir e para cada cenário proposto, os respectivos critérios e objetivos são descritos para em seguida, relacioná-los com as EFVs possíveis e construir o cenário proposto.

4.3.1.1 Cenário 1: EFVs no contexto do *Estado da Arte* em termos de eficiência dos PRs.

Tal como objetivou a pesquisa bibliométrica sobre EFVs e PRs na seção 2.3, os processos tidos como eficientes e aplicados ao longo das EFVs foram sobrepostos, as redundâncias identificadas foram eliminadas, seus fluxos foram combinados e um diagrama final foi criado. Tal procedimento visou definir o cenário de um PFV segundo as melhores práticas neste trabalho denominado Estado da Arte em termos de eficiência dos PRs. A Figura 24 ilustra o resultado.

Cabe destacar que os mesmos PRs e tecnologias identificadas no Estado da Arte, respectivamente distribuídas ao longo de cada EFV, conforme a Figura 24, serão aplicados não somente no cenário um, mas também em todo e qualquer cenário seguinte, desde que sejam aplicáveis segundo os propósitos especificados para cada determinado cenário.

No que diz respeito à EFV incineração, já que a revisão revela que a eficiência é variada, porém equiparável, entre estas opções identificadas, são adotados os incineradores municipais por disporem de dados de exergia mais completos.

De forma mais específica, este cenário incluirá:

- As divisões (subsistemas) e/ou componentes que forem identificados para a EFV reuso conforme revele o método proposto;
- A desmontagem exclusivamente dos itens identificados acima;
- Todas as demais divisões (subsistemas) e/ou componentes, serão tratadas por meio da EFV reciclagem usando PRs de moagem e separação não exaustiva, ou seja, até que se obtenha o denominado concentrado plástico e demais resíduos não separados;
- Todo concentrado plástico e demais resíduos não separados serão tratados por meio da EFV descarte usando PRs de incineração com recuperação de energia.

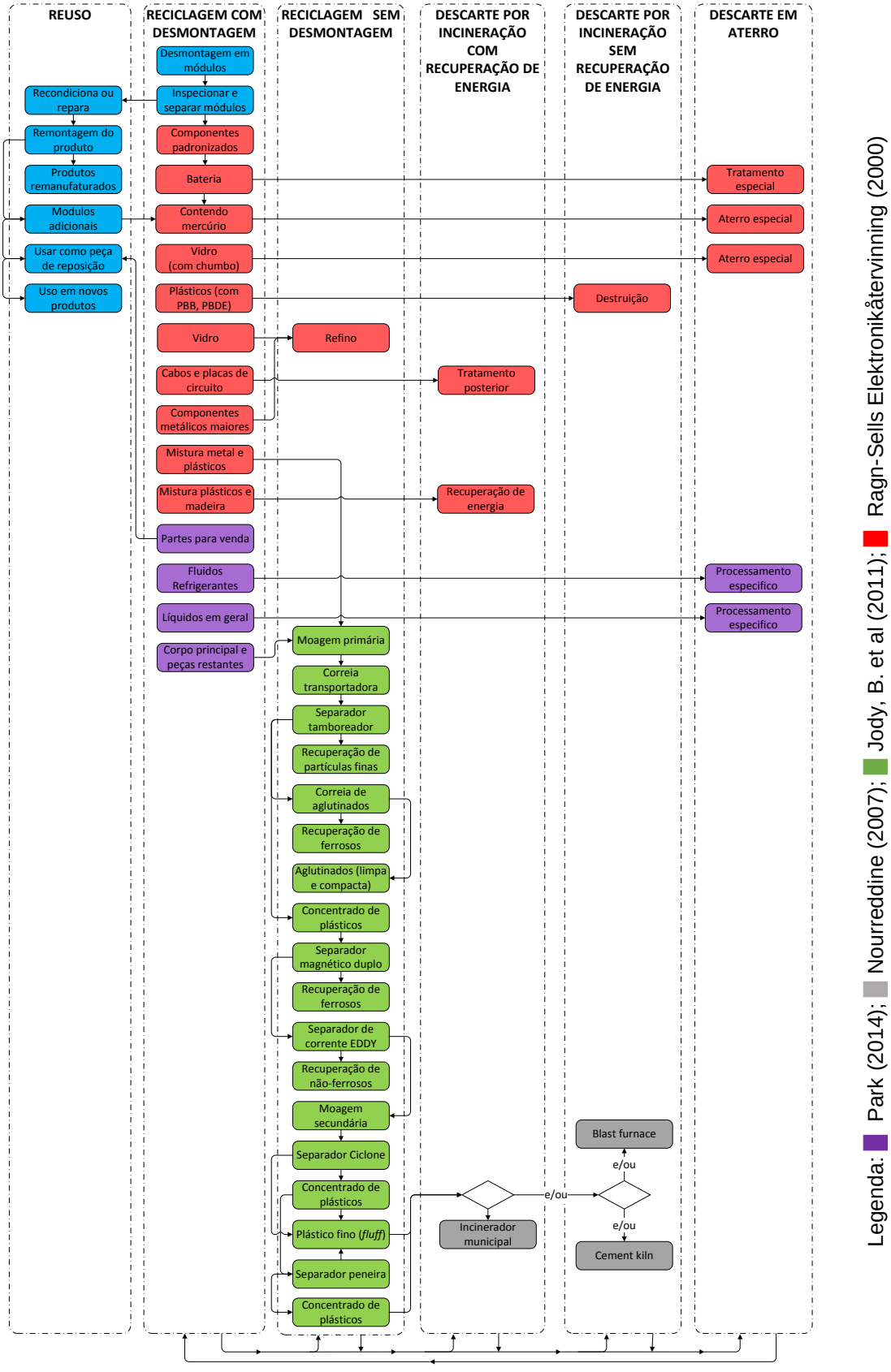


Figura 24 – Cenário de PRs e EFVs segundo as melhores práticas via bibliometria.

Fonte: Autoria própria.

4.3.1.2 Cenário 2: EFVs para máxima reciclagem (máxima recuperação de materiais)

Este cenário é configurado por uma instalação que contém os inúmeros processos descritos na seção 2.3.4.5.2 em uma disposição tal conforme ilustrado na Figura 25.

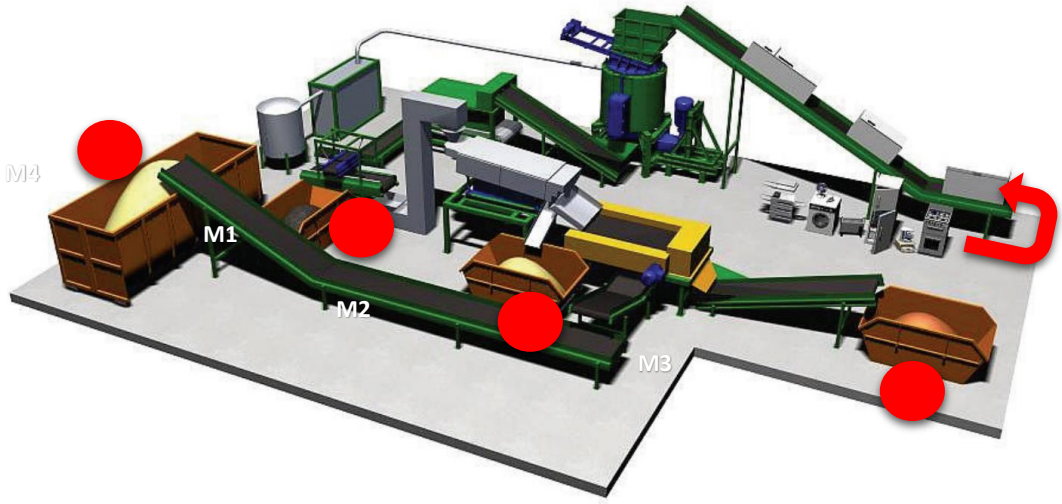


Figura 25 – Instalação completa de reciclagem de PFV sem desmontagem.
Fonte: Adaptado de Andritz (2016).

Tal como ilustrado na Figura 25 por meio da seta vermelha, nesse cenário os PFVs adentram no processo, totalmente automatizado, sem passar por nenhum tipo de desmontagem. Estes são inseridos tal como recebidos, totalmente montados ou não, diretamente na primeira esteira que leva ao moinho primário, onde o processo continua de forma totalmente mecanizada e caracterizado por uma série de processo de moagem e separação, até que 4 classes de materiais principais Mx, sejam recuperados.

4.3.1.3 Cenário 3: EFVs para máxima recuperação de energia

Este cenário é desenhado de forma tal que o PFV, em sua massa total, seja tratado assumindo que este possui potencial de incineração e recuperação de energia e, adicionalmente, ignora partes e/ou materiais que não têm poder calorífico, porém sendo tratados da mesma

forma. Entretanto, assim como indica a revisão bibliométrica, outros processos são necessários para viabilizar a EFV Incineração. Portanto processos que antecedem a incineração (i.e. desmontagem básica e/ou moagem primária) ou sucedem (i.e. aterro) são considerados.

4.3.1.4 Cenário 4: EFV conforme legislação para lixo eletrônico

Segundo demonstrado por Bok *et al.* (1998), em um trabalho que compara diferentes legislações e regiões demonstrou que a Europa Ocidental, claramente, lidera a gestão de PFVs eletrônicos e portanto, a DIRETIVA 2012/19/EU (2012) é adotada para a criação do cenário proposto.

A diretiva define como equipamentos eletroeletrônicos aqueles dependentes de correntes eléctricas ou campos eletromagnéticos para funcionar, gerar, transferir ou medir essas correntes e campos, desde que em tensão ≤ 1.000 Volts AC e 1.500 Volts DC. Em suma, a diretiva lista no anexo VII o tratamento seletivo de materiais e componentes de PFVs segundo referidos no Artigo 8 (2), em três aspectos:

i. No mínimo, as seguintes substâncias, misturas e componentes deverão ser removidos (desmontados) previa e separadamente à moagem:

- Componentes contendo mercúrio (i.e. interruptores ou lâmpadas);
- Baterias;
- Placas de circuitos impressos (PCBs) com área ≥ 10 cm²;
- Cartuchos de toner líquidos, pastosos ou coloridos;
- Plásticos contendo retardantes de chama bromados;
- Resíduos e componentes que contenham amianto;
- Tubos de raios catódicos,
- Clorofluorocarbonetos (CFC) e seus substitutos HCFC ou HFC;
- Lâmpadas de descarga de gás,
- Telas LCD ≥ 100 cm² e todos as telas iluminadas por lâmpadas de descarga de gás,
- Cabos elétricos externos;
- Fibras cerâmicas refratárias classificadas como substâncias perigosas (i.e. amianto);

- Radioativos, com exceção dos componentes que estejam abaixo dos limiares de isenção da Diretiva 96/29/Euratom de 13 de Maio de 1996;
- Capacitores eletrolíticos em altura >25 mm, diâmetro >25 mm ou proporcionalmente com volume similar; e
- Os demais devem ser descartados ou recuperados segundo a Diretiva 2008/98/EC (2008), por meio de descarte por incineração com recuperação de energia, ou seja, como combustível para gerar energia, desde que realizada em instalações de incineração dedicadas ao processamento de resíduos sólidos urbanos com eficiência energética igual ou superior a 0,6, com os cálculos de eficiência podendo ser encontrados em Tebert (2006).

ii. Os seguintes componentes deverão ser recolhidos separadamente e tratados conforme indicado:

- Em tubos de raios catódicos, o revestimento fluorescente deve ser retirado; e
- Em equipamentos contendo gases nocivos à camada de ozônio ou com potencial de aquecimento global superior a 15 (i.e. em espumas e circuitos de refrigeração), que os gases sejam extraídos e tratados de forma específica.

iii. Por fim, de forma menos específica, a norma orienta que os pontos i e ii devem ser aplicados de tal forma que a reutilização e/ou reciclagem de componentes ou mesmo de aparelhos inteiros não sejam dificultadas.

No que diz respeito às metas estabelecidas pela norma, adota-se aqui as aquelas consideradas mais exigentes e estabelecidas para cumprimento a partir de 15 de agosto de 2018. Nessa condição 85% dos PFVs devem ser coletados e destes, 80%, em massa, serão preparados para reutilização e/ou reciclados. Entretanto, a norma não estabelece dentre os 80%, que parcela deve ser destinada a reuso ou reciclagem. Sendo assim, para efeito de construção do cenário para legislação, será adotado o critério do mínimo esforço para cumprimento da norma, ou seja, PFV de referência terá 100% dos seus itens destinados a EFV reciclagem porém sem considerar a EFV reuso, entretanto em observância aos itens identificados e classificados segundo manda a norma e se respectivo tratamento.

Por fim, a pesquisa revela que o fluxo de veículos em fim de vida representa um fluxo importante de resíduos (MIRABILE *et al.*, 2002). Dessa forma e nos moldes da DSR, cabe registrar que uma tentativa de adicionar um cenário que retratasse tal fluxo, segundo a DIRETIVA 2000/53/EC (2012) foi criado porém descartado. As razões que fundamentaram a exclusão residem no fato de que em seu anexo I, a referida norma estabelece operações semelhantes porém menos especificas que às da Diretiva 2008/98/EC (2008), sendo esta última mais rigorosa e portanto a adotada.

4.3.2 Apresentação do método (Atividade 6)

Esta seção consiste na apresentação do artefato na forma de método, segundo ilustrado na Figura 26, para em seguida, descrever sua execução na forma de passos.

Oportunamente, o método é então batizado com o termo RIPEx, fazendo alusões ou conotações em relação a:

i. Ao acrônimo do inglês R.I.P. (*Rest In Peace*), no português, descanse em paz;
ii. Em conotação ao termo *ripe*, do inglês, em menção a um fruto maduro em ponto de ser colhido; e
iii. Em alusão ao verbo *to rip*, do inglês ruptura, onde a terminação Ex, diz respeito à exergia.

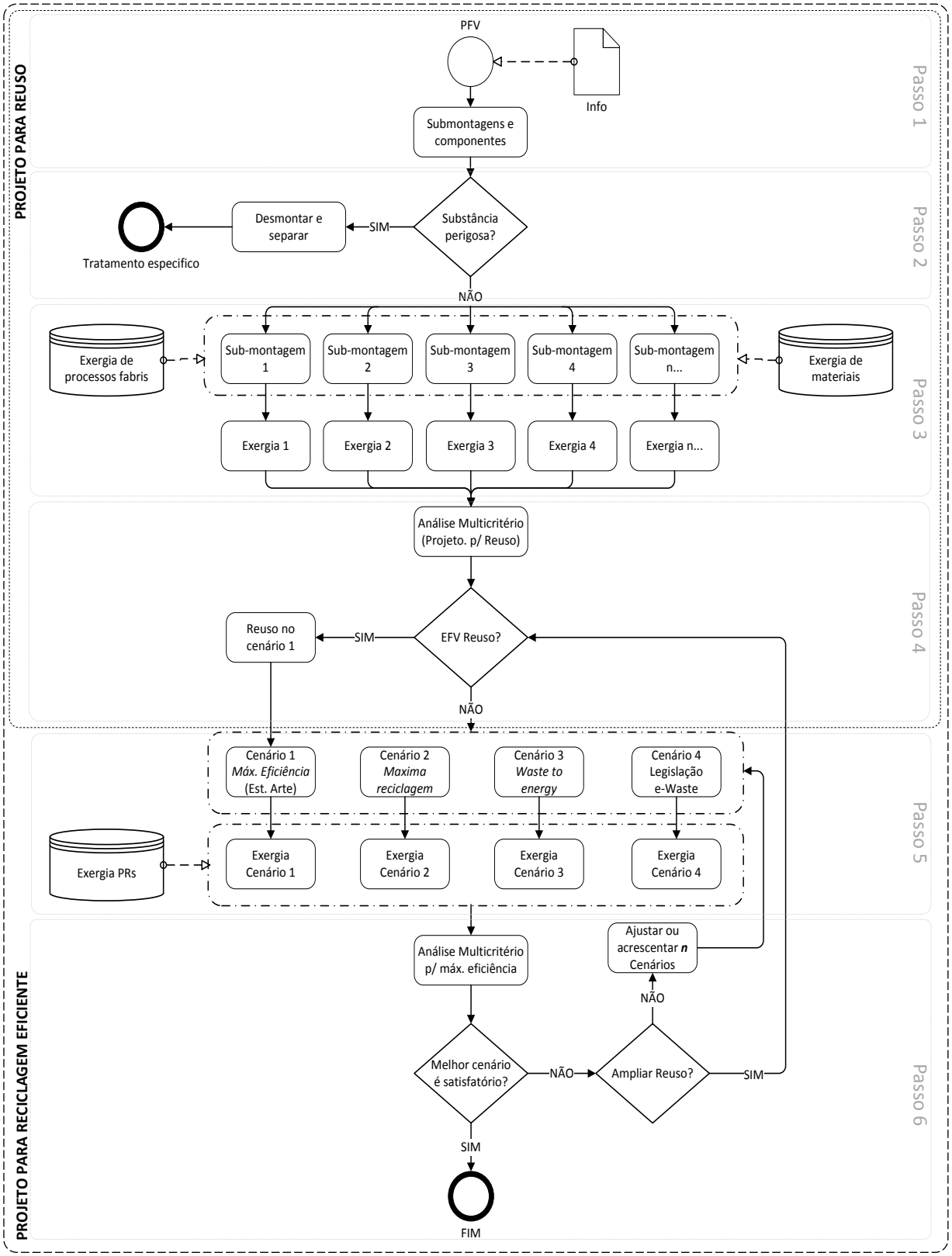


Figura 26 – Método RIPEx para avaliação exergética em cenários de fim de vida.

Fonte: Autoria própria.

A seguir o RIPEx é descrito na forma de passos para a sua execução, ao mesmo tempo em que se busca justifica-los.

Passo 1. Levantar informações sobre o PFV sobre componentes, sua massa, e respectivos processos fabris envolvidos. (i.e. manuais de serviço, permitem acelerar e executar a etapa com maior precisão); A classificação e divisão do PFV deve ser tão detalhada quanto possível, a fim de identificar subsistemas e componentes que desempenham função primária para com o PFV, preferencialmente como sugere o fabricante. Justifica-se por dois motivos: (1) Estabelecer um critério que determine fronteiras e permita agrupar a exergia a ser mensurada em cada divisão escolhida; e (2) sempre que preservados como concebidos em sua função primária, as sub-montagem ou componentes de maior importância são favorecidos pelo princípio da modularidade e assim, são aumentadas as chances de reuso como "peça de reposição", sem que seja necessário um conhecimento aprofundado do projeto ou dos princípios funcionais envolvidos (DUFLOU *et al.*, 2008; ZIOUT, 2013; MA *et al.*, 2016a; b). Dessa forma, o primeiro passo se encerra alcançando a caracterização do PFV. Sendo assim, cada componente e respectiva sub-montagem terá mensurada a sua massa em kg para em seguida, terá sua composição material identificada e, ao mesmo tempo, processos fabris são apontados. Cabe nota que a ferramenta SimaPro dá suporte a essa fase na aba montagem;

Passo 2. Despoluição mínima para materiais perigosos ou segundo legislação. Já se justificaria plenamente por questões de legislação, segurança e ambientais, entretanto, do ponto de vista da eficiência, a contaminação provocada por estes resíduos pode vir a inviabilizar ou dificultar futuras EFVs tais como Aterro, exigindo processos adicionais para sua neutralização nos termos apresentados na seção 2.3.4.7. Por outro lado, uma vez que não foram encontrados dados de exergia suficientes sobre os processos de tratativas especificas segundo resíduo perigoso, estes esforços não foram incluídos;

Passo 3. Por meio da ferramenta SimaPro, aplicar o método CExD e calcular a exergia agregada a cada divisão pré-estabelecida, destacando seu total e sua caracterização quanto à parcela de exergia de fontes renováveis ou não;

Passo 4. Hierarquizar divisões para fins de aplicação da EFV Reuso. Nesse passo, aplicar a AHP de cada divisão pelos seguintes critérios: (1) exergia de fontes não renováveis, (2) exergia de fontes renováveis, (3) massa da divisão e (4) exergia total agregada.

Justifica-se por estabelecer um julgamento decisório que considera variáveis quantitativas e interligadas (exergias e massa), além de qualitativas (exergias renováveis ou não). Tal procedimento visa apontar itens com maior eficiência e sustentabilidade pois considera: (i) que sendo reutilizada, resulta em economia direta do total da exergia agregada à divisão selecionada e favorece os cenários que apliquem a EFV Reuso; (ii) que exergias agregadas de fontes não renováveis sejam priorizados perante àqueles de (iii) fontes renováveis e por fim, (iv) a massa de cada divisão é relacionada, uma vez que os processos de reciclagem posteriormente aplicados aos cenários, têm sua demanda de exergia proporcionalmente relacionada por unidade de "kg de resíduo processado". Por fim, adotando se o princípio de Pareto, são então selecionadas as divisões que contenham, quando somadas, cerca de 80% do peso atribuído durante a priorização.

Passo 5. Calcular a exergia demandada pelo método CExD para cada cenário descrito na seção 4.3.1;

Passo 6. Aplicar a AHP em cada cenário avaliados por meio dos seguintes critérios: (1) Demanda total de exergia, (2) Exergia de fontes renováveis e (3) Exergia de fontes não renováveis. Tal procedimento visa avaliar e priorizar de forma sistemática cada cenário construído, e ao contrário do passo 4, à porção de "exergia de fonte renovável" é atribuído maior peso por entender que dessa forma o cenário seria mais sustentável e, por fim, permitindo: (i) a escolha de um dado cenário tal como imaginado, (ii) a identificação de cenários com maior potencial de ajuste, ou (iii) novos cenários intermediários aos propostos. Cabe notar que nesse momento, a ferramenta SimaPro poderá trazer, como resultados, um balanço de cada cenário demonstrado em valores negativos ou positivos, para diferentes cenários. Nesse caso, valores negativos implicam em recuperação de exergia e maior e eficiência, enquanto resultados positivos indicam consumo e destruição de exergia, devendo ser, sempre que possível, evitados.

4.4 DEMONSTRAÇÃO

Esta seção compreende a execução das atividades 7 e 9 e englobam àquilo que a metodologia DSR exige para fins de demonstração do RIPEx.

4.4.1 Definição de produto de referência (Atividade 7)

A seguir são apresentados os métodos e escolhas para o produto de referência de forma a assegurá-lo como meio valido para fins de validação do método proposto.

A composição de um PFV é muito heterogênea dada a variação dos diferentes tipos de materiais de entrada (MIRABILE *et al.*, 2002). Portanto, para que fora possível avaliar de forma consistente os diferentes cenários das EFVs, mostra-se necessário que o PFV adotado como objeto de análise, seja representativo em termos de diversidade de materiais, que fosse de porte (massa) média em relação aos PFVs em geral e que fosse suficientemente complexo em termos de subsistemas, a fim de permitir a análise de diferentes EFVs tais como Reuso. Para fins de validação de escolha do PFV, a comparação se dá frente às principais fontes e fluxos de resíduos de PFVs identificados na revisão bibliométrica, sendo estes de origem automotiva, linha branca e eletrônica (MIRABILE *et al.*, 2002; MENIKPURA *et al.*, 2014; BALKENENDE *et al.*, 2015).

Dessa forma, com base no trabalho de Mirabile *et al.* (2002) a composição média de um veículo automotor em fim de vida foi extraída, bem como sua proposta de subdivisão em classes de materiais foi adotada para em seguida, com base no trabalho de Balkenende *et al.* (2015), centrado na tratativa de PFVs eletrônicos, resgatar a composição percentual média de um monitor LCD. Por fim, entre estes uma média aritmética foi calculada e utilizada como parâmetro para a seleção do PFV.

A partir da proposta de subdivisão em classes de materiais, nos moldes de Mirabile *et al.* (2002), um material foi atribuído a cada componente do possível PFV de referência, de forma a caracterizar sua composição geral e compará-la com outros fluxos de resíduos de PFVs tais como produtos eletrônicos e veículos em fim de vida.

O PFV identificado como representativo foi um forno micro-ondas de marca e modelo amplamente presentes no mercado sul-americano.

Os resultados da análise são apresentados a seguir em termos de composição percentual em massa no Gráfico 2 e comparação no Gráfico 3.

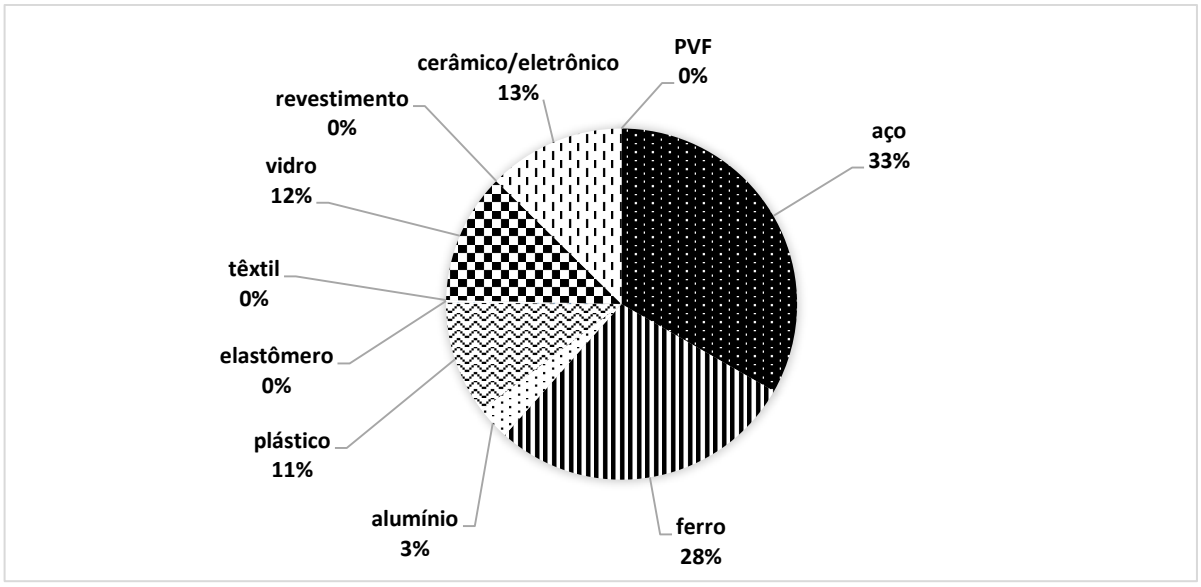


Gráfico 2 – Composição % em massa por classe de material do PFV forno micro-ondas.

Fonte: Adaptado de Mirabile *et al.* (2002).

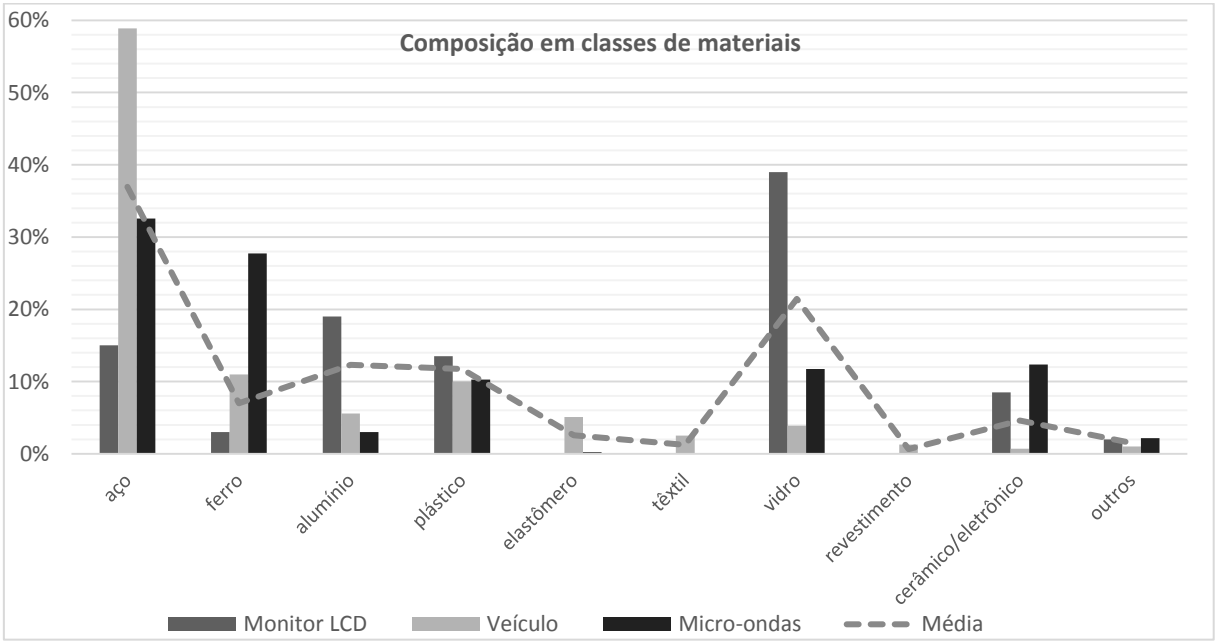


Gráfico 3 – Análise comparativa da composição % em massa de material do PFV adotado.

Fonte: Autoria própria.

De modo geral, o PFV adotado contém os materiais típicos e aproxima-se razoavelmente das demais fontes, notando que seu percentual de composição eletrônica é substancialmente mais elevado. Entretanto, é importante destacar que tal característica é benéfica ao estudo, uma vez que corrobora com a tendência de aumento dessa composição, como resultado da adoção generalizada da eletrônica em produtos de consumo e às mudanças tecnológicas aceleradas no ambiente dinâmico atual (MENIKPURA *et al.*, 2014).

No que diz respeito ao cenário segundo a Diretiva 2012/19/EU (2012), o forno micro-ondas como PFV escolhido mostra-se adequado, já que a norma em seus anexos 1, 2 e 3 o classifica como fluxo relevante de categoria número 1: "eletrodomésticos grandes" (> 50 cm em qualquer dimensão externa) e estabelece, entre todas as categorias, como a de maior exigência quanto a coleta e tratamento, onde 80% em massa, deverão ser preparados para reutilização e/ou reciclagem;

4.4.2 Aplicação do RIPEx (Atividade 8)

Nos moldes da DSR segundo proposto por Peffers *et al.* (2007), a seguir o RIPEx é aplicado, fazendo uso do produto de referência e pela execução dos passos descritos.

4.4.2.1 Levantamento de informações do PFV (Passo 1)

Uma amostra física e o respectivo manual de serviço do PFV forno micro-ondas foram providenciados. Adicionalmente, ferramentas para desmontagem, etiquetas, caixas e uma balança com precisão adequada foram disponibilizadas.

4.4.2.2 Classificação do PFV (Passo 2)

Uma vista explodida de componentes e subsistemas foram imediatamente identificados como sugere o fabricante e ilustrado na Figura 1 e em maior escala para leitura apropriada no ANEXO–A. No mesmo anexo são apresentadas desde o Quadro *15* até o Quadro *23* as listas de componentes.

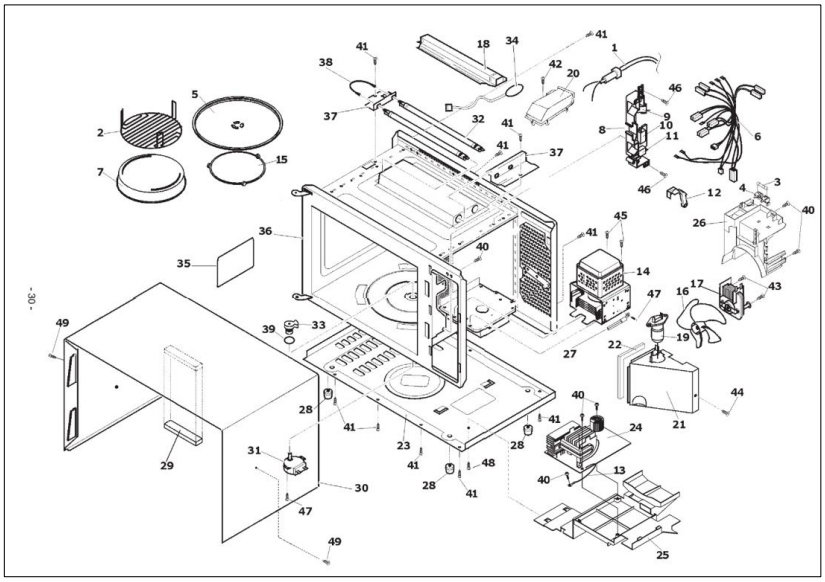


Figura 27 – Vista explodida do PFV forno micro-ondas NN-G55 BH 127 60Hz.
Fonte: Adaptado de Panasonic (2005).

Uma tabela eletrônica foi criada contendo cada componente devidamente agrupado pelas submontagens, grupos ou componentes identificados, de modo a preparar o registro da coleta de dados.

4.4.2.3 Despoluição mínima para materiais perigosos (Passo 3)

Durante os passos 1 e 2 não foram encontrados nenhum item que se enquadre como substancia perigosa e, portanto, esse passo não se aplica ao PFV em questão.

4.4.2.4 Caracterização do PFV (Passo 4)

O PFV foi completamente desmontado e desmembrado em componentes individuais totalizando 348 componentes. Para cada componente, foram identificados sua massa, material e processo fabril, onde massa e material foram relacionados com os respectivos *datasets* da base de dados apresentada na seção 4.2.1.

Os dados completos deste levantamento são apresentados no APÊNDICE – A. Este apêndice segue definições do fabricante e agrupa componentes em subsistemas, bem como converte componentes repetidos nas listas do fabricante, passando a expressá-los em quantidades. Foram adicionados os materiais "solda eletrônica" e "placa de circuito impresso" (PCB), já que estão presentes na montagem, porém não são listados pelo fabricante e, segundo literatura, representam itens importantes, sobretudo a PCB.

Imagens reais e/ou ilustrativas dos componentes são individualmente adicionadas a fim de elucidar e justificar as definições adotadas.

Um controle da massa real versos a massa prevista foi realizado, a fim de assegurar que não existem discrepâncias ou erros, tendo encontrado o valor final de 12,094 kg, ou seja, um desvio de 0,8% considerado desprezível em relação à massa total aproximada de 12,0 kg estimada e declarada pelo fabricante.

4.4.2.5 Exergia agregada a cada divisão do PFV (Passo 5)

Fazendo uso da ferramenta SIMAPRO (2016) o PFV foi modelado e o método de exergia CExD aplicado, obtendo a exergia agregada a cada divisão pré-estabelecida, destacando-se sua massa, o total de exergia e sua caracterização quanto à exergia de fontes renováveis ou não. Os resultados são apresentados no Gráfico 4.

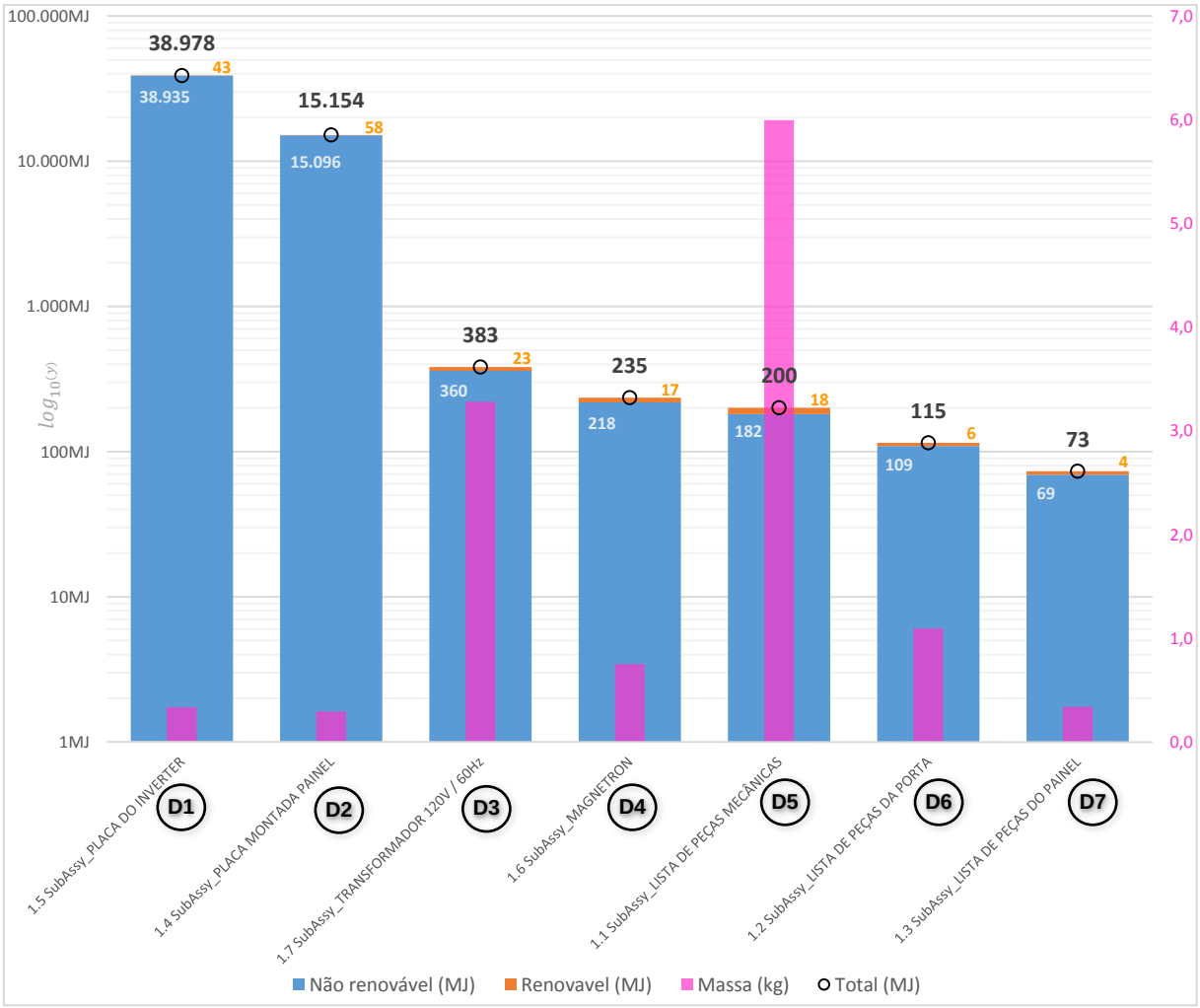


Gráfico 4 – Exergia agregada às divisões do PFV.

Fonte: Autoria própria.

A partir do Gráfico 4, temos então as 7 divisões pré-estabelecidas já distribuídas em ordem decrescente em termos de exergia total agregada. Em cada coluna é possível observar 4 variáveis. Em Azul, a parcela de exergia de fonte não renovável. Em laranja, a parcela de exergia de fonte renovável. Acima de cada coluna, em preto, a soma total das exergias de fonte renovável e não renovável. Por fim, em uma barra central lilás e, segundo a escala a direita da figura, a composição em kg de massa dos materiais de cada divisão.

Cabe notar que este passo é o passo que antecede a contribuição do método para auxílio ao projeto para EFV reuso. Entretanto, com base nos dados levantados e dadas as granes variações, é possível observar que a decisão não é evidente nem trivial. Quando comparamos, por exemplo, as divisões D5 e D1, observamos que em termos de exergia total a D5 é a quinta maior, entretanto, 194 vezes inferior a D1. Ao observamos as massas envolvidas, D5 é a maior com cerca de 50% do PFV, porém D1 é mais de vinte vezes inferior a D5. Ainda mais, em

termos de exergia de fontes renováveis, as divisões parecem seguir uma certa proporção e quase não se altera a ordem sugerida pela quantia de exergia total. Sendo assim, é então evidenciado que a ferramenta AHP para suporte a decisão se faz necessária para alcançar uma hierarquização que considere as quatro variáveis descritas até aqui.

Ainda sobre o Gráfico 4, indagando sobre que motivos levaram a resultados de exergia total tão mais elevados em divisões de massa tão inferiores, uma investigação preliminar foi realizada. Adicionalmente, por meio da opção *cutoff* na ferramenta SIMAPRO, ajustada para filtrar todos os valores cuja contribuição fosse inferior a 5%, resultou em um diagrama da montagem reduzido de 19.683 blocos para 11 blocos. Dessa forma foi demostrando que os capacitores, fazendo uso de *tantalum* (0,0664 kg) agregados às divisões "D1-Placa do Inverter "e "D2-Placa do painel" são os grandes responsáveis pela diferença discrepante da exergia demandada, segundo ilustra a Figura *28*.

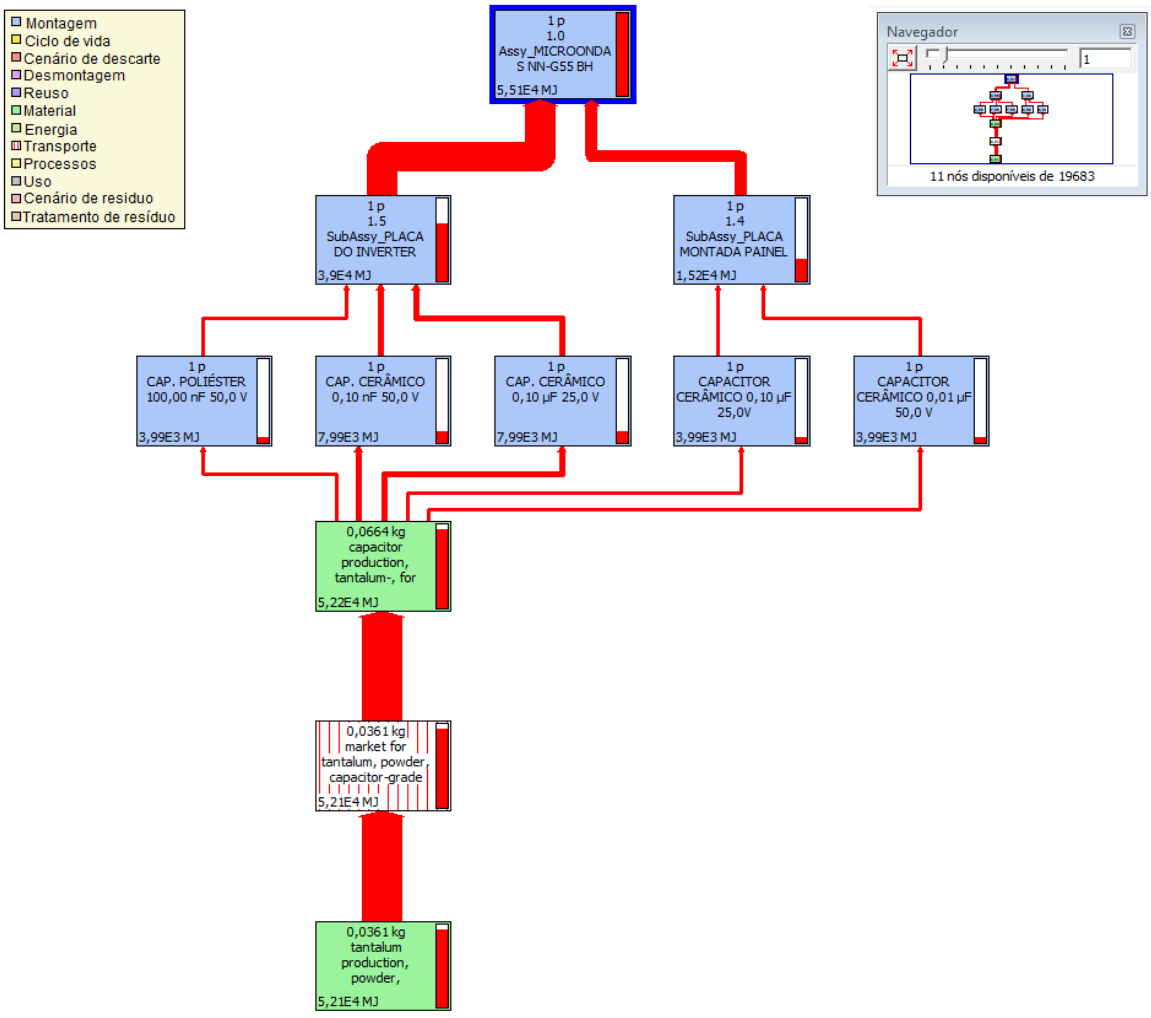


Figura 28 – Diagrama de Sankey: Exergia agregada na montagem em *cutoff* de 5%

Fonte: Adaptado da ferramenta SIMAPRO (2016).

4.4.2.6 Hierarquização das divisões do PFV para fins da EFV Reuso (Passo 6)

Para realizar a AHP, inicialmente os 4 critérios (C1) exergia de fontes não renováveis, (C2) exergia de fontes renováveis, (C3) massa material das divisões e (C4) Exergia total agregada são comparados par a par segundo a Figura *29* resultando na matriz de comparação na Equação (25).

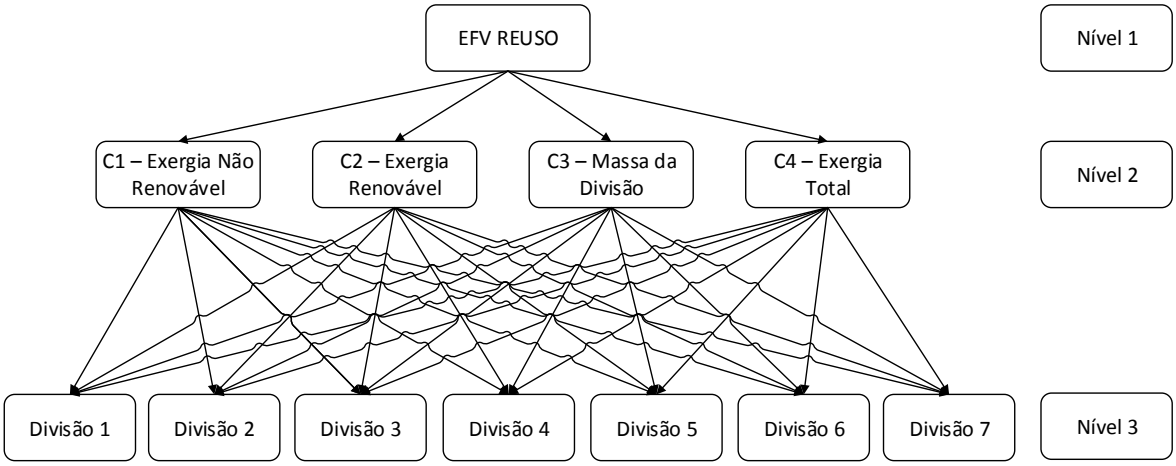


Figura 29 – Objetivo e atributos de avaliação para EFV Reuso.

Fonte: Adaptado de Hota (2012).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/7 & 1 & 1/7 \\ 7 & 1 & 3 & 1/3 \\ 1 & 1/3 & 1 & 1/5 \\ 7 & 3 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

O autovetor é então normalizado e os resultados da hierarquização dos critérios são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Hierarquização de critérios para EFV Reuso.

Critério	Descrição	Peso	Hierarquização	Consistência		
				λmax	CI	CR
C1	Exergia de fontes renováveis	6,6%	4	4,152	0,05	0,056
C2	Exergia de fontes não renováveis	28,8%	2			
C3	Massa	8,7%	3			
C4	Exergia total agregada	55,9%	1			

Fonte: Autoria própria.

Em seguida, e para cada critério, o processo é repetido pareando cada divisão em relação às demais. A matriz de comparação do critério C1 “exergia de fontes não renováveis” é obtida segundo a Equação (26).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1/3 & 1 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1/9 & 1/9 & 1 & 2 & 2 & 3 & 5 \\ 1/9 & 1/9 & 1/2 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1/9 & 1/9 & 1/2 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1/9 & 1/9 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/9 & 1/9 & 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Tabela 10 – Pareamento do critério C1 exergia de fonte não renovável.

Divisão	**Descrição**	**Peso**	**Hierarquização**	**Consistência**		
				λmax	**CI**	**CR**
D1	1.5 placa do inverter	45,4%	1	7,509	0,08	0,063
D2	1.4 placa montada painel	32,7%	2			
D3	1.7 transformador 120v / 60hz	7,3%	3			
D4	1.6 magnetron	4,6%	4			
D5	1.1 lista de peças mecânicas	4,6%	4			
D6	1.2 lista de peças da porta	3,1%	6			
D7	1.3 lista de peças do painel	2,3%	7			

Fonte: Autoria própria.

A matriz de comparação do critério C2 “exergia de fontes renováveis” é obtida segundo a Equação (27).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 2 & 3 & 2 & 8 & 9 \\ 2 & 1 & 3 & 4 & 3 & 9 & 9 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 4 & 6 \\ 1/3 & 1/4 & 1 & 1 & 1 & 3 & 4 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 3 & 5 \\ 1/8 & 1/9 & 1/4 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/9 & 1/9 & 1/6 & 1/4 & 1/5 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Tabela 11 – Pareamento do critério C2 exergia de fonte renovável.

Divisão	Descrição	Peso	Hierarquização	Consistência		
				λmax	CI	CR
D1	1.5 placa do inverter	24,3%	2			
D2	1.4 placa montada painel	35,5%	1			
D3	1.7 transformador 120v / 60hz	12,4%	3			
D4	1.6 magnetron	10,2%	5	7,084	0,01	0,01
D5	1.1 lista de peças mecânicas	11,6%	4			
D6	1.2 lista de peças da porta	3,3%	6			
D7	1.3 lista de peças do painel	2,8%	7			

Fonte: Autoria própria.

A matriz de comparação do critério C3 "massa da divisão" é obtida segundo a Equação (28).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/8 & 1/6 & 1/9 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 2 & 4 & 3 & 9 & 9 \\ 8 & 1/2 & 1 & 1 & 1 & 4 & 6 \\ 2 & 1/4 & 1 & 1 & 1 & 3 & 4 \\ 9 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 3 & 5 \\ 1 & 1/9 & 1/4 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1 & 1/9 & 1/6 & 1/4 & 1/5 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Tabela 12 – Pareamento do critério C3 massa da divisão.

Divisão	Descrição	Peso	Hierarquização	Consistência		
				λmax	CI	CR
D1	1.5 placa do inverter	5,4%	5			
D2	1.4 placa montada painel	36,4%	1			
D3	1.7 transformador 120v / 60hz	19,4%	2			
D4	1.6 magnetron	12,6%	4	7,628	0,10	0,078
D5	1.1 lista de peças mecânicas	18,4%	3			
D6	1.2 lista de peças da porta	4,2%	6			
D7	1.3 lista de peças do painel	3,5%	7			

Fonte: Autoria própria.

A matriz de comparação do critério C4 "Exergia total agregada" é obtida segundo a Equação (29).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1/3 & 1 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1/9 & 1/9 & 1 & 2 & 2 & 3 & 5 \\ 1/9 & 1/9 & 1/2 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1/9 & 1/9 & 1/2 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1/9 & 1/9 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/9 & 1/9 & 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Tabela 13 – Pareamento do critério C4 Exergia total agregada.

Divisão	Descrição	Peso	Hierarquização	Consistência		
				λmax	CI	CR
D1	1.5 placa do inverter	45,4%	1	7,509	0,08	0,063
D2	1.4 placa montada painel	32,7%	2			
D3	1.7 transformador 120v / 60hz	7,3%	3			
D4	1.6 magnetron	4,6%	4			
D5	1.1 lista de peças mecânicas	4,6%	4			
D6	1.2 lista de peças da porta	3,1%	6			
D7	1.3 lista de peças do painel	2,3%	7			

Fonte: Autoria própria.

Por fim, como resultado da matriz de julgamento, a priorização das divisões é encontrada conforme demonstrado no Gráfico 5.

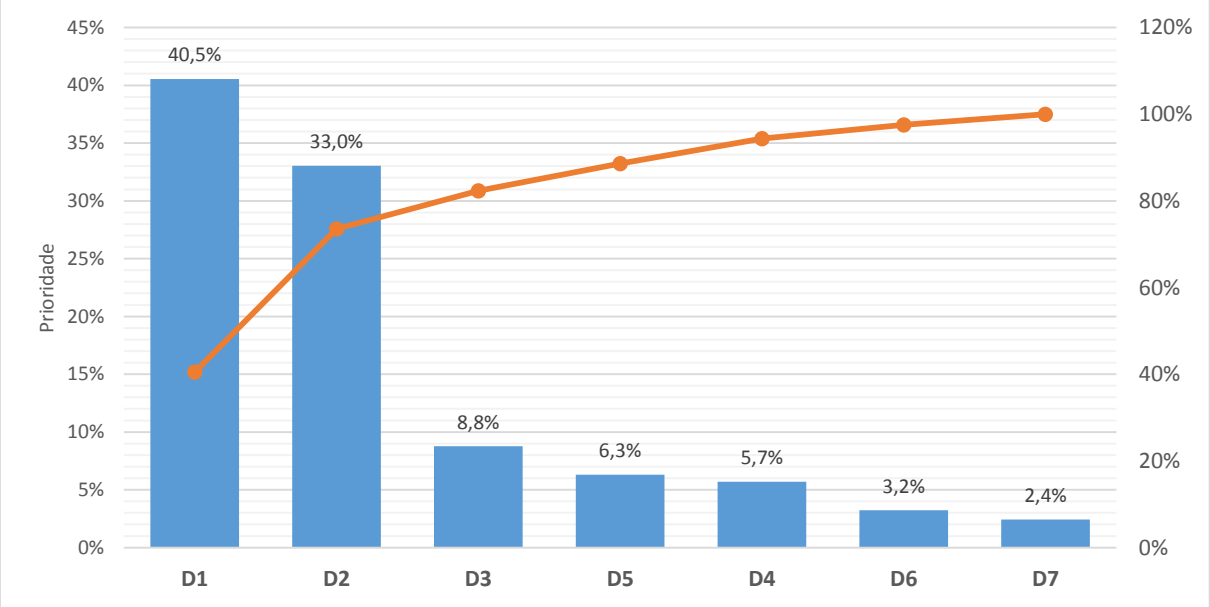


Gráfico 5 – Hierarquização das divisões para fins da EFV Reuso.

Fonte: Autoria própria.

Segundo resultados no Gráfico 5, temos as 7 divisões pré-estabelecidas já ordenadas em termos de prioridade, da maior para a menor, segundo resultados da AHP. Como interpretações mais relevantes, temos que as divisões D5 e D4 tiveram sua ordem alterada com relação ao critério exclusivo de exergia total, anteriormente demonstrado no Gráfico 4. Ainda mais, que a discrepância sugerida em termos de massa bem com de exergia foram dispersas em uma escala única e compreensível com grande atenuação das diferenças anteriores.

Por fim, conforme a curva na cor laranja, é então aplicado como critério final, o princípio de Pareto, sendo então selecionadas as divisões D1 e D2 para adoção da EFV Reuso e modelagem dos cenários a seguir. Entretanto, antes de continuar, é importante destacar que o método é concluído no que se propões a auxiliar nas decisões de um projeto visando a EFV reuso. É possível concluir que um projetista poderá, de posse dessa decisão, facilmente orientar esforços a componentes de menor massa e volume (divisões D1 e D2), em detrimento dos demais (menor importância) na forma de estratégia de durabilidade, escalabilidade, conexões rápidas e portas de acesso.

4.4.2.7 Exergia demandada para cada cenário (Passo 7)

Neste momento, fazendo uso das ferramentas e dados selecionados, serão calculadas as exergias demandadas para cada cenário segundo prescrito na seção 0, com exceção das adequações descritas a seguir, segundo características do PFV forno micro-ondas.

O Cenário 1: EFVs no contexto do *Estado da Arte* em termos de eficiência dos PRs, recebe as divisões selecionadas para Reuso segundo passo anterior.

O Cenário 2: EFVs para máxima reciclagem (máxima recuperação de materiais) e o Cenário 3: EFVs para máxima recuperação de energia, permanecem como descrito na seção 4.3.1.2. e 4.3.1.3.

O Cenário 4: EFV conforme legislação para lixo eletrônico, em cumprimento à Diretiva 2008/98/EC (2008), ressalta-se que nenhum item de natureza perigosa foi encontrado. Ainda mais, que os itens listados abaixo foram identificados no PFV forno micro-ondas como de desmontagem previa necessária à moagem, salientando que os demais foram descartados por incineração com recuperação de energia, como esforço mínimo para atendimento à norma. Os itens desmontados previamente são:

- Placas de circuitos impressos (PCBs) com área ≥ 10 cm²;
- Lâmpadas de descarga de gás; e
- Cabos elétricos externos.

Por fim, fazendo uso da ferramenta SIMAPRO (2016) os cenários foram modelados e o método de exergia CExD aplicado, obtendo o balanço de exergia demandada a cada cenário pré-estabelecido, destacando-se o total de exergia e sua caracterização quanto à exergia de fontes renováveis ou não. Os resultados são apresentados no Gráfico 6.

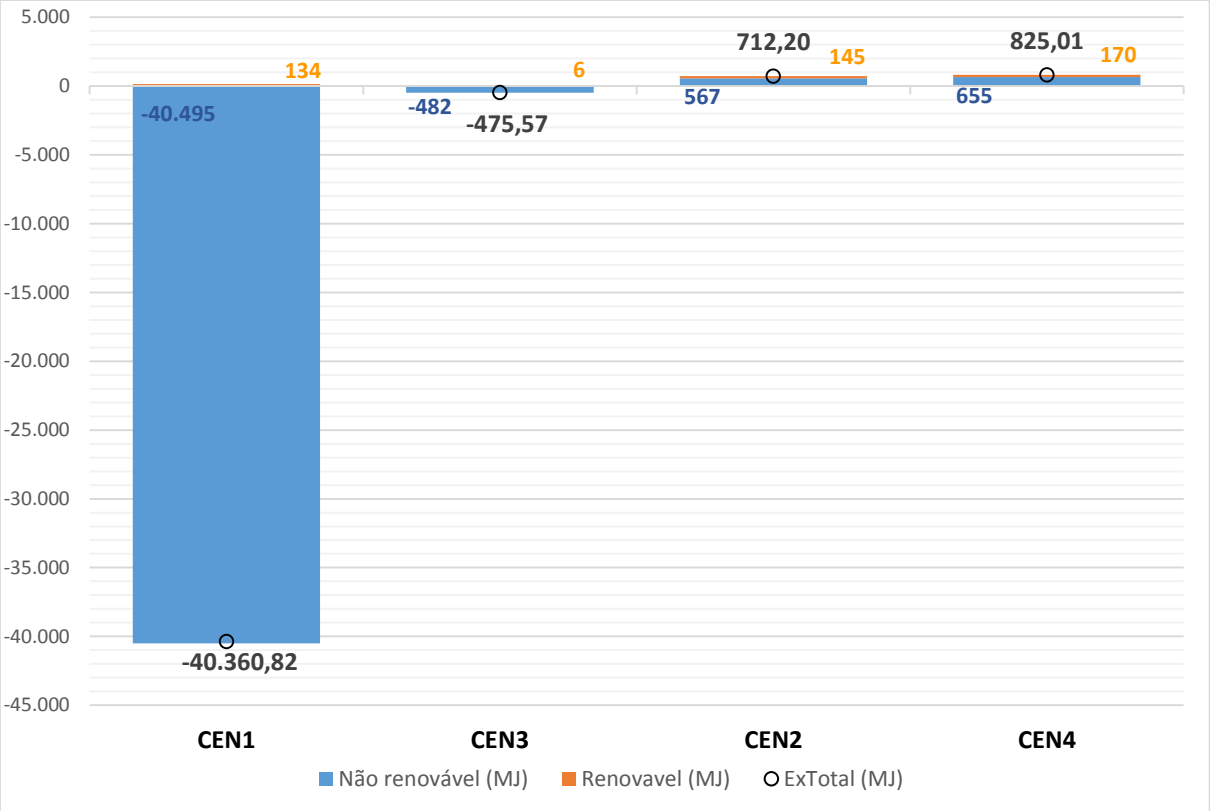


Gráfico 6 – Cenários de exergia demandada.

Fonte: Autoria própria.

Segundo demonstra o Gráfico 6, os quatro cenários são então ordenados em escala crescente de acordo com seu respectivo total de exergia. Segundo a escala a esquerda em MJ, são revelados valores negativos e positivos. Os valores negativos implicam em devolução ou economia de exergia no balanço final, enquanto valores negativos indicam destruição de exergia.

Para cada barra e mais uma vez, são consideradas, em azul, as parcelas de exergia de fontes não renováveis, seguidas em laranja, pela parcela de exergia de fonte renovável e por fim, em preto e acima de cada coluna, o total de exergia que consiste na soma das duas parcelas de exergia renovável e não renovável.

Nesse passo, algumas revelações importantes são dignas de nota. É possível verificar que a adoção da EFV Reuso, no cenário 1, provoca um grande impacto na exergia demandada porém, o balanço indica que uma parte foi consumida nos processos, já que o valor final é inferior àquele valor de exergia agregada originalmente na soma das divisões D1 e D2 selecionadas para reuso e quantificadas no Gráfico 4. Nos cenários 1 e 3, existe economia de exergia, enquanto nos demais, dada a imposição exaustiva de processos de desmontagem e tentativas de separação, resultam em maior consumo que devolução de exergia.

Por fim, ainda que em termos de exergia de fonte não renovável os resultados pareçam óbvios, poderão existir certos PFVs que, dada a sua configuração, terão parcelas variadas das exergias envolvidas, e assim, como no caso do Gráfico 4, a AHP é mais uma vez aplicada.

4.4.2.8 Aplicação da AHP a cada cenário (Passo 8)

Para realizar a AHP, inicialmente os 3 critérios (C1) exergia de fontes não renováveis, (C2) exergia de fontes renováveis, e (C3) Exergia total agregada são comparados par a par segundo a Figura *30*. É importante notar que a variável massa (kg) já não faz parte dos cálculos uma vez que ela é a mesma, ou seja, que o PFV é o mesmo em todos os cenários. Os resultados da comparação que visa atribuir peso a cada variável é então demonstrado na matriz de comparação na Equação (30).

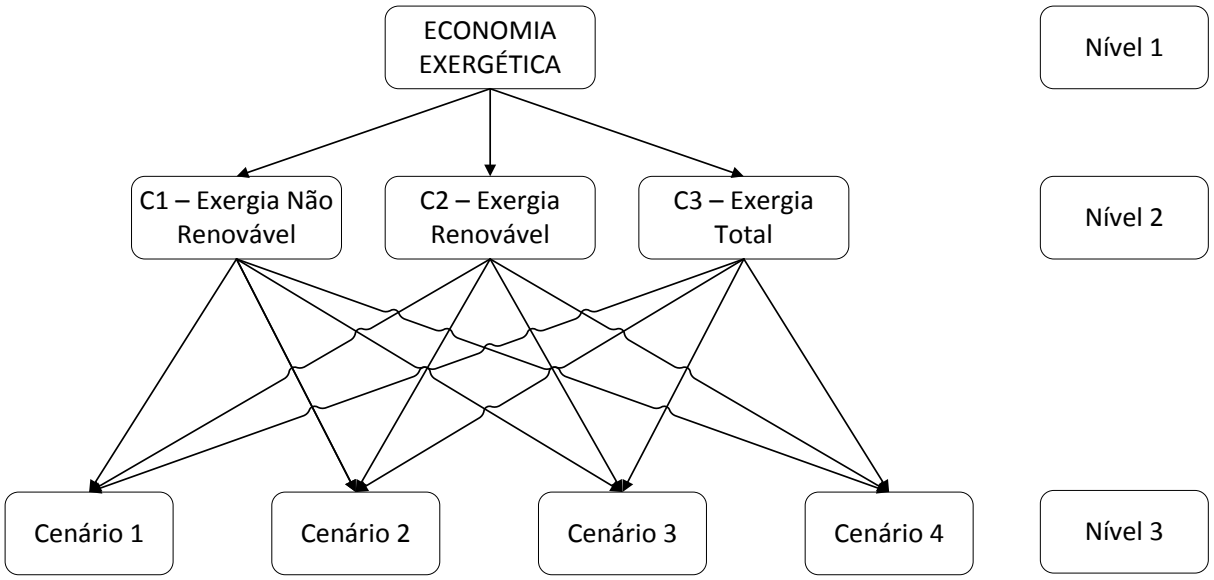


Figura 30 – Objetivo e atributos de avaliação para cenários.

Fonte: Autoria própria.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1/4 \\ 1/4 & 1 & 1/7 \\ 4 & 7 & 1 \end{bmatrix} \tag{30}$$

O autovetor é então normalizado e os resultados da hierarquização dos critérios são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Hierarquização de critérios para cenários de fim de vida.

Critério	**Descrição**	**Peso**	**Hierarquização**	**Consistência**		
				λmax	**CI**	**CR**
C1	Exergia de fontes renováveis	22,9%	2			
C2	Exergia de fontes não renováveis	7,5%	3	3,076	0,04	0,08
C3	Exergia total agregada	69,6%	1			

Fonte: Autoria própria.

Em seguida e para cada critério, o processo é repetido pareando cada cenário em relação aos demais. A matriz de comparação do critério C1 “exergia de fontes não renováveis” é obtida segundo a Equação (31).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 9 & 7 & 9 \\ 1/9 & 1 & 1/2 & 1 \\ 1/7 & 2 & 1 & 1/2 \\ 1/9 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Tabela 15 – Pareamento do critério C1 exergia de fonte não renovável para cenários.

Cenário	Descrição	Peso	Hierarquização	Consistência		
				λmax	CI	CR
CEN1	Cenário 1: EFVs no contexto do *Estado da Arte* em termos de eficiência dos PRs	72,2%	1	4,194	0,06	0,071
CEN2	Cenário 2: EFVs para máxima reciclagem (máxima recuperação de materiais)	7,4%	4			
CEN3	Cenário 3: EFVs para máxima recuperação de energia	9,6%	3			
CEN4	Cenário 4: EFV conforme legislação para lixo eletrônico	10,8%	2			

Fonte: Autoria própria.

A matriz de comparação do critério C2 "exergia de fontes renováveis" é obtida segundo a Equação (32).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 9 & 1/2 & 9 \\ 1/9 & 1 & 1/8 & 2 \\ 2 & 8 & 1 & 9 \\ 1/9 & 1/2 & 1/9 & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Tabela 16 – Pareamento do critério C2 exergia de fonte renovável para cenários.

Cenário	Descrição	Peso	Hierarquização	Consistência		
				λmax	CI	CR
CEN1	Cenário 1: EFVs no contexto do *Estado da Arte* em termos de eficiência dos PRs	37,9%	2	4,1	0,04	0,045
CEN2	Cenário 2: EFVs para máxima reciclagem (máxima recuperação de materiais)	6,1%	3			
CEN3	Cenário 3: EFVs para máxima recuperação de energia	51,9%	1			

CEN4	Cenário 4: EFV conforme legislação para lixo eletrônico	4,2%	4

Fonte: Autoria própria.

A matriz de comparação do critério C3 “exergia total” é obtida segundo a Equação (33).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 9 & 9 & 9 \\ 1/9 & 1 & 1/2 & 2 \\ 1/9 & 2 & 1 & 1 \\ 1/9 & 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Tabela 17 – Pareamento do critério C3 exergia total para cenários.

Cenário	**Descrição**	**Peso**	**Hierarquização**	**Consistência**		
				λmax	**CI**	**CR**
CEN1	Cenário 1: EFVs no contexto do *Estado da Arte* em termos de eficiência dos PRs	73,9%	1	4,186	0,06	0,068
CEN2	Cenário 2: EFVs para máxima reciclagem (máxima recuperação de materiais)	8,7%	3			
CEN3	Cenário 3: EFVs para máxima recuperação de energia	10,3%	2			
CEN4	Cenário 4: EFV conforme legislação para lixo eletrônico	7,2%	4			

Fonte: Autoria própria.

Por fim, como resultado da matriz de julgamento, a priorização das divisões é encontrada conforme demonstrado no Gráfico 7, onde o cenário 1 é apontado como a melhor escolha.

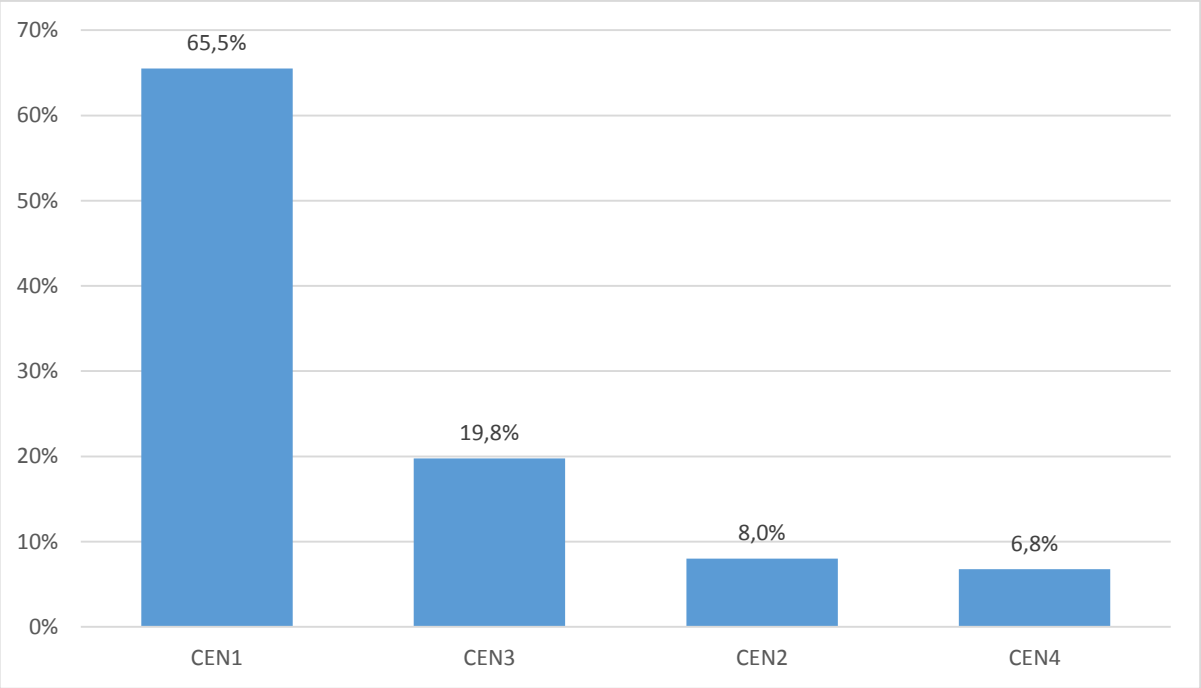


Gráfico 7 – Priorização de cenários via AHP.

Fonte: Autoria própria.

4.5 AVALIAÇÃO (ATIVIDADE 9)

A seguir são explicitados, os julgamentos de avaliação do artefato para em seguida evidenciar os resultados em relação aos critérios ou métricas inicialmente projetadas na seção 3.3.1. Cabe notar que existem e serão apresentadas avaliações qualitativas, realizadas exclusivamente pelo autor do texto e, portanto, sujeitas a limitações de viés.

Os resultados são apresentados para cada critério em uma escala linear que o posiciona a avaliação entre “forças” ou “limitações”, segundo o Quadro *14*, salientando-se que os itens classificados em uma escala menor que zero (limitações), representam segundo a DRS, oportunidades de ajustes.

Em suma, ainda que as conclusões sejam limitadas ao julgamento exclusivo do autor, é possível concluir com razoável incerteza que o método tende a possuir mais forças, que limitações. Sendo assim, poderia portanto ser considerado suficientemente maduro, para ser aplicado a um número maior de PFVs, bem como ser avaliado por um painel de especialistas a fim de, portanto, consolidar sua validação.

Critério	Julgamento	← Forças					Limitações →					
		+5	+4	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	-4	-5
Comparação	A maioria dos métodos para seleção de EFVs baseia-se em impactos ambientais, aspectos técnicos ou mercadológicos e para a maioria destes, uma ampla variedade de critérios e caracterizações são possíveis tornando difícil sua interpretação ou comparação. Nesse sentido a avaliação por exergia mostra-se valiosa por integrar em uma única variável, aspectos ambientais e econômicos, além de integrar a ineficiência dos processos que levam às práticas das EFVs, portanto reduzindo o viés de interpretação.	✓										
Validação	Segundo demonstrado no estudo do PFV de referência, o RIPEx mostra-se viável porém, sua aplicação em um portfólio maior e mais variado de PFVs permitiria maior certeza de sua validade.							✓				
Minimalismo	Sua estrutura conceitual é simples porém, ao incorporar bases de dados de ACV e ferramentas de cálculo, nota-se que seus desdobramentos, sobretudo na fase de levantamento de dados, podem ser complexos.							✓				
Utilidade	O resultado obtido até a exergia das divisões é útil para orientar a fase de projeto de produto (i.e. substituir ou reduzir o número de capacitores no PFV de referência) e, no fim de vida, mostra-se útil para identificar componentes mais relevantes para a EFV Reuso com impactos expressivos nos cenários de fim de vida.	✓										
Eficácia (*Bom para*)	O RIPEx produz resultados claros ao longo de sua execução e não deixa dúvidas sobre as decisões apontadas.		✓									
Eficiência (*Rapidez*)	Ao incorporar ferramentas de metodologias conhecidas (ACV e AHP), torna-se possível obter resultados de forma relativamente rápida quando aplicado por usuários com alguma experiência previa sobre tais ferramentas.					✓						
Precisão	Lida majoritariamente com dados robustos e quantitativos e quando atinge questões qualitativas, lança mão da AHP para mitigar limitações e vieses de interpretação humana, logo é possível presumir que seja preciso.		✓									
Representação da realidade	Ao fazer uso de uma base de dados robustos e com representatividade e incertezas tratadas conforme normas internacionais tais como a ISO 14040 (2006), é possível sugerir que os resultados são uma boa aproximação da realidade.		✓									
Flexibilidade	O exercício de aplicação do RIPEx não revelou indícios de nenhum tipo de obstáculo para a aplicação do método em quaisquer tipos de PFV bem como na criação de variantes de divisões e cenários caso se julguem necessários.		✓									

Quadro 14 – Quadro de avaliação do método RIPEx.

Fonte: Autoria própria.

4.6 DISCUSSÃO

Foi possível compreender ao longo do trabalho que a variedade da literatura, em suas diversas abordagens e resultados sugerem que não existe uma estratégia de fim de vida genérica ou de desempenho ideal. Ainda mais, que seu modelamento é altamente dependente das características do PFV bem como dos propósitos adotados e da tecnologia envolvida no PFV bem como nos PRs disponíveis.

A disponibilidade de dados robustos de exergia, dos diversos PRs na base de dados do Ecoinvent mostrou-se vital e, sem a qual, não seria possível realizar esta pesquisa. Nesse sentido, cabe ressaltar que a pesquisa não revelou outras bases de dados dispondo de dados dessa natureza e, portanto, configura uma fragilidade mas também uma oportunidade. Em contrapartida, o processo de avaliação induziu a uma verificação que demonstrou terem sido usados menos de 100 *datasets* diretos entre materiais e processos, entretanto, o uso do recurso *cutoff* ao longo dos cálculos, permitiu estimar que 70% da exergia demandada concentra-se em menos da metade dos *datasets*. Tal fato que permite sugerir que uma ferramenta contendo um banco de dados simplificado seja viável e ainda assim representativa para a abordagem por exergia. Se confirmado, isso seria particularmente útil em superar a dificuldades de acesso às bases de dados e softwares que não são de domínio público bem como incentivar a prática da abordagem por exergia.

Revelam-se ainda um importante aprendizado, identificar os principais obstáculos para com as práticas de reciclagem tais como barreiras técnicas quanto a capacidade de separação e pureza dos materiais obtidos, barreiras financeiras e mercadológicas quanto à viabilidade da reciclagem como negócio que visa lucro e por fim, do desafio que o comportamento humano de consumo impõe aumentando os níveis de resíduos. Sobre os aspectos que parecem fomentar a reciclagem, notam-se de maneira mais efetiva a legislação, sobretudo acompanhada da devida infraestrutura presente apenas nos países desenvolvidos, seguidos pela preocupação da academia e uma crescente porém contraditória, preocupação da opinião pública que aparenta desejar produtos sustentáveis mas não abandona velhos hábitos de consumo.

Sobre tais aspectos, sejam de fomento ou de barreira, é possível reconhecer que este trabalho, como proposto, lida de forma direta com aspectos de eficiência técnica e ambiental e, indiretamente, com aspectos financeiros, porém, para este último não explorado e que poderia ser agregado ao RIPEx, juntamente com aspectos mercadológicos.

5 CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES

Esse capítulo apresenta as contribuições e conclusões resultantes da pesquisa enquanto possíveis implicações e respectivos interessados são destacados e o método é sumarizado.

No que diz respeito ao objetivo principal, este trabalho cumpre sua maior meta à medida em que desenvolve e aplica um método que utiliza como como indicador de eficiência, a avaliação da demanda exergética resultante dos processos de reciclagem. Eficiência esta, claramente influenciada pelo desenho das estratégias de fim de vida. O desdobramento do objetivo principal e o cumprimento dos objetivos específicos, na forma de suas atividades baseadas na DSR, mostram-se eficazes na construção do método. Este, por sua vez, demonstrou estar apto a avaliar a composição de processos de reciclagem em diferentes cenários de fim de vida.

De forma sintetizada, o método proposto faz uso de características do PFV bem como dos processos industriais, de natureza fabril ou com intenções de reciclagem, para avaliar e orientar decisões nas fases de projeto de produtos e processos, bem como no momento de decidir o destino do PFV onde EFVs não tenham sido pré-estabelecidas.

Seu mérito maior reside no uso do conceito de exergia e na sua capacidade multidisciplinar de indicar eficiência técnica, impacto ambiental e potencial valor financeiro agregado ou perdido, este último, permitindo intuir à viabilidade da reciclagem ou reuso enquanto negócio com fins lucrativos. Dada tal multidisciplinaridade, ao contrário de outros métodos que buscam convergir diferentes indicadores, este, ao fazer uso da exergia, permite derivar seus resultados.

Ainda mais, o fato de fazer uso de um indicador único e em dois momentos, abre a oportunidade para um método despretensioso que admite, desde já, que sua aplicação mais ampla e em diferentes momentos abre oportunidade para ciclos de retroalimentação de informações e respectivo aprimoramento do método quanto às fraquezas já apontadas, quanto à integração de novos critérios via AHP ou adição de cenários padronizados além dos quatro propostos inicialmente.

O processo e construção do método, por si mesmo, faz duas importantes contribuições. A primeira, ao escrutinar a literatura pelo método bibliométrico e entregar ao leitor os processos de reciclagem tidos como os mais eficientes e disponíveis com a tecnologia atual, permite que este, mesmo que sem aplicar o método aqui proposto, avalie

se os seus processos de reciclagem fazem uso das melhores tecnologias e práticas possíveis. A segunda, ao resgatar cenários prováveis, relevantes e suficientemente diferentes entre si, permite sugerir como um dado PFV poderia ser melhor tratado.

A pesquisa faz uma contribuição indireta, porém importante, quando devidamente caracteriza o PFV forno micro-ondas. Ao fornecer ao leitor informações suficientes para permitir comparar PFVs de composição semelhante, faz uma contribuição prática, uma vez que permite estimar que outros PFVs possam ter resultados equiparáveis aos dessa atividade e assim, tomar decisões com base nesse estudo, sem que tenha que aplicar o método.

Os resultados, de forma geral, fazem contribuições relevantes quando desafiam o senso comum em dois momentos. O primeiro, quando demonstra que a massa ou volume de resíduo, dado o incomodo natural que provocam aos nossos olhos, não deveria ser o critério principal para priorizar a composição de um produto ou o tratamento de resíduos para fins de eficiência ou sustentabilidade, uma vez que discrepâncias importantes foram reveladas quanto à exergia agregada. Em segundo, caracterizam a hierarquização clássica das EFVs para fins de sustentabilidade, mais como uma sequência de etapas e processos do que propriamente estratégias mais eficientes. O método reitera de forma marcante a hierarquia clássica das EFVs no que diz respeito à importância do Reuso, ao mesmo tempo em que desafia a ordem proposta para outras EFVs, haja vista que a hierarquização revelada foi reuso, descarte por incineração com recuperação de energia, reciclagem sem desmontagem e por fim reciclagem com desmontagem, como sugere a legislação adotada.

Por fim, o método dá um passo além da abordagem clássica por exergia, quando ressalta atributos da exergia quanto à sua fonte renovável ou não. Para julgar tais características de forma consistente, integra um método consolidado de decisão, a AHP, largamente aceito e praticado para a avaliação de cenários para fins energéticos ou ambientais, logo semelhantes aos dessa pesquisa.

No que diz respeito às repercussões frente aos diferentes e possíveis interessados nos resultados desse trabalho, cabe destacar os três mais importantes.

Na indústria, podem contribuir com o projeto de produtos ou suportando o processo decisório em dois momentos chave. Ainda mais, estando devidamente elaborados e quantificados o PFV de referência, bem como os diferentes cenários, estes permitirão sugerir, de forma análoga e sem a necessidade de cálculos adicionais, quais EFVs ou modelagens de processos de reciclagem podem resultar em uma estratégia

global de reciclagem exergeticamente mais eficiente. Do ponto de vista prático, dá um passo no sentido de remediar a lacuna evidenciada na ausência de aplicação da abordagem por exergia, quando destinada a avaliar os processos de reciclagem, sobretudo na fase de projeto, atribuída ao desconhecimento da amplitude do indicador de exergia, bem como de métodos ou ferramentas de apoio que viabilizem sua prática.

No que diz respeito a entidades legislativas e governamentais, os resultados demonstram que a legislação avaliada, paradoxalmente visando a sustentabilidade, encontra-se em dissonância com as regras estabelecidas. É importante notar que metas futuras visando o aumento da EVF Reuso parecem ser, do ponto de vista exergético, acertadas, porém, os critérios estabelecidos ainda são vagos. O RIPEx poderia ser aplicado para elaborá-los e assegurar melhores resultados.

Do ponto de vista acadêmico, justifica-se por não haver sido encontrada na literatura escrutinada, nenhum estudo que tenha avaliado e valorado, por meio da abordagem de exergia, a eficiência nos processos de reciclagem e seu impacto sobre as inúmeras EFVs. Por fim, faz contribuições nesta área quando identifica e sugere oportunidades de pesquisa a serem apresentadas a seguir.

A revisão de bibliométrica para o estado da arte dos PRs, revelou a elevada dificuldade para a recuperação de polímeros frequentemente interrompida no estágio *fluff*. Em contrapartida, o segundo melhor desempenho encontrado está no cenário 3 (incineração com recuperação de energia), fato que permite sugerir que uma pesquisa aprofundada sobre essa questão, por meio da abordagem por exergia, potencialmente resultaria em uma quebra de paradigma quanto à reciclagem da classe de materiais plásticos. Se confirmada, essa classe de materiais poderia ser definida como combustível em estado intermediário, logo orientado em 100% dos casos à incineração dado seu alto poder calorífico, recuperando exergia ao invés de destruí-la tentando separar suas inúmeras variantes dessa classe de materiais.

O método traz evidência quantitativa do potencial EFV Reuso, fazendo do cenário escolhido o melhor cenário por uma magnitude exergética da ordem de 84 vezes frente ao segundo melhor, corroborando com a visão de Dincer; Rosen (2012, p. 646) em termos de proporção dos benefícios da abordagem por exergia e sugerindo a intensificação dos esforços de pesquisa para estratégias que viabilizem essa prática tais como modularidade, durabilidade, projeto para desmontagem, entre outras, possivelmente em detrimento de pesquisas que, fazendo uso da tecnologia corrente, visem aumentar a eficiência dos processos de reciclagem (i.e. separação de plásticos), ou seja,

seria válido se fossem desenvolvidas tecnologias disruptivas sobre a premissa de serem muito mais eficientes.

Fora observado que a exergia da mão de obra (i.e. desmontagem manual), altamente relevante quando se objetiva a EFV Reuso, considera apenas a exergia demandada pela infraestrutura dos locais de tratamento. Tal fato abre oportunidade de pesquisa e aprimoramento dos *datasets* a fim de verificar o real impacto exergético da atividade humana nos PRs e sobretudo das EFVs dependentes desse processo.

Centros de reciclagem, contendo as melhores tecnologias e práticas são encontrados apenas em países desenvolvidos, permitindo sugerir um desempenho ainda menor em países subdesenvolvidos, uma vez que se assume que, comumente, esses têm à disposição, tecnologias inferiores ou obsoletas.

A exergia demandada na cadeia de logística reversa obteve um resultado pouco expressivo na somatória dos cenários e merece investigações mais aprofundadas para confirmar seu real impacto. Uma vez que o seu baixo impacto seja confirmado, isso poderia colaborar no desenvolvimento de políticas públicas ou privadas orientadas para construção de poucos, porém grandes e modernos centros de tratamento de resíduo, mesmo que a grandes distâncias dos centros geradores de resíduos.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do arcabouço científico escrutinado, esse trabalho aparenta ser pioneiro no uso da exergia para fins de projeto e decisão de estratégias de fim de vida.

O método mostra-se capaz de desafiar crenças à muito estabelecidas e guiar decisões de forma estruturada em fases cruciais, auxiliando projetistas, recicladores e entidades legislativas em busca de práticas de reciclagem mais eficientes e verdadeiramente próximas da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

AL-SALEM, S.; LETTIERI, P.; BAEYENS, J. The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: From re-use to energy and chemicals. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 1, p. 103-129, 2010.

ALLEN, K. R.; CARLSON-SKALAK, S. Defining product architecture during conceptual design. In: **1998 ASME Design Engineering Technical Conference, Atlanta, GA, Vol.** 1998.

ALLWOOD, J. M.; ASHBY, M. F.; GUTOWSKI, T. G.; WORRELL, E. Material efficiency: a white paper. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 3, p. 362-381, 2011.

ALONSO, J. A.; LAMATA, M. T. CONSISTENCY IN THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS: A NEW APPROACH. **International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems**, v. 14, n. 04, p. 445-459, 2006.

ALSTON, S. M.; ARNOLD, J. C. Environmental impact of pyrolysis of mixed WEEE plastics part 2: Life cycle assessment. **Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 21, p. 9386-9392, 2011.

ALVES, L. Basic chemically recuperated gas turbines?power plant optimization and thermodynamics second law analysis. **Energy**, v. 29, n. 12-15, p. 2385-2395, 2004.

AMINI, S. H.; REMMERSWAAL, J. A. M.; CASTRO, M. B.; REUTER, M. A. Quantifying the quality loss and resource efficiency of recycling by means of exergy analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 10, p. 907-913, 2007.

ANDRITZ. **WEEE treatment facility**: secondary title, 2016.

APRA. Automotive Parts Rebuilders Association. 2016. Disponível em: <https://apra.org/?page=Remanufacturing>. Acesso em: 27 fev. 2016.

ARAGONÉS-BELTRÁN, P.; CHAPARRO-GONZÁLEZ, F.; PASTOR-FERRANDO, J.; RODRÍGUEZ-POZO, F. An ANP-based approach for the selection of photovoltaic solar power plant investment projects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 249-264, 2010.

ARAÚJO, R. F.; ALVARENGA, L. A bibliometria na pesquisa científica da pós-graduação brasileira de 1987 a 2007. **Encontros Bibli: revista eletrônica de biblioteconomia e ciência da informação**, v. 16, n. 31, p. 51-70, 2011.

ASPEN PLUS®. Aspen Plus chemical process optimization software. **AspenTech**, v., n., p., 2011.

AYRES, R. U.; AYRES, L. W.; MARTINÁS, K. Exergy, waste accounting, and life-cycle analysis. **Energy**, v. 23, n. 5, p. 355-363, 1998.

AYRES, R. U. The second law, the fourth law, recycling and limits to growth. **Ecological Economics**, v. 29, n. 3, p. 473-483, 1999.

BAEHR, H. D. Energie und Exergie: die Anwendung des Exergiebegriffs in der Energietechnik: p. 1965.

BALKENENDE, A.; BAKKER, C. Developments and Challenges in Design for Sustainability of Electronics. In: **Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems: Proceedings of the 22nd ISPE Inc. International Conference on Concurrent Engineering, July 20-23, 2015, Vol. 2** 2015.

BEGIĆ, F.; AFGAN, N. H. Sustainability assessment tool for the decision making in selection of energy system—Bosnian case. **Energy**, v. 32, n. 10, p. 1979-1985, 2007.

BERTOLDI, P.; REZESSY, S.; OIKONOMOU, V. Rewarding energy savings rather than energy efficiency: Exploring the concept of a feed-in tariff for energy savings. **Energy Policy**, v. 56, n., p. 526-535, 2013.

BHAMRA, T. Planning and Optimisation to Facilitate Disassembly in a Recycling Oriented Manufacturing System. In: Kochhar, A. K., Atkinson, J., *et al* (Ed.). **Proceedings of the Thirty-Second International Matador Conference**. London: Macmillan Education UK, 1997, p.85-90.

BOK, C.; NILSSON, J.; MASUI, K.; SUZUKI, K.; ROSE, C.; LEE, B. H. An international comparison of product end-of-life scenarios and legislation for consumer electronics. In: **Electronics and the Environment, 1998. ISEE-1998. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on, Vol.** 1998.

BOKS, C.; KROLL, E.; BROUWERS, W.; STEVELS, A. Disassembly modeling: two applications to a Philips 21" television set. In: **Electronics and the Environment, 1996. ISEE-1996., Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on, Vol., 6-8 May 1996**. 1996.

BOKS, C.; TEMPELMAN, E. Future disassembly and recycling technology: results of a Delphi study. **Futures**, v. 30, n. 5, p. 425-442, 1998.

BOOTHROYD, G.; ALTING, L. Design for Assembly and Disassembly. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 41, n. 2, p. 625-636, 1992.

BÖSCH, M. E.; HELLWEG, S.; HUIJBREGTS, M. A. J.; FRISCHKNECHT, R. Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, n. 3, p. 181-190, 2006.

BOTSH, M.; KOHNLECHNER, R. Electrostatic separation and its industrial application for the processing of different mixtures of recycling materials. In: **Proceedings of the XX International Mineral Processing Congress, Vol. 5** 1997.

BOUGHTON, B. Evaluation of shredder residue as cement manufacturing feedstock. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 51, n. 3, p. 621-642, 2007.

BRAM, S.; DE RUYCK, J. Exergy analysis tools for Aspen applied to evaporative cycle design. **Energy Conversion and Management**, v. 38, n. 15–17, p. 1613-1624, 1997.

BUEKENS, A.; ZHOU, X. Recycling plastics from automotive shredder residues: a review. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 16, n. 3, p. 398-414, 2014a.

BUEKENS, A.; YANG, J. Recycling of WEEE plastics: a review. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 16, n. 3, p. 415-434, 2014b.

BUWAL. **Kapazität und Auslastung der KVA in der Schweiz im Jahre 2000.** Berne, Switzerland: BUWAL, 13.12.2001
CARNOT, S. Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à dévelopер atte puissance: p. 1824.

CARPENTER, M. A.; SANDERS, W. G. Strategic management: a dynamic perspective, concepts and cases: p. 2006a.

CARPENTER, M. A.; SANDERS, W. G. **Strategic management: a dynamic perspective, concepts and cases**: secondary title, 2006b.

CASTRO, M.; REMMERSWAAL, J.; REUTER, M.; BOIN, U. A thermodynamic approach to the compatibility of materials combinations for recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 43, n. 1, p. 1-19, 2004.

CASTRO, M.; REMMERSWAAL, J.; BREZET, J.; REUTER, M. Exergy losses during recycling and the resource efficiency of product systems. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 2, p. 219-233, 2007.

CASTRO, M. B. G.; REMMERSWAAL, J. A. M.; BREZET, J. C.; REUTER, M. A. Exergy losses during recycling and the resource efficiency of product systems. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 2, p. 219-233, 2007.

CAVALLARO, F. An integrated multi-criteria system to assess sustainable energy options: An application of the PROMETHEE method. **European Journal of Operational Research**, v. 182, n. 2, p. 844-855, 2005.

CHAN, A. H.; KWOK, W.; DUFFY, V. G. Using AHP for determining priority in a safety management system. **Industrial Management & Data Systems**, v. 104, n. 5, p. 430-445, 2004.

CIMPAN, C.; MAUL, A.; JANSEN, M.; PRETZ, T.; WENZEL, H. Central sorting and recovery of MSW recyclable materials: A review of technological state-of-the-art, cases, practice and implications for materials recycling. **J Environ Manage**, v. 156, n., p. 181-199, 2015.

CLEGG, A. J.; WILLIAMS, D. J.; UZSOY, R. Production planning for companies with remanufacturing capability. In: **Electronics and the Environment, 1995. ISEE.,**

Proceedings of the 1995 IEEE International Symposium on, Vol., 1-3 May 1995. 1995.

COMMISSION, B. **Our common future: Report of the World Commission on Environment and Development.** 1987.

CORNELISSEN, R. L.; HIRS, G. G. The value of the exergetic life cycle assessment besides the LCA. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 9, p. 1417-1424, 2002.

COSSU, R.; LAI, T. Automotive shredder residue (ASR) management: An overview. **Waste Management**, v. 45, n., p. 143-151, 2015.

CRAIG, P. P. Energy limits on recycling. **Ecological Economics**, v. 36, n. 3, p. 373-384, 2001.

CUI, J.; FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. **Journal of hazardous materials**, v. 99, n. 3, p. 243-263, 2003.

CUI, J.; FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. **J Hazard Mater**, v. 99, n. 3, p. 243-263, 2003.

DARRIEUS, G. Définition du rendement thermodynamique des turbines a vapeur. **Rev. General de l'Electricit**, v. 27, n. 1, p. 963-968, 1930.

DAY, M.; GRAHAM, J.; LACHMANSINGH, R.; CHEN, E. Characterization of auto shredder residue — a Canadian perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 9, n. 4, p. 255-279, 1993.

DE JONG, T. P. R.; DALMIJN, W. L. Improving jigging results of non-ferrous car scrap by application of an intermediate layer. **International Journal of Mineral Processing**, v. 49, n. 1–2, p. 59-72, 1997.

DE OLIVEIRA JR, S. Exergy and Renewability Analysis of Liquid Biofuels Production Routes. In: (Ed.). **Exergy**: Springer, 2013, p.215-236.

DENG, W. J.; LOUIE, P. K. K.; LIU, W. K.; BI, X. H.; FU, J. M.; WONG, M. H. Atmospheric levels and cytotoxicity of PAHs and heavy metals in TSP and PM2.5 at an electronic waste recycling site in southeast China. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 36, p. 6945-6955, 2006.

DERKS, J.; MOSKALA, R.; SCHNEIDER-KUEHN, U. Nassaufbereitung von Bauschutt mit Schwingsetzmaschinen. **Aufbereitungs-Technik**, v. 38, n. 3, p. 139-143, 1997.

DEWULF, J.; BÖSCH, M. E.; MEESTER, B. D.; VORST, G. V. D.; LANGENHOVE, H. V.; HELLWEG, S.; HUIJBREGTS, M. A. J. Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE): a comprehensive Life Cycle Impact Assessment method for resource accounting. **Environmental Science & Technology**, v. 41, n. 24, p. 8477-8483, 2007.

DEWULF, J.; VAN LANGENHOVE, H.; MUYS, B.; BRUERS, S.; BAKSHI, B. R.; GRUBB, G. F.; PAULUS, D. M.; SCIUBBA, E. Exergy: Its Potential and Limitations in Environmental Science and Technology. **Environmental Science & Technology**, v. 42, n. 7, p. 2221-2232, 2008.

DEWULF, J. P.; VAN LANGENHOVE, H. R. Quantitative assessment of solid waste treatment systems in the industrial ecology perspective by exergy analysis. **Environmental science & technology**, v. 36, n. 5, p. 1130-1135, 2002.

DHOUIB, D.; ELLOUMI, S. A new multi-criteria approach dealing with dependent and heterogeneous criteria for end-of-life product strategy. **Applied Mathematics and Computation**, v. 218, n. 5, p. 1668-1681, 2011.

DINCER, I.; CENGEL, Y. A. Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering. **Entropy**, v. 3, n. 3, p. 116-149, 2001.

DINCER, I.; ROSEN, M. A. Exergy: energy, environment and sustainable development: p. 2012.

DINCER, I.; MIDILLI, A.; KUCUK, H. Progress in exergy, energy, and the environment: p. 2014.

DIRETIVA 2000/53/EC. Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of life vehicles - Commission Statements. **Official Journal of the European Union L**, v. 269, n., p. 34-43, 2012.

DIRETIVA 2008/98/EC. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance). **Official Journal of the European Union**, v. 312, n., p. 3–30, 2008.

DIRETIVA 2012/19/EU. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment, WEEE. **Official Journal of the European Union L**, v. 197, n., p. 38-71, 2012.

DODBIBA, G.; SADAKI, J.; OKAYA, K.; SHIBAYAMA, A.; FUJITA, T. The use of air tabling and triboelectric separation for separating a mixture of three plastics. **Minerals Engineering**, v. 18, n. 15, p. 1350-1360, 2005.

DOKA, G. **Life cycle inventories of waste treatment services.** Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, December 2007.

DUFLOU, J. R.; SELIGER, G.; KARA, S.; UMEDA, Y.; OMETTO, A.; WILLEMS, B. Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 57, p. 583–600, 2008.

DUFLOU, J. R.; SUTHERLAND, J. W.; DORNFELD, D.; HERRMANN, C.; JESWIET, J.; KARA, S.; HAUSCHILD, M.; KELLENS, K. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 61, n. 2, p. 587-609, 2012.

DWIVEDY, M.; MITTAL, R. K. Willingness of residents to participate in e-waste recycling in India. **Environmental Development**, v. 6, p. 48-68, 2013.

ECOINVENT, C. D. **The Ecoinvent Database**: secondary title, 2016.

EDUARDO TASCA, J.; ENSSLIN, L.; ROLIM ENSSLIN, S.; BERNARDETE MARTINS ALVES, M. An approach for selecting a theoretical framework for the evaluation of training programs. **Journal of European Industrial Training**, v. 34, n. 7, p. 631-655, 2010.

EES®. EES: Engineering equation solver for the Microsoft Windows operating system: p. 2004.

ELY, C.; SCOTT, I. Essential study skills for nursing, 2007.

EMERGY, I. S. F. T. A. O. E. R. **The emergy database**: secondary title, 2016.

FACTSAGE 5.0. FactSage 5.0 software, 2002.

FELDMANN, K.; SCHELLER, H. Recycling of electronic devices: Proc. Seminar on Life Cycle Engineering, 1993.

FINNVEDEN, G.; ÖSTLUND, P. Exergies of natural resources in life-cycle assessment and other applications. **Energy**, v. 22, n. 9, p. 923-931, 1997.

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H.; BAUER, C.; DOKA, G.; DONES, R.; HISCHIER, R.; HELLWEG, S.; HUMBERT, S.; KÖLLNER, T. **Implementation of life cycle impact assessment methods.** Dübendorf, December 2007
FUKUSHIGE, S.; YAMAMOTO, K.; UMEDA, Y. Lifecycle scenario design for product end-of-life strategy. **Journal of Remanufacturing**, v. 2, n. 1, p. 1, 2012.

FURUUCHI, M.; GOTOH, K. Continuous shape separation of binary mixture of granular particles. **Powder Technology**, v. 54, n. 1, p. 31-37, 1988.

FURUUCHI, M.; GOTOH, K. Shape separation of particles. **Powder Technology**, v. 73, n. 1, p. 1-9, 1992.

GALLO, W. L. R. **Análise exergética de motores a gasolina e álcool**. 1990. Departamento de Energia, UNICAMP, 1990.

GENDEBIEN, A.; LEAVENS, A.; BLACKMORE, K.; GODLEY, A.; LEWIN, K.; WHITING, K. **European Commission-Directorate General Environment: Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspective**: secondary title, 2003.

GENON, G.; BRIZIO, E. Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF. **Waste Management**, v. 28, n. 11, p. 2375-2385, 2008.

GEORGESCU, N. R.; ROEGEN, N. The entropy law and the economic process: p. 1971.

GESING, A. Assuring the continued recycling of light metals in end-of-life vehicles: A global perspective. **JOM**, v. 56, n. 8, p. 18-27, 2004.

GIBBS, J. W. Graphical methods in the thermodynamics of fluids, 1873.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social, 2010.

GLENN, J. C. Introduction to the futures research methods series, 2003.

GOES, P. B. Design Science Research in Top Information Systems Journals. **Mis Quarterly**, v. 38, n. 1, p. III-VIII, 2014.

GONG, M.; WALL, G. On exergy and sustainable development—Part 2: Indicators and methods. **Exergy, an International journal**, v. 1, n. 4, p. 217-233, 2001.

GONZALEZ-TORRE, B.; ADENSO-DIAZ, B. Optimizing decision making at the end of life of a product. **Vol. 5262** 2004.

GOUY, G. Sur l'énergie utilisable et le potentiel thermodynamique. Note de M. Gouy. **Comptes Rendus de l'Acadèmie des Sciences Paris**, v. 108, n. 10, p. 794, 1889.

GRANATA, G.; MOSCARDINI, E.; FURLANI, G.; PAGNANELLI, T. L.; TORO, L. Characterisation of automobile shredder residue. In: **9th International Conference on Chemical and Process Engineering, Vol. 17, Rome, Italy** 2009.

GROSCURTH, H. M.; KÜMMEL, R.; VAN GOOL, W. Thermodynamic limits to energy optimization. **Energy**, v. 14, n. 5, p. 241-258, 1989.

GUNGOR, A.; GUPTA, S. M. Disassembly sequence planning for products with defective parts in product recovery. **Computers & Industrial Engineering**, v. 35, n. 1, p. 161-164, 1998.

GUTOWSKI, T. G.; BRANHAM, M. S.; DAHMUS, J. B.; JONES, A. J.; THIRIEZ, A.; SEKULIC, D. P. Thermodynamic analysis of resources used in manufacturing processes. **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 5, p. 1584-1590, 2009.

HAMUT, H. S.; DINCER, I.; NATERER, G. F. Exergoenvironmental analysis of hybrid electric vehicle thermal management systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 67, n. 1, p. 187-196, 2014.

HARJULA, T.; RAPOZA, B.; KNIGHT, W. A.; BOOTHROYD, G. Design for Disassembly and the Environment. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 45, n. 1, p. 109-114, 1996.

HARPER, C. A. Handbook of plastics: Elastomers and Composites. p. 241-243, 1992.

HAU, J. L.; BAKSHI, B. R. Expanding Exergy Analysis to Account for Ecosystem Products and Services. **Environmental Science & Technology**, v. 38, n. 13, p. 3768-3777, 2004.

HIGASHIYAMA, Y.; ASANO, K. RECENT PROGRESS IN ELECTROSTATIC SEPARATION TECHNOLOGY. **Particulate Science and Technology**, v. 16, n. 1, p. 77-90, 1998.

HOTA, H.; SINGHAI, S. K.; SHUKLA, R. Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Method in Software Engineering Scenario. **International Journal of Computer Applications**, v. 57, n. 21, 2012.

HUANG, C.-C.; LIANG, W.-Y.; CHUANG, H.-F.; CHANG, Z.-Y. A novel approach to product modularity and product disassembly with the consideration of 3R-abilities. **Computers & Industrial Engineering**, v. 62, n. 1, p. 96-107, 2012.

HUBBERT, M. K. **Energy resources: a report to the Committee on Natural Resources of the National Academy of Sciences--National Research Council.** National Academy of Sciences-National Research Council, Washington, DC (USA), p.153. (PB-222401 United StatesThu Mar 24 09:00:00 EDT 2011NTISEnglish).

IAER. **IAER Electronics Recycling Industry Report, 2006 Update.** Albany, NY: International Association of Electronics Recyclers (IAER)
IGNATENKO, O.; VAN SCHAIK, A.; REUTER, M. A. Exergy as a tool for evaluation of the resource efficiency of recycling systems. **Minerals Engineering**, v. 20, n. 9, p. 862-874, 2007.

IGNATENKO, O.; VAN SCHAIK, A.; REUTER, M. A. Recycling system flexibility: the fundamental solution to achieve high energy and material recovery quotas. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 4, p. 432-449, 2008.

IJOMAH, W. L.; BENNETT, J. P.; PEARCE, J. Remanufacturing: evidence of environmentally conscious business practice in the UK. In: **Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 1999. Proceedings. EcoDesign '99: First International Symposium On, Vol., 1-3 Feb 1999**. 1999.

ISHII, K.; EUBANKS, C. F.; DI MARCO, P. Design for product retirement and material life-cycle. **Materials & Design**, v. 15, n. 4, p. 225-233, 1994.

ISHII, K. Life-Cycle Engineering Design. **Journal of Vibration and Acoustics**, v. 117, n. B, p. 42-47, 1995.

ISO 14040. **Environmental management - Life cycle assessment:** Principles and framework, First edition. Geneve, 2006.

ISO 14044. **Environmental Management - Life Cycle Assessment:** Requirements and Guidelines - First edition. Geneve, 2006.

JACSÓ, P. Google Scholar: the pros and the cons. **Online information review**, v. 29, n. 2, p. 208-214, 2005.

JAWAD, H.; JABER, M. Y.; BONNEY, M. The Economic Order Quantity model revisited: an Extended Exergy Accounting approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, n. 1, p. 64-73, 2015.

JIMÉNEZ-GONZÁLEZ, C.; KIM, S.; OVERCASH, M. R. Methodology for developing gate-to-gate Life cycle inventory information. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 5, n. 3, p. 153-159, 2000.

JODY, B.; DANIELS, E.; DURANCEAU, C.; POMYKALA, J.; SPANGENBERGER, J. **End-of-life vehicle recycling: state of the art of resource recovery from shredder residue.** Argonne National Laboratory (ANL), 2010.

JOVANE, F.; ALTING, L.; ARMILLOTTA, A.; EVERSHEIM, W.; FELDMANN, K.; SELIGER, G.; ROTH, N. A Key Issue in Product Life Cycle: Disassembly. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 42, n. 2, p. 651-658, 1993.

JURAN, J. M. The quality trilogy. **Quality progress**, v. 19, n. 8, p. 19-24, 1986.

KARA, S.; IBBOTSON, S. Embodied energy of manufacturing supply chains. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 4, n. 3, p. 317-323, 2011.

KASPERCZYK, N.; KNICKEL, K. The analytic hierarchy process (AHP). **http://www. ivm. vu. nl/en/Images/MCA3_tcm53-161529. pdf, retrieved on April,** v. 11, n., p. 2011, 2006.

KATZ, R. Design principles of reconfigurable machines. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 34, n. 5, p. 430-439, 2006.

KEENAN, J. Thermodynamics Wiley: New York. p. 290, 1941.

KEENAN, J. H. A steam chart for second law analysis. **Mechanical engineering**, v. 54, n. 3, p. 195-204, 1932.

KERR, W.; RYAN, C. Eco-efficiency gains from remanufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 9, n. 1, p. 75-81, 2001.

KNIGHT, W.; CURTIS, M. Design for Environment software development. **Journal of Sustainable Product Design**, n. 9, p. 36-44, 1999.

KOYANAKA, S.; OHYA, H.; ENDOH, S.; IWATA, H.; DITL, P. Recovering copper from electric cable wastes using a particle shape separation technique. **Advanced Powder Technology**, v. 8, n. 2, p. 103-111, 1997.

KRIWET, A.; ZUSSMAN, E.; SELIGER, G. Systematic integration of design-for-recycling into product design. **International Journal of Production Economics**, v. 38, n. 1, p. 15-22, 1995.

KROLL, P.; KRUCHTEN, P. The rational unified process made easy: a practitioner's guide to the RUP, 2003.

KUEHR, R.; WILLIAMS, E. Computers and the Environment: Understanding and Managing their Impacts: Understanding and Managing Their Impacts: p. 2003.

LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; ANTUNES JÚNIOR, J. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 4, p. 741-761, 2013.

LAMBERT, A. F.; GUPTA, S. M. Disassembly modeling for assembly, maintenance, reuse and recycling, 2004.

LASSESSON, H. **Energy consumptions and CO2 emissions resulting from different handling strategies of glass from end-of-life vehicles**. 2008. (PhD). Chalmers University of Technology, 2008.

LUENGEN, H. B.; SCHMOELE, P. Injection of reducing agents into BF. In: **Proceedings of the ISSTech Conference, Vol.** 2003.

LUTTROPP, C. **Design for disassembly: Environmentally adapted product development based on prepared disassembly and sorting**. 1997. p.112, (PhD). Superseded Departments, Machine Design., KTH, Stockholm, 1997.

MA, J.; KREMER, G. E. O. A systematic literature review of modular product design (MPD) from the perspective of sustainability. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 5, p. 1509–1539, 2016a.

MA, J.; KREMER, G. E. O. A sustainable modular product design approach with key components and uncertain end-of-life strategy consideration. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 85, n. 1, p. 741–763, 2016b.

MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research on information technology. **Decision support systems**, v. 15, n. 4, p. 251-266, 1995.

MARQUES, J.; BASSET, A.; BREY, T.; ELLIOTT, M. The ecological sustainability trigon–a proposed conceptual framework for creating and testing management scenarios. **Marine Pollution Bulletin**, v. 58, n. 12, p. 1773-1779, 2009.

MASUI, K.; MIZUHARA, K.; ISHII, K.; ROSE, C. M. Development of products embedded disassembly process based on end-of-life strategies. In: **Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 1999. Proceedings. EcoDesign'99: First International Symposium On, Vol.** 1999.

MEDYNA, G.; COATANÉA, E.; MILLET, D. Comparative study of environmental evaluation assessment using exergetic LCA implemented in existing software and a novel exergetic approach during the early design phase. In: **DS 58-4: Proceedings of ICED 09, 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 4, Product and Systems Design, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08. 2009**. 2009.

MEERKAMM, H. IPD AS A KEY TO SUSTAINABLE PRODUCTS. In: **DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm, Vol.** 2003.

MEIER-STAUDE, R.; KÖHNLECHNER, R. Elektrostatische Trennung von Leiter-/Nichtleitergemischen in der betrieblichen Praxis. **AT. Aufbereitungs-Technik**, v. 41, n. 3, p. 118-123, 2000.

MENIKPURA, S.; SANTO, A.; HOTTA, Y. Assessing the climate co-benefits from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) recycling in Japan. **Journal of Cleaner Production**, v. 74, n., p. 183-190, 2014.

MILLER, G. A. The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. **Psychological review**, v. 63, n. 2, p. 81, 1956.

MIRABILE, D.; PISTELLI, M. I.; MARCHESINI, M.; FALCIANI, R.; CHIAPPELLI, L. Thermal valorisation of automobile shredder residue: injection in blast furnace. **Waste Management**, v. 22, n. 8, p. 841-851, 2002.

MOORE, K. E.; GUNGOR, A.; GUPTA, S. M. A Petri net approach to disassembly process planning. **Computers & Industrial Engineering**, v. 35, n. 1–2, p. 165-168, 1998.

MORRIS, D. R. Exergy analysis and cumulative exergy consumption of complex chemical processes: The industrial chlor-alkali processes. **Chemical Engineering Science**, v. 46, n. 2, p. 459-465, 1991.

MORRIS, J.; MATTHEWS, H. S.; MORAWSKI, C. Review and meta-analysis of 82 studies on end-of-life management methods for source separated organics. **Waste Management**, v. 33, n. 3, p. 545-551, 2013.

MORSELLI, L.; SANTINI, A.; PASSARINI, F.; VASSURA, I. Automotive shredder residue (ASR) characterization for a valuable management. **Waste Management**, v. 30, n. 11, p. 2228-2234, 2010.

MUMMOLO, G. An analytic hierarchy process model for landfill site selection. **Journal of environmental systems**, v. 24, n. 4, p. 445-466, 1996.

MURRAY, A.; PRICE, L. Use of alternative fuels in cement manufacture: analysis of fuel characteristics and feasibility for use in the Chinese cement sector. **Ernesto Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley**, v. 6, 2008.

NES, N. V.; CRAMER, J.; STEVELS, A. A practical approach to the ecological lifetime optimization of electronic products. In: **Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 1999. Proceedings. EcoDesign '99: First International Symposium On, Vol., 1-3 Feb 1999**. 1999.

NILSSON, J. The Recycling Aspect in Product Development: Framework for a Systematic Approach, 1998.

NORRIS, G. A.; NOTTEN, P. Current availability of LCI databases in the World. In: **Working Draft 2a,** 2002.

NOURREDDINE, M. Recycling of auto shredder residue. **Journal of Hazardous Materials**, v. 139, n. 3, p. 481-490, 2007.

NREL, N. R. E. L. **U.S. life-cycle inventory database**, 2016.

OGUCHI, M.; SAKANAKURA, H.; TERAZONO, A. Toxic metals in WEEE: characterization and substance flow analysis in waste treatment processes. **Sci Total Environ**, v. 463-464, n., p. 1124-1132, 2013.

OH, Y. H.; HWANG, H. Deterministic inventory model for recycling system. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 17, n. 4, p. 423-428, 2006.

OLIVEIRA LACERDA, R. T.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. **Gestão & Produção**, v. 19, n. 1, p., 2012.

ORTIZ, P. A. S.; FLÓREZ-ORREGO, D. A. **EXERGIA: Conceituação e Aplicação**: secondary title. São Paulo: USP, 2013.

OTLET, P. Traité de documentation: le livre sur le livre, théorie et pratique: p. 1934.

OVERBY, C. Product design for recyclability and life extension. In: **ASEE Annual Conference, Baton Rouge, Louisiana,** 1979.

PANASONIC, D. A. S. A. Manual de Serviço - Microondas NN-G55 BH/BK, 2005. Disponível em: <**http://www.electronica-duartes.com/esquemasmicroondas/panasonic/panasonic_nn_g55_bh_bk_nn_r95_bh_bk_nn_r95_bhbr_nn_r95_bkbr.zip**>. Acesso em: 15 Mar. 2016.

PARASKEVAS, D.; KELLENS, K.; DEWULF, W.; DUFLOU, J. R. Environmental modelling of aluminium recycling: a Life Cycle Assessment tool for sustainable metal management. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 357-370, 2015.

PARETO, V. Cours d'Economie politique professé à l'Université de Lausanne, 2 voll. F. Rouge Editeur, Lausanne 1896-7; trad. it. **Corso di Economia politica**, 1896.

PARK, J. W.; YI, H.-C.; PARK, M. W.; SOHN, Y. T. A monitoring system architecture and calculation of practical recycling rate for end-of-life vehicle recycling in Korea. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 1, n. 1, p. 49-57, 2014.

PASSARINI, F.; CIACCI, L.; SANTINI, A.; VASSURA, I.; MORSELLI, L. Auto shredder residue LCA: implications of ASR composition evolution. **Journal of Cleaner Production**, v. 23, n. 1, p. 28-36, 2012.

PEFFERS, K.; TUUNANEN, T.; ROTHENBERGER, M. A.; CHATTERJEE, S. A design science research methodology for information systems research. **Journal of management information systems**, v. 24, n. 3, p. 45-77, 2007.

PETELA, R. Exergy of heat radiation. **Journal of Heat Transfer**, v. 86, n. 2, p. 187-192, 1964.

PRÉ, V. A. **SimaPro Database Manual-Methods library. PRé Consultants.** Netherlands, p.82. (2.7).

QUEROL, E.; GONZALEZ-REGUERAL, B.; RAMOS, A.; PEREZ-BENEDITO, J. L. Novel application for exergy and thermoeconomic analysis of processes simulated with Aspen Plus®. **Energy**, v. 36, n. 2, p. 964-974, 2011.

RAGN-SELLS ELEKTRONIKÅTERVINNING, A. **Elektronikåtervinning, Report.** Stockholm, Sweden, 2000.

RANT, Z. Exergie, ein neues Wort fur 'Technische Arbeitsfaehigkeit'(Exergy, a new word for technical availability). **Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A**, v. 22, n. 1, p. 36-37, 1956.

RAO, R. V. Decision making in the manufacturing environment: using graph theory and fuzzy multiple attribute decision making methods, 2007.

REUTER, M. A.; VAN SCHAIK, A.; IGNATENKO, O.; DE HAAN, G. J. Fundamental limits for the recycling of end-of-life vehicles. **Minerals Engineering**, v. 19, n. 5, p. 433-449, 2006.

REUTERS, T. EndNote software for citation management, 2013.

RIGAMONTI, L.; GROSSO, M.; MØLLER, J.; MARTINEZ SANCHEZ, V.; MAGNANI, S.; CHRISTENSEN, T. H. Environmental evaluation of plastic waste management scenarios. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 85, n., p. 42-53, 2014.

ROSE, C. M. **Design for environment: a method for formulating product end-of-life strategies**. 2000. Stanford University, 2000.

ROSE, C. M.; STEVELS, A. Metrics for end-of-life strategies (ELSEIM). In: **Electronics and the Environment, 2001. Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on, Vol., 2001**. 2001.

ROSE, C. M.; ISHII, K.; STEVELS, A. Influencing design to improve product end-of-life stage. **Research in Engineering Design**, v. 13, n. 2, p. 83-93, 2002.

ROSE, C. M.; STEVELS, A.; ISHII, K. METHOD FOR FORMULATING PRODUCT END-OF-LIFE STRATEGIES FOR ELECTRONICS INDUSTRY. **Journal of Electronics Manufacturing**, v. 11, n. 02, p. 185-196, 2002.

ROSEN, M. A.; DINCER, I. On exergy and environmental impact. **International Journal of Energy Research**, v. 21, n. 7, p. 643-654, 1997.

RUIZ-MERCADO, G. J.; GONZALEZ, M. A.; SMITH, R. L. Expanding GREENSCOPE beyond the gate: a green chemistry and life cycle perspective. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 16, n. 4, p. 703-717, 2014.

RYAN, J.; LUTES, C. **Characterization of emissions from the simulated open-burning of non-metallic automobile shredder residue. Final report, February 1989-October 1992.** Acurex Environmental Corp., Research Triangle Park, NC (United States)
SAATY, T. **T he Analytical Hierarchy Process**: secondary title: New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990.

SAATY, T. L.; GONZÁLEZ, L. Prediction, proyection and forecasting: applications of the analytic hierarchy process in economics, finance, politics, games and sports, 1991.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **Interfaces**, v. 24, n. 6, p. 19-43, 1994.

SAATY, T. L.; OZDEMIR, M. Negative priorities in the analytic hierarchy process. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 37, n. 9, p. 1063-1075, 2003.

SAATY, T. L. Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. **European Journal of Operational Research**, v. 145, n. 1, p. 85-91, 2003.

SAATY, T. L.; TRAN, L. T. On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 46, n. 7, p. 962-975, 2007.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process, 2012.

SALAH-ELDIN, M. SOLUTION OF FUZZY ANALYTIC HIERARCHY PROCESS USING SIMULATION. **ratio**, v. 33, n. 22, p. 11.

SANDOVAL, D. **Automotive Plastics Recycling Report.** Recycling Today, Aug.
SCHOLZ-REITER, B.; SCHARKE, H.; HUCHT, A. Flexible robot-based disassembly cell for obsolete TV-sets and monitors. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 15, n. 3, p. 247-255, 1999.

SCHUBERT, G. Aufbereitung der NE-Metallschrotte und Ne-metallhaltigen Abfälle. I. **Aufbereitungs-Technik**, v. 32, n. 2, p. 78-89, 1991.

SCIUBBA, E. Extended exergy accounting applied to energy recovery from waste: The concept of total recycling. **Energy**, v. 28, n. 13, p. 1315-1334, 2003.

SCIUBBA, E.; WALL, G. A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004. **International Journal of Thermodynamics**, v. 10, n. 1, p. 1-26, 2007.

SELIGER, G.; BASDERE, B.; KEIL, T.; REBAFKA, U. Innovative Processes and Tools for Disassembly. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 51, n. 1, p. 37-40, 2002.

SEYLER, C.; HOFSTETTER, T. B.; HUNGERBÜHLER, K. Life cycle inventory for thermal treatment of waste solvent from chemical industry: a multi-input allocation model. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 13, p. 1211-1224, 2005.

SIMAPRO. Software to measure and improve the impact of product life cycle. **Pré Consultants**, 2016.

SIMON, M. Design for dismantling. **Professional engineering**, v. 4, p. 20-22, 1991.

SONG, Q.; LI, J.; ZENG, X. Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy. **Journal of Cleaner Production**, v. 104, p. 199-210, 2015.

STAHL, I.; BEIER, P.-M. Sorting of plastics using the electrostatic separation process. **Erzmetall**, v. 49, p. 46-49, 1996.

STEINHILPER, R. Remanufacturing: the ultimate form of recycling, 1998.

STODOLA, A. Die Kreisprozesse der Gasmaschinen. **VDI-Zeitschrift**, v. 42, n. 38 und 39, p. 1045–1052 und 1086–1091, 1898.

SUNDIN, E.; BRAS, B. Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 9, p. 913-925, 2005.

SWART, R. J.; RASKIN, P.; ROBINSON, J. The problem of the future: sustainability science and scenario analysis. **Global environmental change**, v. 14, n. 2, p. 137-146, 2004.

SYRRAKOU, E.; PAPAEFTHIMIOU, S.; YIANOULIS, P. Eco-efficiency evaluation of a smart window prototype. **Science of the Total Environment**, v. 359, n. 1-3, p. 267-282, 2006.

SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes, 1987a.

SZARGUT, J.; MORRIS, D. R. Cumulative exergy consumption and cumulative degree of perfection of chemical processes. **International Journal of Energy Research**, v. 11, n. 2, p. 245-261, 1987b.

SZARGUT, J. Exergy method: technical and ecological applications, 2005.

SZCZYPIŃSKA, A.; PIOTROWSKI, E. W. Projective market model approach to AHP decision making. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 387, n. 15, p. 3982-3986, 2008.

TAKATA, S. Maintenance Essential for Life Cycle Management. **Sustainability in Manufacturing, Recovery of Resources in Product and Material Cycles. Springer**, p. 344-365, 2007.

TANI, T. Product development and recycle system for closed substance cycle society. In: **Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 1999. Proceedings. EcoDesign '99: First International Symposium On, Vol., 1-3 Feb 1999**. 1999.

TEBERT, C. The Energy Efficiency Formula of Annex II Of the Waste Framework Directive: A Critical Review. **5th Draft version, OKOPOL-Institute for Environmental Strategies**, 2006.

TOJO, N.; FISCHER, C.; SAKI, O. Europe as a Recycling Society. **European Recycling Policies in Relation to the Actual Recycling Achieved. European Topic Centre on Sustainable Consumption and Production, Copenhagen**, 2011.

TRIANTAPHYLLOU, E.; MANN, S. H. Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: some challenges. **International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice**, v. 2, n. 1, p. 35-44, 1995.

TRIBUS, M.; MCIRVINE, E. C. Energy and information. **Scientific American**, v. 225, n. 3, p. 179-188, 1971.

TZENG, G.-H.; TENG, M.-H.; CHEN, J.-J.; OPRICOVIC, S. Multicriteria selection for a restaurant location in Taipei. **International journal of hospitality management**, v. 21, n. 2, p. 171-187, 2002.

UJSAGHY, Z. Best Available Technologies in End-Of-Life Vehicles Recycling. **Budapest: Budapest University of Technology and Economics**, 2008.

USÓN, A. A.; CAPILLA, A. V.; BRIBIÁN, I. Z.; SCARPELLINI, S.; SASTRESA, E. L. Energy efficiency in transport and mobility from an eco-efficiency viewpoint. **Energy**, v. 36, n. 4, p. 1916-1923, 2011.

VALERO, A. Thermoeconomics as a conceptual basis for energy-ecological analysis. **Advances in energy studies. Energy flows in ecology and economy**, p. 415-444, 1998.

VALERO, A.; VALERO, A. Physical geonomics: combining the exergy and Hubbert peak analysis for predicting mineral resources depletion. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1074-1083, 2010.

VALERO, A.; VALERO, A. From Grave to Cradle. **Journal of Industrial Ecology**, v. 17, n. 1, p. 43-52, 2013.

VAN DIJK, S.; TENPIERIK, M.; VAN DEN DOBBELSTEEN, A. Continuing the building's cycles: A literature review and analysis of current systems theories in comparison with the theory of Cradle to Cradle. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 82, n., p. 21-34, 2014.

VAN HOOF, G.; DE BEAUFORT, A.; HOCHFELD, C.; JAMES, K. Driving forces for data exchange. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 6, n. 3, p. 133-134, 2001.

VERHAGEN, W. J. C.; BERMELL-GARCIA, P.; VAN DIJK, R. E. C.; CURRAN, R. A critical review of Knowledge-Based Engineering: An identification of research challenges. **Advanced Engineering Informatics**, v. 26, n. 1, p. 5-15, 2012.

VIEITEZ, E. R.; EDER, P.; VILLANUEVA, A.; SAVEYN, H. End-of-Waste Criteria for Glass Cullet: Technical Proposals: p. 2011.

VILLALBA, G.; AYRES, L.; AYRES, R. U. A proposal for emission calculations for chemical processes, Part I. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 48, n. 3, p. 280-299, 2006.

VON ALAN, R. H.; MARCH, S. T.; PARK, J.; RAM, S. Design science in information systems research. **MIS quarterly**, v. 28, n. 1, p. 75-105, 2004.

WALL, G. Exergy-a useful concept within resource accounting, 1977.

WALL, G. The exergy conversion in the society of Ghana. In: **Proc. 1st International Conference on Energy and Community Development, Vol.** 1978.

WALL, G. Exergy conversion in the Swedish society. **Resources and Energy**, v. 9, n. 1, p. 55-73, 1987.

WALL, G. Exergy flows in industrial processes. **Energy**, v. 13, n. 2, p. 197-208, 1988.

WALL, G.; SCIUBBA, E.; NASO, V. Exergy use in the Italian society. **Energy**, v. 19, n. 12, p. 1267-1274, 1994.

WALL, G. Conditions and tools in the design of energy conversion and management systems of a sustainable society. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 9, p. 1235-1248, 2002.

WANG, J.-J.; JING, Y.-Y.; ZHANG, C.-F.; SHI, G.-H.; ZHANG, X.-T. A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system. **Energy Policy**, v. 36, n. 10, p. 3823-3832, 2008.

WARR, B.; SCHANDL, H.; AYRES, R. U. Long term trends in resource exergy consumption and useful work supplies in the UK, 1900 to 2000. **Ecological Economics**, v. 68, n. 1-2, p. 126-140, 2008.

WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER, R.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; REINHARD, J.; VADENBO, C.; WERNET, G. **Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3.** Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2013.

WELZ, T.; HISCHIER, R.; HILTY, L. M. Environmental impacts of lighting technologies — Life cycle assessment and sensitivity analysis. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 31, n. 3, p. 334-343, 2011.

WIBOWO, S.; DENG, H. Multi-criteria group decision making for evaluating the performance of e-waste recycling programs under uncertainty. **Waste Management**, v. 40, p. 127-135, 2015.

WIKIPEDIA. Senso comum. 2015. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Senso_comum>. Acesso em: 10 dez. 2015.

WIKIPEDIA. Biomimética. 2016a. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Biomim%C3%A9tica>. Acesso em: 06 jan. 2016.

WIKIPEDIA. Produto nacional bruto (PNB). 2016b. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Produto_nacional_bruto>. Acesso em: 8 jul. 2016.

WIKIPEDIA. Dataset. 2016c. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Conjunto_de_dados>. Acesso em: 15 mar. 2016.

WIKIPEDIA. Lixiviação. 2016d. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Lixivia%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 15 nov. 2016.

WILLEMS, B.; DUFLOU, J. R. Systematic development strategy for structure based one-to-many disassembly concepts. In: **Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2006., Vol.** 2006.

WILLEMS, B. Development of improved fastening techniques in support of design for disassembly strategies, 2007.

WILLS, B. A. Mineral processing technology: 4th ed.Oxford, England, 1988.

WILSON, R. J.; VEASEY, T. J.; SQUIRES, D. M. The application of mineral processing techniques for the recovery of metal from post-consumer wastes. **Minerals Engineering**, v. 7, n. 8, p. 975-984, 1994.

YU, Y.; JIN, K.; ZHANG, H. C.; LING, F. F.; BARNES, D. A decision-making model for materials management of end-of-life electronic products. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 19, n. 2, p. 94-107, 2000.

ZAMBRANA, D.; ARANDA, A.; FERREIRA, G.; BARRIO, F. Energy-Flow Methodology for Thermodynamic Analysis of Manufacturing Processes: A Case Study of Welding Processes. **Defect and Diffusion Forum**, v. 326-328, p. 366-371, 2012.

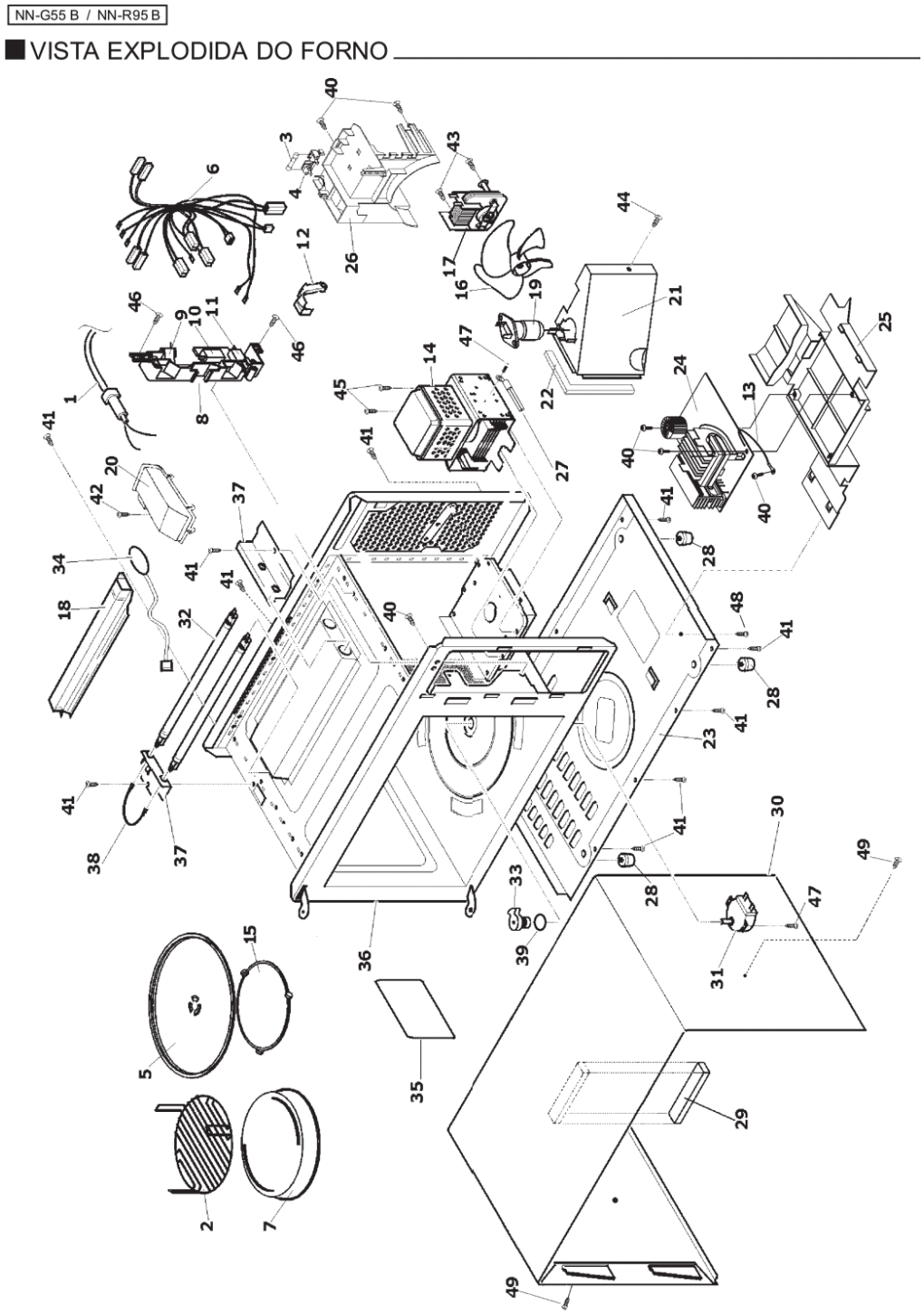
ZIOUT. Innovative design for active disassembly and sustainable product recovery. PhD. Windsor, Ontario: University of Windsor, 2013.

ZOPOUNIDIS, C.; PARDALOS, P. M. Handbook of multicriteria analysis, 2010.

ANEXOS

ANEXO A – Vista explodida do PFV forno micro-ondas NN-G55 BH 127 60Hz

Este anexo defini o modelo adotado, apresenta de forma legível sua vista explodida e em seguida, apresenta as quadros contendo a lista de componentes agrupados por função, segundo determina o fabricante (PANASONIC, 2005).



NN-G55 B / NN-R95 B

LISTA DE PEÇAS DA PLACA DO PAINEL

REF.	NN-G55 BH	NN-G55 BK	NN-R95 BH NN-R95 BHBR	NN-R95 BK NN-R95 BKBR	DESCRIÇÃO
PLACAS MONTADAS					
	MBUPNN-G55BH	- - - - - - O - - - - - -	- - - - - - O - - - - - -	- - - - - - O - - - - - -	**PLACA MONTADA DO PAINEL**
	- - - - - - O - - - - - -	**MBUPNN-G55BK**	- - - - - - O - - - - - -	- - - - - - O - - - - - -	**PLACA MONTADA DO PAINEL**
	- - - - - - O - - - - - -	- - - - - - O - - - - - -	**MBUPNN-R95BH**	- - - - - - O - - - - - -	**PLACA MONTADA DO PAINEL**
	- - - - - - O - - - - - -	- - - - - - O - - - - - -	- - - - - - O - - - - - -	**MBUPNN-R95BK**	**PLACA MONTADA DO PAINEL**
BUZINA					
BZ310	AEFB22EP2002.	AEFB22EP2002.	AEFB22EP2002.		BUZINA (MURATA MAO)
CAPACITORES					
C10	ECA1VM471B	ECA1VM471B	ECA1VM471B	ECA1VM471B	CAPACITOR ELETROLÍTICO 470,00µF 35,0 V
C12	MCH182F104ZK	MCH182F104ZK	MCH182F104ZK	MCH182F104ZK	CAPACITOR CERÂMICO 0,10 µF 25,0V
C221	MCH185F103ZK	MCH185F103ZK	MCH185F103ZK	MCH185F103ZK	CAPACITOR CERÂMICO 0,01 µF 50,0 V
C330	MCH185C102KK	MCH185C102KK	MCH185C102ZK	MCH185F102ZK	CAPACITOR CERÂMICO 1.000,00 PF 50,0 V
C340	MCH182F104ZK	MCH182F104ZK	MCH182F104ZK	MCH182F104ZK	CAPACITOR CERÂMICO 0,10 µF 25,0 V
C343	MCH185A101JK	MCH185A101JK	MCH185A101JK	MCH185A101JK	CAPACITOR CERÂMICO 100,00 PF 50,0 V
C481	MCH185F473ZK	MCH185F473ZK	MCH185F473ZK	MCH185F473ZK	CAPACITOR CERÂMICO 47,00 nF 50,0 V Y5V
C482	ECEA1HKA010B	ECEA1HKA010B	ECEA1HKA010B	ECEA1HKA010B	CAPACITOR ELETROLÍTICO 1,00 µF 50,0 V
C483	ECEA1HKAR47B	ECEA1HKAR47B	ECEA1HKAR47B	ECEA1HKAR47B	CAPACITOR ELETROLÍTICO 0,47 µF 50,0 V
C484	MCH185F103ZK	MCH185F103ZK	MCH185F103ZK	MCH185F103ZK	CAPACITOR CERÂMICO 0,01 µF 50,0 V
C485	ECEA1HKA2R2B	ECEA1HKA2R2B	ECEA1HKA2R2B	ECEA1HKA2R2B	CAPACITOR ELETROLÍTICO 2,20 µF 50,0 V
CONECTORES					
CN1	B3(5.0)BXASS1T	B3(5.0)BXASS1T	B3(5.0)BXASS1T	B3(5.0)BXASS1T	CONECTOR
CN2	5045-03A(2)	5045-03A(2)	5045-03A(2)	5045-03A(2)	CONECTOR
CN3	FPT50F003	FPT50F003	FPT50F003	FPT50F003	CONECTOR
CN4	FPT50F105	FPT50F105	FPT50F105	FPT50F105	CONECTOR
CN6	09FDZ-BT-M(S)	09FDZ-BT-M(S)	09FDZ-BT-M(S)	09FDZ-BT-M(S)	CONECTOR
OSCILADOR					
CX320	EFOEC8004T4	EFOEC8004T4	EFOEC8004T4	EFOEC8004T4	OSCILADOR CERÂMICO 8MHZ
DIODOS					
D10	1A3-E	1A3-E	1A3-E	1A3-E	DIODO RETIFICADOR 200,0 V 1,0 A
D11	1A3-E	1A3-E	1A3-E	1A3-E	DIODO RETIFICADOR 200,0 V 1,0 A
D12	1A3-E	1A3-E	1A3-E	1A3-E	DIODO RETIFICADOR 200,0 V 1,0 A
D13	1A3-E	1A3-E	1A3-E	1A3-E	DIODO RETIFICADOR 200,0 V 1,0 A
D25	SAS-271KD10S4NL	- - - - - - O - - - - - -	SAS-271KD10S4NL	- - - - - - O - - - - - -	VARISTOR 270V / 1mA / 0.4W
D25	- - - - - - O - - - - - -	SAS-511KD10S4NL	- - - - - - O - - - - - -	SAS-511KD10S4NL	VARISTOR 511V / 1mA / 0.4W
D26	SAS-112KD10Y4NL	SAS-112KD10Y4NL	SAS-112KD10Y4NL	SAS-112KD10Y4NL	VARISTOR 1100V / 1mA / 0.4W
D27	SAS-112KD10Y4NL	SAS-112KD10Y4NL	SAS-112KD10Y4NL	SAS-112KD10Y4NL	VARISTOR 1100V / 1mA / 0.4W
D40	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	DIODO DE CHAVEAMENTO 50,0 V 100,0 mA
D41	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
D180	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)
D181	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)
D182	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)
D183	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)
D184	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)
D185	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)
D186	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)
D187	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)
D188	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)
D189	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	SML-210MTT86	DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)
D220	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	DIODO DE CHAVEAMENTO 50,0 V 100,0 mA
D221	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	DIODO DE CHAVEAMENTO 50,0 V 100,0 mA
D222	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	DIODO DE CHAVEAMENTO 50,0 V 100,0 mA

Quadro 15 – Lista de peças da placa do Painel / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 1 de 3)

Fonte: Adaptado de Panasonic (2005).

NN-G55 B / NN-R95 B

REF.	NN-G55 BH	NN-G55 BK	NN-R95 BH NN-R95 BHBR	NN-R95 BK NN-R95 BKBR	DESCRIÇÃO
D223	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	DIODO DE CHAVEAMENTO 50,0 V 100,0 mA
D224	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	MA196-(TA5)	DIODO DE CHAVEAMENTO 50,0 V 100,0 mA
ZD10	MTZJT-775.6B	MTZJT-775.6B	MTZJT-775.6B	MTZJT-775.6B	DIODO ZENER 5,6 V 0,5 W 5,0 mA
DISPLAY					
DISP 110	AEDDHJ4M00AP	AEDDHJ4M00AP	AEDDHJ4M00AP	AEDDHJ4M00AP	DISPLAY DE CRISTAL LÍQUIDO
CIRCUITOS INTEGRADOS					
IC1	MN101C54CGJ	MN101C54CGJ	MN101C54CGJ	MN101C54CGJ	CIRCUITO INTEGRADO
IC480	C0AABA000051	C0AABA000051	C0AABA000051	C0AABA000051	CIRCUITO INTEGRADO
JUMPERS					
J1	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J3	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J4	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J5	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J6	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J8	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J9	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J12	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J13	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J14	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J15	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J16	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J17	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
JPR1	- - - - - - O - - - - -	B3A0A22	B3A0A22	- - - - - - O - - - - -	FIO DE JUMPER
JPR2	- - - - - - O - - - - -	- - - - - - O - - - - -	- - - - - - O - - - - -	B3A0A22	FIO DE JUMPER
JPR4	- - - - - - O - - - - -	- - - - - - O - - - - -	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
JPR5	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
P701	XRY40X40BD	XRY40X40BD	XRY40X40BD	XRY40X40BD	ILHÓS
P702	XRY40X40BD	XRY40X40BD	XRY40X40BD	XRY40X40BD	ILHÓS
PF3	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	B3A0A22	FIO DE JUMPER
TRANSISTORES					
Q10	2SD1859TV2Q	2SD1859TV2Q	2SD1859TV2Q	2SD1859TV2Q	TRANSISTOR NPN
Q180	2SD1859TV2Q	2SD1859TV2Q	2SD1859TV2Q	2SD1859TV2Q	TRANSISTOR NPN
Q181	2SC2412KT146	2SC2412KT146	2SC2412KT146	2SC2412KT146	TRANSISTOR NPN
Q182	DTC123JKA	DTC123JKA	DTC123JKA	DTC123JKA	TRANSISTOR NPN
Q220	2SC2412KT146	2SC2412KT146	2SC2412KT146	2SC2412KT146	TRANSISTOR NPN
Q222	DTC123JKA	DTC123JKA	DTC123JKA	DTC123JKA	TRANSISTOR NPN
Q223	DTC123JKA	DTC123JKA	DTC123JKA	DTC123JKA	TRANSISTOR NPN
Q224	DTC123JKA	DTC123JKA	DTC123JKA	DTC123JKA	TRANSISTOR NPN
Q225	2SC2412KT146	2SC2412KT146	2SC2412KT146	2SC2412KT146	TRANSISTOR NPN
Q226	DTA114EKA	DTA114EKA	DTA114EKA	DTA114EKA	TRANSISTOR PNP
RESISTORES					
R10	ERDS2TJ102T	ERDS2TJ102T	ERDS2TJ102T	ERDS2TJ102T	RESISTOR DE CARBONO 1,00KOHM 1/4W
R11	ERDS2TJ102T	ERDS2TJ102T	ERDS2TJ102T	ERDS2TJ102T	RESISTOR DE CARBONO 1,00KOHM 1/4W
R12	ERDS2TJ103T	ERDS2TJ103T	ERDS2TJ103T	ERDS2TJ103T	RESISTOR DE CARBONO 1,00KOHM 1/4W
R180	ERDS2TJ103T	ERDS2TJ103T	ERDS2TJ103T	ERDS2TJ103T	RESISTOR DE CARBONO 10,00 kOhm 1/4 W
R181	MCR03EZHJ220	MCR03EZHJ220	MCR03EZHJ220	MCR03EZHJ220	RESISTOR DE CARBONO 22,00 Ohm 1/16W
R182	MCR03EZHJ101	MCR03EZHJ101	MCR03EZHJ101	MCR03EZHJ101	RESISTOR DE CARBONO 100,00 Ohm 1/16 W
R183	MCR03EZHJ101	MCR03EZHJ101	MCR03EZHJ101	MCR03EZHJ101	RESISTOR DE CARBONO 100,00 Ohm 1/16 W
R220	MCR03EZHJ222	MCR03EZHJ222	MCR03EZHJ222	MCR03EZHJ222	RES. DE FILME METALICO 2,20 kOhm 1/10 W
R221	MCR03EZHJ104	MCR03EZHJ104	MCR03EZHJ104	MCR03EZHJ104	RESISTOR DE CARBONO 100,00 kOhm 1/16 W
R222	MCR03EZHJ222	MCR03EZHJ222	MCR03EZHJ222	MCR03EZHJ222	RES. DE FILME METALICO 2,20 kOhm 1/10 W
R223	MCR03EZHJ222	MCR03EZHJ222	MCR03EZHJ222	MCR03EZHJ222	RES. DE FILME METALICO 2,20 kOhm 1/10 W
R224	MCR03EZHJ103	MCR03EZHJ103	MCR03EZHJ103	MCR03EZHJ103	RESISTOR DE CARBONO 10,00 kOhm 1/16 W
R227	MCR03EZHJ220	MCR03EZHJ220	MCR03EZHJ220	MCR03EZHJ220	RESISTOR DE CARBONO 22,00 Ohm 1/16W

Quadro 16 – Lista de peças da placa do Painel / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 2 de 3)

Fonte: Adaptado de Panasonic (2005).

NN-G55 B / NN-R95 B

REF.	NN-G55 BH	NN-G55 BK	NN-R95 BH NN-R95 BHBR	NN-R95 BK NN-R95 BKBR	DESCRIÇÃO
R228	MCR03EZHJ104	MCR03EZHJ104	MCR03EZHJ104	MCR03EZHJ104	RESISTOR DE CARBONO 100,00 kOhm 1/16 W
R290	ERDS2TJ104T	ERDS2TJ104T	ERDS2TJ104T	ERDS2TJ104T	RESISTOR DE CARBONO 100,00 kOhm 1/4 W
R310	MCR03EZHJ332	MCR03EZHJ332	MCR03EZHJ332	MCR03EZHJ332	RESISTOR DE CARBONO 3,30 kOhm 1/16 W
R311	ERDS2TJ102T	ERDS2TJ102T	ERDS2TJ102T	ERDS2TJ102T	RESISTOR DE CARBONO 1,00 kOhm 1/4 W
R320	MCR03EZHJ220	MCR03EZHJ220	MCR03EZHJ220	MCR03EZHJ220	RESISTOR DE CARBONO 22,00 Ohm 1/16W
R330	MCR03EZHJ333	MCR03EZHJ333	MCR03EZHJ333	MCR03EZHJ333	RESISTOR DE CARBONO 33,00 kOhm 1/16 W
R331	MCR03EZHJ471	MCR03EZHJ471	MCR03EZHJ471	MCR03EZHJ471	RES. DE FILME METALICO 470,00 Ohm 1/10 W
R340	MCR03EZHJ473	MCR03EZHJ473	MCR03EZHJ473	MCR03EZHJ473	RES. DE FILME METALICO 47,00 kOhm 1/10 W
R341	MCR03EZHJ471	MCR03EZHJ471	MCR03EZHJ471	MCR03EZHJ471	RES. DE FILME METALICO 470,00 Ohm 1/10 W
R342	MCR03EZHJ104	MCR03EZHJ104	MCR03EZHJ104	MCR03EZHJ104	RESISTOR DE CARBONO 100,00 kOhm 1/16 W
R343	MCR03EZHJ104	MCR03EZHJ104	MCR03EZHJ104	MCR03EZHJ104	RESISTOR DE CARBONO 100,00 kOhm 1/16 W
R360	MCR03EZHJ472	MCR03EZHJ472	MCR03EZHJ472	MCR03EZHJ472	RES. DE FILME METALICO 4,70 kOhm 1/10 W
R440	MCR03EZHJ512	MCR03EZHJ512	MCR03EZHJ512	MCR03EZHJ512	RESISTOR DE CARBONO 5,10 kOhm 1/16 W
R441	MCR03EZHJ471	MCR03EZHJ471	MCR03EZHJ471	MCR03EZHJ471	RES. DE FILME METALICO 470,00 Ohm 1/10 W
R480	MCR03EZHJ472	MCR03EZHJ472	MCR03EZHJ472	MCR03EZHJ472	RES. DE FILME METALICO 4,70 kOhm 1/10 W
R481	MCR03EZHJ472	MCR03EZHJ472	MCR03EZHJ472	MCR03EZHJ472	RES. DE FILME METALICO 4,70 kOhm 1/10 W
R483	MCR03EZHJ105	MCR03EZHJ105	MCR03EZHJ105	MCR03EZHJ105	RESISTOR DE CARBONO 1,00 MOhm 1/16 W
R484	MCR03EZHJ105	MCR03EZHJ105	MCR03EZHJ105	MCR03EZHJ105	RESISTOR DE CARBONO 1,00 MOhm 1/16 W
R485	MCR03EZHJ154	MCR03EZHJ154	MCR03EZHJ154	MCR03EZHJ154	RESISTOR DE CARBONO 150,00 kOhm 1/16 W
R486	MCR03EZHJ684	MCR03EZHJ684	MCR03EZHJ684	MCR03EZHJ684	RESISTOR DE CARBONO 680,00 kOhm 1/16W
R487	MCR03EZHJ433	MCR03EZHJ433	MCR03EZHJ433	MCR03EZHJ433	RESISTOR DE CARBONO 43,00 kOhm 1/16W
R488	MCR03EZHJ202	MCR03EZHJ202	MCR03EZHJ202	MCR03EZHJ202	RESISTOR DE CARBONO 2,00 kOhm 1/16 W
R489	MCR03EZHJ105	MCR03EZHJ105	MCR03EZHJ105	MCR03EZHJ105	RESISTOR DE CARBONO 1,00 MOhm 1/16 W
R490	MCR03EZHJ103	MCR03EZHJ103	MCR03EZHJ103	MCR03EZHJ103	RESISTOR DE CARBONO 10,00 kOhm 1/16 W
R491	MCR03EZHJ202	MCR03EZHJ202	MCR03EZHJ202	MCR03EZHJ202	RESISTOR DE CARBONO 2,00 kOhm 1/16 W
R492	MCR03EZHJ103	MCR03EZHJ103	MCR03EZHJ103	MCR03EZHJ103	RESISTOR DE CARBONO 10,00 kOhm 1/16 W
VZ340	NVZ6TLTB103	NVZ6TLTB103	NVZ6TLTB103	NVZ6TLTB103	RESISTOR VARIÁVEL 10KOhms 0,1W
RELÉS					
RY1	G5G-1A18VDC	G5G-1A18VDC	G5G-1A18VDC	G5G-1A18VDC	RELÊ DE POTÊNCIA 18 VDC 250 VAC
RY2	K6B1AZA00001	K6B1AZA00001	K6B1AZA00001	K6B1AZA00001	RELÊ DA LÂMPADA
RY3	G5G-1A18VDC	G5G-1A18VDC	G5G-1A18VDC	G5G-1A18VDC	RELÊ DE POTÊNCIA 18 VDC 250 VAC
TRANSFORMADOR					
T10	ETP35KZ52Z	- - - - - - O - - - - - -	ETP35KZ52Z	- - - - - - O - - - - - -	TRANSFORMADOR 120V / 60Hz
T10	- - - - - - O - - - - - -	ETP35KZ53Z	- - - - - - O - - - - - -	ETP35KZ53Z	TRANSFORMADOR 220V / 60Hz

Quadro 17 – Lista de peças da placa do Painel / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 3 de 3)

Fonte: Adaptado de Panasonic (2005).

NN-G55 B / NN-R95 B

LISTA DE PEÇAS DA PLACA INVERTER 127V

REF.	CÓDIGO	DESCRIÇÃO
PLACA MONTADA		
	A606Y6G01AP	PLACA MONTADA DO INVERTER
CAPACITORES		
C701	ECWF5324N300	CAP. DE POLIPROP. 0,32 µF 500V
C702	ECWF2455N614	CAP. DE POLIPROP. 4,50 µF 250,0 V
C711	F1H1E104A030	CAP. CERÂMICO 0,10 µF 25,0 V
C712	ECA1EM471B	CAP. ELETROLÍTICO 470,00 µF 25,0 V
C713	F1H1E104A030	CAP. CERÂMICO 0,10 µF 25,0 V
C715	F1H1H681A824	CAP. CERÂMICO 680PF 50,0 V
C716	F1H1E104A030	CAP. CERÂMICO 0,10 µF 25,0 V
C717	ECEA1CKN100B	CAP. ELETROLÍTICO 10,00 µF 16,0 V
C718	F1H1H1010005	CAP. CERÂMICO 0,10 nF 50,0 V
C721	F1H1H1010005	CAP. CERÂMICO 0,10 nF 50,0 V
C722	ECQB1H103JF3	CAP. POLIÉSTER 10,00 nF 50,0 V
C723	F1H1H471A792	CAP. CERÂMICO 470 PF 50,0 V
C724	F1H1H1010005	CAP. CERÂMICO 0,10 nF 50,0 V
C725	ECQV1H104JL3	CAP. POLIÉSTER 100,00 nF 50,0 V
C726	ECEA1CKA100B	CAP. ELETROLÍTICO 10,00 µF 16,0 V
C728	ECQV1H224JL3	CAP. POLIÉSTER 220,00 nF 50,0 V
C729	ECQV1H683JL3	CAP. POLIÉSTER 68,00 nF 50,0 V
C730	ECQV1H104JL3	CAP. POLIÉSTER 100,00 nF 50,0 V
C731	ECEA1CKA470B	CAP. ELETROLÍTICO 47,00 µF 16,0 V
C732	F1H1E104A030	CAP. CERÂMICO 0,10 µF 25,0 V
C733	ECQB1H333JF3	CAP. POLIÉSTER 33,00 nF 50,0 V
C734	F1H1H102A219	CAP. CERÂMICO 1,00 nF 50,0 V
C735	ECEA1CKA100B	CAP. ELETROLÍTICO 10,00 µF 16,0 V
C736	ECEA1HKA2R2B	CAP. ELETROLÍTICO 2,20 µF 50,0 V
C737	F1H1H1010005	CAP. CERÂMICO 0,10 nF 50,0 V
CONECTORES		
CN701	AEEMXH00703G	CONECTOR
CN702	A6214-1700	CONECTOR
CN703	A6214-1700	CONECTOR
DIODOS		
D703	B0EAKR000018	DIODO RETIFICADOR 600,0 V 1,0 A
D704	B0EAKR000018	DIODO RETIFICADOR 600,0 V 1,0 A
D705	DAN202KT146	DIODO DE CHAVEAMENTO 80,0 V
D707	1SS133T-77	DIODO DE CHAVEAMENTO 80V 0,30 W
D708	1SS133T-77	DIODO DE CHAVEAMENTO 80V 0,30 W
D709	ERZVGAD621	VARISTOR 620V
DB701	B0FBBQ000005	PONTE DE DIODOS 500,0V 42W 10,0A
ZD701	B0BA9R6A0035	DIODO ZENER 9,6 V 0,25 W
ZD702	B0BA9R6A0035	DIODO ZENER 9,6 V 0,25 W
ZD703	B0BA011A0059	DIODO ZENER 11,0 V 0,25 W
CIRCUITOS INTEGRADOS		
IC701	AN47051A-VT	CIRCUITO INTEGRADO
IC702	B3PAA0000387	CI FOTO ACOPLADOR
IC703	B3PAA0000387	CI FOTO ACOPLADOR
BOBINA		
L701	TSM2-11100S	BOBINA DE CHOQUE 100,00 µH
JUMPERS		
J701	MCR03EZHJ000	RES. DE CARBONO 0 Ohm 1/16 W
J711	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J712	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J713	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J714	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J715	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J716	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J717	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J718	B3A0A22	FIO DE JUMPER

REF.	CÓDIGO	DESCRIÇÃO
J720	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J721	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J722	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J723	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J724	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J725	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J726	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J731	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J732	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J733	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J734	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J735	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J736	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J737	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J741	B3A0A22	FIO DE JUMPER
J742	B3A0A22	FIO DE JUMPER
TRANSISTORES		
Q701	B1JAGV000008	TRANS. DE POTÊNCIA 1.000,0V 65,0A
Q703	B1AACF000107	TRANSISTOR NPN
Q704	B1AACF000107	TRANSISTOR NPN
Q705	B1ACCF000086	TRANSISTOR PNP
Q706	B1AACF000107	TRANSISTOR NPN
RESISTORES		
R701	D0XE107M0001	RES. DE POTÊNCIA 100,00 MOhm 1 W
R702	D0C7202JA003	RES. DE CIMENTO 2,00 kOhm 7 W
R703	6927-1F70	JUMPER DE BAIXA RESISTIVIDADE
R705	MCR03EZHJ153	RES. DE CARBONO 15,00 kOhm 1/16 W
R706	MCR03EZHJ203	RES. DE CARBONO 20,00 kOhm 1/16 W
R707	MCR03EZHJ100	RES. DE CARBONO 10,00 Ohm 1/16 W
R708	MCR03EZHJ103	RES. DE CARBONO 10,00 kOhm 1/16 W
R709	MFR25SFTF26100K	RES. DE FILME 100,00 kOhm 1/4 W
R710	RNM1/2C35602FTP	RES. DE FILME 56,00 kOhm 1/2 W
R711	ERDS1TJ563T	RES. DE CARBONO 56,00 kOhm 1/2 W
R712	ERDS1TJ241T	RES. DE CARBONO 240,00 Ohm 1/2 W
R713	MFR25SFTF26110K	RES. DE FILME 110,00 kOhm 1/4 W
R714	MCR03EZHJ242	RES. DE CARBONO 2,40 kOhm 1/16 W
R715	MCR03EZHJ242	RES. DE CARBONO 2,40 kOhm 1/16 W
R716	ERDS1TJ164T	RES. DE CARBONO 160,00 kOhm 1/2 W
R721	ERDS1TJ563T	RES. DE CARBONO 56,00 kOhm 1/2 W
R722	MCR03EZHJ113	RES. DE CARBONO 11,00 kOhm 1/16 W
R723	MCR03EZHJ152	RES. DE CARBONO 1,50 kOhm 1/16 W
R724	MCR03EZPF4022	RES. DE CARBONO 40,20 kOhm 1/16 W
R725	MCR03EZPF1503	RES. DE CARBONO 150,00 kOhm 1/16 W
R726	MCR03EZHJ154	RES. DE CARBONO 150,00 kOhm 1/16 W
R727	MCR03EZHJ304	RES. DE CARBONO 300,00 kOhm 1/16 W
R728	MCR03EZHJ302	RES. DE CARBONO 3,00 kOhm 1/16 W
R729	B3A0A22	FIO DE JUMPER
R731	MCR03EZHJ513	RES. DE CARBONO 51,00 kOhm 1/16 W
R732	MCR03EZPF1581	RES. DE CARBONO 1,58 kOhm 1/16 W
R733	MCR03EZHJ225	RES. DE CARBONO 2,20 MOhm 1/16 W
R734	MCR03EZHJ202	RES. DE CARBONO 2,00 kOhm 1/16 W
R735	MCR03EZHJ333	RES. DE CARBONO 33,00 kOhm 1/16 W
R736	MCR03EZHJ562	RES. DE CARBONO 5,60 kOhm 1/16 W
R737	MCR03EZHJ100	RES. DE CARBONO 10,00 Ohm 1/16 W
R738	MCR03EZHJ104	RES. DE CARBONO 100,00 kOhm 1/16 W
R739	MCR03EZPF1271	RES. DE CARBONO 1,27 kOhm 1/16 W
R740	MCR03EZPF1502	RES. DE CARBONO 15,00 kOhm 1/16 W
R741	MCR03EZPF1542	RES. DE CARBONO 15,40 kOhm 1/16 W
R742	MCR03EZPF2002	RES. DE CARBONO 20,00 kOhm 1/16 W

Quadro 18 – Lista de peças da placa Inverter / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 1 de 2)

Fonte: Adaptado de Panasonic (2005).

NN-G55 B / NN-R95 B

REF.	CÓDIGO	DESCRIÇÃO
R743	MCR03EZPF2373	RES. DE CARBONO 237,00 kOhm 1/16 W
R744	MCR03EZPF4641	RES. DE CARBONO 4,64 kOhm 1/16 W
R745	MCR03EZPF1503	RES. DE CARBONO 150,00 kOhm 1/16 W
R746	MCR03EZPF1503	RES. DE CARBONO 150,00 kOhm 1/16 W
R747	MCR03EZHJ222	RES. DE FILME 2,20 kOhm 1/10 W
R748	MCR03EZHJ823	RES. DE CARBONO 82,00 kOhm 1/16 W
R749	MCR03EZPF2003	RES. DE CARBONO 200,00 kOhm 1/16 W
R750	MCR03EZPF4993	RES. DE CARBONO 499,00 kOhm 1/16 W
R751	MCR03EZHJ681	RES. DE CARBONO 680,00 Ohm 1/16 W
R753	MCR03EZHJ000	RES. DE CARBONO 0,00 Ohm 1/16 W
R754	MCR03EZPF5621	RES. DE CARBONO 5,62 kOhm 1/16 W
R755	MCR03EZHJ114	RES. DE CARBONO 110,00 kOhm 1/16 W
R756	MCR03EZPF9102	RES. DE CARBONO 91,00 kOhm 1/16 W
R757	MCR03EZPF6981	RES. DE CARBONO 6,98 kOhm 1/16 W
R758	D1BF4122A003	RES. DE FILME41,20 kOhm 1/8 W
R759	D1BF4122A003	RES. DE FILME41,20 kOhm 1/8 W
R760	D1BF4122A003	RES. DE FILME41,20 kOhm 1/8 W
R761	D1BF4122A003	RES. DE FILME41,20 kOhm 1/8 W
R762	D1BF4122A003	RES. DE FILME41,20 kOhm 1/8 W
R763	D1BF4122A003	RES. DE FILME41,20 kOhm 1/8 W
R764	D1BF4122A003	RES. DE FILME41,20 kOhm 1/8 W
R765	D1BF4122A003	RES. DE FILME41,20 kOhm 1/8 W
VR701	NVZ6TLTB503	RES. VARIÁVEL 50,00 kOhm
TRANSFORMADOR		
T701	A609A6G00AP	TRANSFORMADOR INVERTER S
TERMISTOR		
TH701	D4CC11040009	TERMISTOR SMD (NTC)

Quadro 19 – Lista de peças da placa Inverter / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 2 de 2)

Fonte: Adaptado de Panasonic (2005).

LISTA DE PEÇAS MECÂNICAS

REF.	DESCRIÇÃO	NN-G55BH	NN-G55BK	NN-R95BH	NN-R95BHBR	NN-R95BK	NN-R95BKBR
1	CABO DE FORÇA	FPR600115	FPR600115	FPR600115	FPR600115	FPR600115	FPR600115
2	GRELHA P/ FORNO MICROONDAS	F06025U00XN	F06025U00XN	F06025U00XN	F06025U00XN	F06025U00XN	F06025U00XN
3	FUSÍVEL CERÂMICO	CES6-18A	CES14-10A	CES6-18A	CES6-18A	CES14-10A	CES14-10A
4	PORTA FUSÍVEL	B62315G10XN	B62315G10XN	B62315G10XN	B62315G10XN	B62315G10XN	B62315G10XN
5	BANDEJA DE VIDRO REFRATÁRIO	F06015Q00AP	F06015Q00AP	F06015Q00AP	F06015Q00AP	F06015Q00AP	F06015Q00AP
6	FIAÇÃO - KIT COMPLETO	FPU50F101	FPU50F101	FPU50F101	FPU50F101	FPU50F101	FPU50F101
7	CONJ. DO PRATO DOURADOR	- - - - - O - - - - -	- - - - - O - - - - -	FPQ00C017	FPQ00C017	FPQ00C017	FPQ00C017
8	ENGATE DAS MICRO-CHAVES	F30205Q00AP	F30205Q00AP	F30205Q00AP	F30205Q00AP	F30205Q00AP	F30205Q00AP
9	MICRO CHAVE "A"	J61414T00AP	J61414T00AP	J61414T00AP	J61414T00AP	J61414T00AP	J61414T00AP
10	MICRO-CHAVE DE CURTO	J61784T00AP	J61784T00AP	J61784T00AP	J61784T00AP	J61784T00AP	J61784T00AP
11	MICRO-CHAVE "B"	AM50660C53-A	AM50660C53-A	AM50660C53-A	AM50660C53-A	AM50660C53-A	AM50660C53-A
12	ALAVANCA DO CONJ. ENGATE MICROCHAVES	F31365Q01AP	F31365Q01AP	F31365Q01AP	F31365Q01AP	F31365Q01AP	F31365Q01AP
13	FIO TERRA DO INVERTER	FPT50F207	FPT50F207	FPT50F207	FPT50F207	FPT50F207	FPT50F207
14	MAGNETRON	2M236-M32K1Y	2M236-M32K1Y	2M236-M32K1Y	2M236-M32K1Y	2M236-M32K1Y	2M236-M32K1Y
15	CONJ. DO ANEL PARA BANDEJA	F290D5Q00AP	F290D5Q00AP	F290D5Q00AP	F290D5Q00AP	F290D5Q00AP	F290D5Q00AP
16	HÉLICE	F40085G10XN	F40085G10XN	F40085G10XN	F40085G10XN	F40085G10XN	F40085G10XN
17	MOTOR A.C. DE VENTILAÇÃO	F400A5G40AP	F400A5G42BK	F400A5G40AP	F400A5G40AP	F400A5G42BK	F400A5G42BK
18	GUIA DE AR "B" DO SENSOR	B64505Q00AP	B64505Q00AP	B64505Q00AP	B64505Q00AP	B64505Q00AP	B64505Q00AP
19	LÂMPADA MONTADA NO SOQUETE	F612E5G40AP	F612E5G42BK	F612E5G40AP	F612E5G40AP	F612E5G42BK	F612E5G42BK
20	GUIA DE AR "C" DO SENSOR	B65434W00APA	B65434W00APA	B65434W00APA	B65434W00APA	B65434W00APA	B65434W00APA
21	GUIA DE AR "A"	B40255Q00AP	B40255Q00AP	B40255R00BP	B40255R00BP	B40255R00BP	B40255R00BP
22	ESPUMA SUPRESSORA	FPD000033	FPD000033	FPD000033	FPD000033	FPD000033	FPD000033
23	TAMPA INFERIOR	B10015Q00APA	B10015Q00APA	B10015Q00APA	B10015Q00APA	B10015Q00APA	B10015Q00APA
24	PLACA INVERTER	A606Y6G01AP	A606YM300GP	A606Y6G01AP	A606Y6G01AP	A606YM300GP	A606YM300GP
25	SUPORTE DO INVERTER	B65856M60AP	B65856M60AP	B65856M60AP	B65856M60AP	B65856M60AP	B65856M60AP
26	GUIA DE AR "B" SUPERIOR	B41445Q00APB	B41445Q00APB	B41445Q00APB	B41445Q00APB	B41445Q00APB	B41445Q00APB
27	KIT FIAÇÃO DO SENSOR	FPT50F105	FPT50F105	FPT50F105	FPT50F105	FPT50F105	FPT50F105
28	PÉ DE BORRACHA	F10084T01AP	F10084T01AP	F10084T01AP	F10084T01AP	F10084T01AP	F10084T01AP
29	CALÇO P/ GABINETE	FS30MY10T	FS30MY10T	FS30MY10T	FS30MY10T	FS30MY10T	FS30MY10T
30	GABINETE	B10095R00HAP	B10095R00HAP	B10095R00NAP	B10095R00HAP	B10095R00NAP	B10095R00HAP
31	MOTOR A.C. DA BANDEJA	B63264081AP	A63268961JP	B63264081AP	B63264081AP	A63268961JP	A63268961JP
32	RESISTENCIA DE AQUECIMENTO	F630G5R01AP	F630G5R00BP	F630G5R01AP	F630G5R01AP	F630G5R00BP	F630G5R00BP
33	EIXO DA BANDEJA	F21315G10XN	F21315G10XN	F21315G10XN	F21315G10XN	F21315G10XN	F21315G10XN

Quadro 20 – Lista de peças mecânicas / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 1 de 4)

Fonte: Adaptado de Panasonic (2005).

NN-G55 B / NN-R95 B

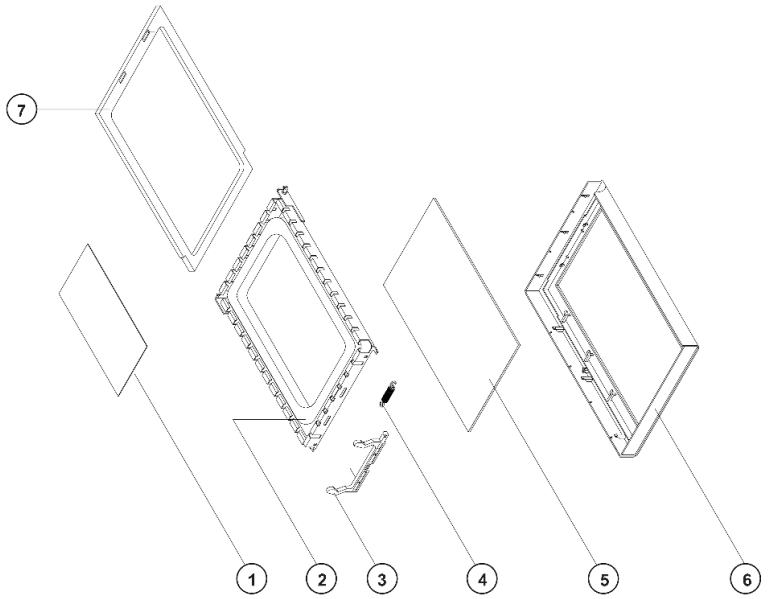
LISTA DE PEÇAS MECÂNICAS - (continuação)

REF.	DESCRIÇÃO	NN-G55BH	NN-G55BK	NN-R95BH	NN-R95BHBR	NN-R95BK	NN-R95BKBR
34	SENSOR DE VAPOR	A607S4M01AP	A607S4M01AP	A607S4M01AP	A607S4M01AP	A607S4M01AP	A607S4M01AP
35	TAMPA DO GUIA DE ONDA	F20555Q00BP	F20555Q00BP	F20555Q00BP	F20555Q00BP	F20555Q00BP	F20555Q00BP
36	CONJUNTO FORNO	FPU20C001A	FPU20C001A	FPU20C100A	FPU20C100A	FPU20C100A	FPU20C100A
37	SUP. DA RESISTÊNCIA	B64605R00BP	B64605R00BP	B64605R00BP	B64605R00BP	B64605R00BP	B64605R00BP
38	FIAÇÃO - RESISTÊNCIA	FPT50F008	FPT50F008	FPT50F008	FPT50F008	FPT50F008	FPT50F008
39	ARRUELA DO EIXO DA BANDEJA	FPD000001	FPD000001	FPD000001	FPD000001	FPD000001	FPD000001
40	PARAFUSO	XTV4+12C-RH	XTV4+12C-RH	XTV4+12C-RH	XTV4+12C-RH	XTV4+12C-RH	XTV4+12C-RH
41	PARAFUSO	XTV4+8C-RH	XTV4+8C-RH	XTV4+8C-RH	XTV4+8C-RH	XTV4+8C-RH	XTV4+8C-RH
42	PARAFUSO	XTV3+8C-RH	XTV3+8C-RH	XTV3+8C-RH	XTV3+8C-RH	XTV3+8C-RH	XTV3+8C-RH
43	PARAFUSO	XTWANE4+8S	XTWANE4+8S	XTWANE4+8S	XTWANE4+8S	XTWANE4+8S	XTWANE4+8S
44	PARAFUSO	XSV4+10BEML1-RH	XSV4+10BEML1-RH	XSV4+10BEML1-RH	XSV4+10BEML1-RH	XSV4+10BEML1-RH	XSV4+10BEML1-RH
45	PARAFUSO	XTWANE4+10RMBRH	XTWANE4+10RMBRH	XTWANE4+10RMBRH	XTWANE4+10RMBRH	XTWANE4+10RMBRH	XTWANE4+10RMBRH
46	PARAFUSO	XTW4+12P-RH	XTW4+12P-RH	XTW4+12P-RH	XTW4+12P-RH	XTW4+12P-RH	XTW4+12P-RH
47	PARAFUSO	XTV3+8Y-RH	XTV3+8Y-RH	XTV3+8Y-RH	XTV3+8Y-RH	XTV3+8Y-RH	XTV3+8Y-RH
48	PARAFUSO	XTW3+8T/B-RH	XTW3+8T/B-RH	XTW3+8T/B-RH	XTW3+8T/B-RH	XTW3+8T/B-RH	XTW3+8T/B-RH
49	PARAFUSO	XTCAFA4+12RFQRH	XTCAFA4+12RFQRH	XTCAFA4+12RFQRH	XTCAFA4+12RFQRH	XTCAFA4+12RFQRH	XTCAFA4+12RFQRH

Quadro 21 – Lista de peças mecânicas / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 2 de 4).

Fonte: Adaptado de Panasonic (2005).

■ LISTA DE PEÇAS DA PORTA



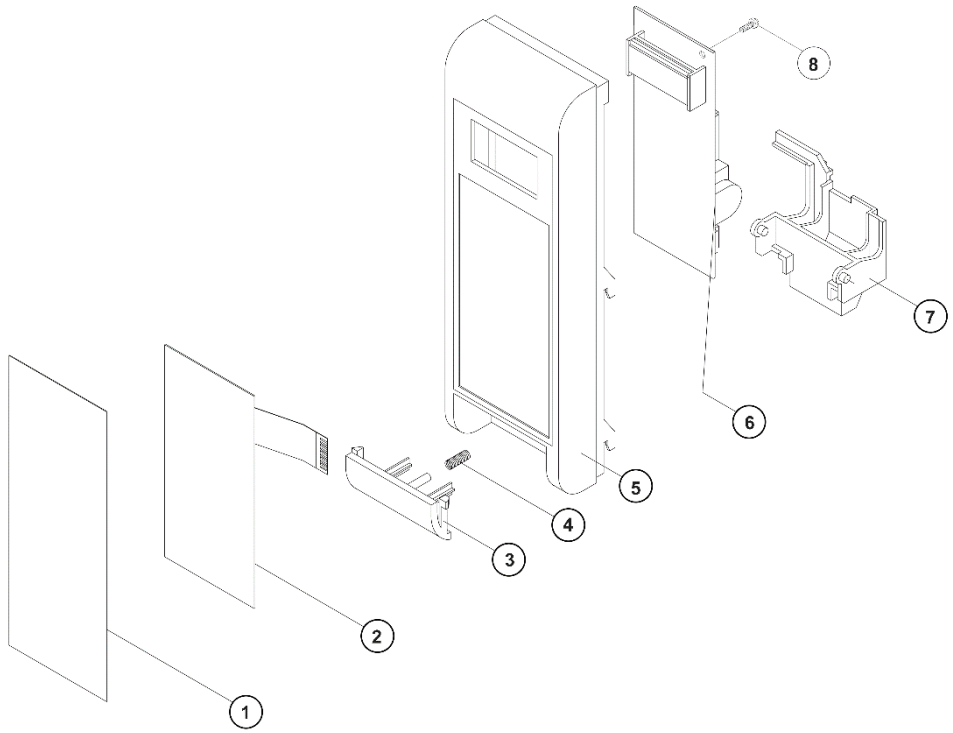
REF.	DESCRIÇÃO	NN-G55BH	NN-G55BK	NN-R95BH	NN-R95BHBR	NN-R95BK	NN-R95BKBR
1	MÁSCARA "A"	F31454T01AP	F31454T01AP	F31454T01AP	F31454T01AP	F31454T01AP	F31454T01AP
2	PORTA "E"	FPT30C013	FPT30C013	FPT30C013	FPT30C013	FPT30C013	FPT30C013
3	TRAVA DA PORTA	B30185Q00APA	B30185Q00APA	B30185Q00APA	B30185Q00APA	B30185Q00APA	B30185Q00APA
4	MOLA DA TRAVA	FPD300020	FPD300020	FPD300020	FPD300020	FPD300020	FPD300020
5	MÁSCARA "B"	F31465Q00BAP	F31465Q00BAP	F31465Q00BAP	F31465Q00BAP	F31465Q00BAP	F31465Q00BAP
6	PORTA "A"	B30015Q00HAP	B30015Q00HAP	B30015Q00SAP	B30015Q00HAP	B30015Q00SAP	B30015Q00HAP
7	PORTA "C"	B30855Q00AP	B30855Q00AP	B30855Q00AP	B30855Q00AP	B30855Q00AP	B30855Q00AP

Quadro 22 – Lista de peças mecânicas / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 3 de 4)

Fonte: Adaptado de Panasonic (2005).

NN-G55 B / NN-R95 B

■ LISTA DE PEÇAS DO PAINEL



REF.	DESCRIÇÃO	NN-G55BH	NN-G55BK	NN-R95BH	NN-R95BHBR	NN-R95BK	NN-R95BKBR
1	TECLA DA MEMBRANA	FPU800303	FPU800303	FPU800403	FPU800503	FPU800403	FPU800503
2	MEMBRANA	FPU800112I	FPU800112I	FPU800112I	FPU800112I	FPU800112I	FPU800112I
3	BOTÃO ABRIR	B80725Q00HAP	B80725Q00HAP	B80725Q00SAP	B80725Q00HAP	B80725Q00SAP	B80725Q00HAP
4	MOLA DO BOTÃO ABRIR	FPD800002A	FPD800002A	FPD800002A	FPD800002A	FPD800002A	FPD800002A
5	BASE DO PAINEL	B80345Q00HAP	B80345Q00HAP	B80345Q00SAPA	B80345Q00HAP	B80345Q00SAPA	B80345Q00HAP
6	PLACA MONTADA	MBUPNN-G55BH	MBUPNN-G55BK	MBUPNN-R95BH	MBUPNN-R95BH	MBUPNN-R95BK	MBUPNN-R95BK
7	ALAVANCA DE ABRIR	B82565Q00AP	B82565Q00AP	B82565Q00AP	B82565Q00AP	B82565Q00AP	B82565Q00AP
8	PARAFUSO	XTWP3+10C-RH	XTWP3+10C-RH	XTWP3+10C-RH	XTWP3+10C-RH	XTWP3+10C-RH	XTWP3+10C-RH

Quadro 23 – Lista de peças mecânicas / Forno micro-ondas NN-G55 BH 127 VAC 60Hz (Página 4 de 4).

Fonte: Adaptado de(Panasonic (2005).