



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Julian Fernando Ordoñez Durán

Metodologia baseada na resiliência embutida no produto como alternativa ao descarte desnecessário de energia decorrente da obsolescência: uma aplicação em smartphones

Florianópolis

2019

**METODOLOGIA BASEADA NA RESILIÊNCIA EMBUTIDA NO PRODUTO COMO
ALTERNATIVA AO DESCARTE DESNECESSÁRIO DE ENERGIA DECORRENTE
DA OBSOLESCÊNCIA: UMA APLICAÇÃO EM SMARTPHONES**

Tese submetida ao programa de Pós-Graduação em
engenharia mecânica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. João Carlos Espindola Ferreira
Ph.D.

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
Através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Durán, Julián Fernando Ordoñez

Metodologia baseada na resiliência embutida no produto como alternativa ao descarte desnecessário de energia decorrente da obsolescência: uma aplicação em smartphones / Julián Fernando Ordoñez Durán ; orientador, Prof. João Carlos Espindola Ferreira Ph.D, 2019.

172 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Resiliência. 3. Energia Embutida. 4. Sustentabilidade. 5. Obsolescência. I. Espindola Ferreira Ph.D, Prof. João Carlos . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Julián Fernando Ordoñez Duran

METODOLOGIA BASEADA NA RESILIÊNCIA EMBUTIDA NO PRODUTO COMO ALTERNATIVA AO DESCARTE DESNECESSÁRIO DE ENERGIA DECORRENTE DA OBSOLESCÊNCIA: UMA APLICAÇÃO EM SMARTPHONES

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Milton Borsato, Ph.D.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Fernando Antônio Forcellini, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa

Prof. Marcelo Gitirana Gomes Ferreira, Dr. Eng.
Universidade do Estado de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Prof. Jonny Carlos da Silva Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira
Orientador

Florianópolis 17 de setembro de 2019

Dedico esse trabalho aos meus seres amados. Sem seu apoio, essa empresa hercúlea e maravilhosa teria sido impossível.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Jaime Ordoñez Ordoñez pelo apoio incondicional quando decidi empreender esse desafio.

Ao Professor João Carlos Espindola Ferreira pela oportunidade e confiança para formar parte do Grupo de Integração da Manufatura (GRIMA) durante 7 anos.

Ao POSMEC pelas políticas de inclusão que permite aos estrangeiros a formação que irá potencializar o desenvolvimento de diversas regiões no mundo.

A CAPES pelos recursos fornecidos, os quais permitiram o desenvolvimento da pesquisa.

Aos Professores Mercê Segarra Rubi e Josep Maria Chimenos pela oportunidade de aprender sobre o ofício doutoral em outras latitudes

A todas as pessoas que compartilharam e incentivaram a jornada, desde a janela da 26 até a sacada no Campeche.

E também a Deus.

RESUMO

Economia, sociedade e meio ambiente são as três diretrizes que orientam o roteiro do desenvolvimento sustentável segundo tripé da sustentabilidade. Do ponto de vista ambiental, o denominado *world overshoot day*, ou dia da dívida ecológica, é atingido mais cedo cada ano desde que começou ser quantificado. Em 1º de agosto de 2019 todos os recursos renováveis do planeta correspondentes àquele ano já foram consumidos, e aqueles utilizados até janeiro de 2020 pertencem ao saldo de 2020. Economicamente, o incremento do Produto Interno Bruto mundial (PIB) foi de 3,8%, enquanto socialmente o crescimento demográfico teve um aumento de 1,1%. Observa-se que a economia cresce mais do que a população, o que significa maior consumo per capita anualmente. O desafio da pesquisa em sustentabilidade consiste em gerar soluções ambientais e sociais sem impactar negativamente a economia, e minimizar o descarte de recursos converte-se em uma necessidade. Considerando que uma grande parcela de produtos manufaturados é composta por um conjunto de peças, componentes ou materiais, cada um desses itens possui uma expectativa de vida própria e, possivelmente, diferente entre si. Isto é, quando um deles deixa de funcionar, os outros itens também entram no estado de suspensão da função do produto, apesar de ainda encontrarem-se dentro da fase de vida útil. O descarte do produto devido à ocorrência da quebra de um componente resulta no descarte desnecessário desses outros itens e, subsequentemente, da energia embutida neles. Nesse contexto, neste trabalho propõe-se uma metodologia que tem por objetivo definir o conceito de resiliência embutida no produto como indicador da capacidade de um produto ou seus componentes de prolongar o seu ciclo de vida. As ferramentas utilizadas fundamentam-se na utilização da modelagem de lógica preposicional de primeira ordem, na técnica *Life Cycle Assessment* (Avaliação do Ciclo de Vida - LCA), na estrutura granular do produto, e no projeto de redes bayesianas. Por meio de um trabalho de integração das ferramentas, foi criada a hierarquização das etapas que compõem a metodologia. Mediante o mapeamento granular do objeto analisado que se encontrou como a relação de codependência entre elementos, define-se a vida útil do produto e o término de seu primeiro ciclo de vida. Entendendo-se que o momento de suspensão da entrega da função é crítico na destinação do produto, o intuito é identificar as rotas de desmontagem até a causa do evento de falha. Quantificando a energia embutida envolvida no evento, utilizando kanbans de informação específicos criados para tal fim, minimizou-se os valores da energia embutida descartada otimizando-se a escolha do melhor destino para o produto. Isto permite retornar o produto entre as etapas de “tão bom quanto novo”, 4R (reciclar, reusar, reduzir, recuperar) e descarte no aterro em função do *trade-off* energético. A metodologia foi aplicada em uma família de equipamentos eletrônicos. Os resultados permitiram analisar as consequências de diferentes decisões durante as fases de projeto de produto, e como isso afeta negativamente a mineração de materiais virgens, execução de processos, transportes multimodais evidenciados na forma de energia em todas as fases do ciclo de vida do produto.

Palavras chave: Resiliência, Energia Embutida, Sustentabilidade, Obsolescência, Avaliação do Ciclo de Vida, Equipamentos Eletrônicos, Descarte.

ABSTRACT

Economy, society and the environment are the three guidelines that guide the sustainable development roadmap according to the triple bottom line. From the environmental point of view, the so-called world overshoot day is reached earlier each year since it began to be quantified. On August 1st, 2018 all renewable resources of the planet corresponding to that year had already been consumed, and those used until January 2019 belonged to the balance of 2019. Economically, the increase of the Gross Domestic Product (GDP) was 3.8%, while socially demographic growth increased by 1.1%. It is observed that the economy grows more than the population, which means higher consumption per capita. The challenge of sustainability research is to generate environmental and social solutions without negatively impacting the economy, and minimizing the disposal of resources becomes a necessity. Considering that a large number of manufactured products are composed of a set of parts, components or materials, each of these items has a life expectancy of its own and possibly different from each other. That is, when one of them stops working, the other items also enter the period when the product does not provide its function, even though they are still within their lifespan. Disposal of the product due to the occurrence of a component failure results in the unnecessary disposal of those other items and, subsequently, of their embodied energy. In this context, this paper proposes a methodology that seeks to define the concept of resilience embodied in the product as an indicator of the ability of a product or its components to extend its life cycle. The tools used are based on the modeling of first-order propositional logic, Life Cycle Assessment (LCA), product structure, and Bayesian network design. By working towards integrating these tools, a hierarchy of the steps that compose the methodology was created. Through the granular mapping of the analyzed object, a relation between the correspondence of the elements defines the product lifespan and the end of its first life cycle. Considering that the moment the product function is stopped is critical in the product destination, the intent is to identify the disassembly routes to the cause of the failure event, quantify the embodied energy involved in the event using a specific information Kanban created for such purpose, which minimizes the values of the discarded embodied energy, optimizing the decision-making process for the product. This allows returning the product between the following stages: “as good as new”, 4R (recycle, reuse, reduce, recover) and landfill disposal as a function of the energy trade-off. The methodology was applied to a family of electronic equipment. The results allowed analyzing the consequences of different decisions during product design, and how this negatively affects virgin material mining, process execution, multimodal transport evidenced in the form of energy at all stages of the product life cycle.

Keywords: Resilience, Embodied Energy, Sustainability, Obsolescence, Life Cycle Assessment, Electronic Equipment, Disposal.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1 - Aumento nas publicações com palavras-chave presentes nesta tese | 27 |
| Figura 2 - Estrutura da fundamentação teórica..... | 35 |
| Figura 3 – O Tripé da Sustentabilidade | 36 |
| Figura 4 - <i>Ecological Overshoot</i> | 40 |
| Figura 5 - Discriminação industrial por categorias. | 41 |
| Figura 6 - Resultados apresentados pela SETAC..... | 45 |
| Figura 7 - Mapa <i>Cradle to Cradle/Cradle to Grave</i> | 48 |
| Figura 8 - Distribuição do consumo energético de uma máquina ferramenta..... | 53 |
| Figura 9 - Informe de ecoauditoria..... | 60 |
| Figura 10 - Melhorias sugeridas com base na ecoauditoria..... | 61 |
| Figura 11 - Carga e resistência paralelas | 66 |
| Figura 12 - Carga e resistência com distribuição normal sem sobreposição..... | 67 |
| Figura 13 - Carga e resistência com distribuições que se sobrepõem | 67 |
| Figura 14 - Transição da média da resistência ao longo do funcionamento..... | 69 |
| Figura 15 - Detalhe do sistema LCA, final de vida útil do produto | 71 |
| Figura 16 - Curva da banheira para análise de falhas..... | 73 |
| Figura 17 - Computadores obsoletos por linha descartados por ano..... | 76 |
| Figura 18 - Desempenho do sistema após o evento de falha para descrever a resiliência | 79 |
| Figura 19 - Modelo de transferência de conhecimento resiliente..... | 80 |
| Figura 20 - Mapeamento tradicional de logística reversa..... | 82 |
| Figura 21 - Rede Bayesiana de precedências | 84 |
| Figura 22 - Rede Bayesiana de funções codependentes | 86 |
| Figura 23 - Mapeamento de rede bayesiana acumulativa..... | 87 |
| Figura 24 - Interpretação de verdade dos conetores | 89 |
| Figura 25 - Etapas da metodologia proposta | 91 |
| Figura 26 - Mapeamento granular do produto P..... | 94 |
| Figura 27 - Cartão <i>Kanban</i> do Módulo (CKM)..... | 95 |
| Figura 28 – Resultados do relatório de ecoauditoria para um exemplo | 96 |
| Figura 29 - Evolução do KIM..... | 97 |
| Figura 30 - Reta de distribuições de lifespan por módulo..... | 99 |
| Figura 31 - <i>Kanban</i> de <i>lifespan</i> de produto (KLP) | 100 |
| Figura 32 – Matrizes de nível, de precedência e de subsequência | 102 |

| | |
|--|-----|
| Figura 33 - Rede bayesiana de precedências | 103 |
| Figura 34 - Ficha de caracterização de produto | 106 |
| Figura 35 – Informações de caracterização de produto no momento da falha | 109 |
| Figura 36 - Mapa de precedências no momento da falha com resultados FIXADORES A... 109 | |
| Figura 37 - Mapa de elementos comprometidos causados pela falha no elemento M(i)Cj com FIXADORES A | 110 |
| Figura 38 - Mapa de elementos comprometidos causados pela falha no elemento M(i)Cj com FIXADORES B | 111 |
| Figura 39 - Resiliência embutida no produto | 113 |
| Figura 40. Comparação das REP individuais | 120 |
| Figura 41 - Exemplo dos modelos utilizados no estudo de caso | 125 |
| Figura 42 - Mapeamento granular dos produtos analisados | 125 |
| Figura 43 - KIM básico do módulo 1 da análise | 126 |
| Figura 44 - Exemplo de fixadores tipo 2 e 3 | 127 |
| Figura 45 - Módulo <i>display</i> para diferentes modelos de produto | 128 |
| Figura 46 - Exemplos de <i>Board</i> encontrados nos produtos | 128 |
| Figura 47 - Exemplos de baterias encontradas nos produtos analisados | 129 |
| Figura 48 - Elementos periféricos e componentes do corpo do produto | 130 |
| Figura 49 - Elementos componentes do módulo carregador | 131 |
| Figura 50 - Energia consumida durante a fase de uso dos produtos analisados | 132 |
| Figura 51 – Resultados de ecoauditoria incluindo a fase de uso | 133 |
| Figura 52 – Resultados de ecoauditoria desconsiderando a fase de uso | 134 |
| Figura 53 - Elaboração dos KIM completos para cada módulo | 135 |
| Figura 54 - KLP e os índices de fixadores do produto (modelos 1 e 2) | 136 |
| Figura 55 - Matriz de precedência, matriz de nível e lista de fixadores | 138 |
| Figura 56 - Mapa de precedências do produto modelo 1 | 139 |
| Figura 57 - Mapa de precedências do produto modelo 2 | 140 |
| Figura 58 - Momento de falha segundo o lifespan para o modelo 1 | 142 |
| Figura 59 Elementos atingidos pela falha <i>segundo</i> o LLS no módulo 2 | 143 |
| Figura 60 - Elementos comprometidos pela falha no elemento M3 | 144 |
| Figura 61 Resiliência embutida no produto | 147 |
| Figura 62 - Recuperabilidade v.s. Tempo | 153 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1- Trabalhos relevantes relacionados..... | 28 |
| Tabela 2- Princípios da manufatura sustentável..... | 43 |
| Tabela 3 - Energia embutida em alguns materiais metálicos | 50 |
| Tabela 4 – Energia embutida de processamento | 51 |
| Tabela 5 - Energia embutida na preparação de polímeros..... | 51 |
| Tabela 6 - Energia acumulada na injeção de peças plásticas | 52 |
| Tabela 7 - Valores para calcular a energia consumida na manufatura de componentes eletrônicos..... | 54 |
| Tabela 8 - Energia embutida por km percorrido..... | 56 |
| Tabela 9 - Leiaute cálculo de energia embutida na fase de consumo..... | 57 |
| Tabela 10 - Análise do AEE para diferentes produtos | 63 |
| Tabela 11 - Razões para a obsolescência..... | 72 |
| Tabela 12 - Tabela de delimitação de escopo padrão | 92 |
| Tabela 13– Tabela de delimitação de escopo definido para a variável energia | 93 |
| Tabela 14 - Cálculo do consumo de diferentes aparelhos eletrônicos em função do tempo usando-se o programa SEDOP-GRIMA | 104 |
| Tabela 15 - Cálculo da energia de consumo em fase de uso de uma cafeteira nos EUA | 104 |
| Tabela 16 - Estado de possíveis resultados no final da vida útil do produto..... | 116 |
| Tabela 17 Energia necessária para retornar o produto ao estado A..... | 117 |
| Tabela 18 Energia necessária para retornar o produto ao estado B..... | 117 |
| Tabela 19 Energia necessária para retornar o produto ao estado C..... | 118 |
| Tabela 20 Energia necessária para retornar o produto ao estado D..... | 118 |
| Tabela 21 Energia necessária para retornar o produto ao estado E..... | 119 |
| Tabela 22- Delimitação do escopo para o estudo de caso | 124 |
| Tabela 23 - Cálculo da EER para os modelos 1 e 2 | 145 |
| Tabela 24 Custos energéticos caso A. modelo 1 | 149 |
| Tabela 25 Custos energéticos caso A. modelo 2 | 150 |
| Tabela 26 Custos energéticos caso B. modelo 1 | 150 |
| Tabela 27 Custos energéticos caso B. modelo 2 | 150 |
| Tabela 28 Custos energéticos caso C. modelo 1 | 151 |
| Tabela 29 Custos energéticos caso C. modelo 2 | 151 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 30 Custos energéticos caso D. modelo 1 | 151 |
| Tabela 31 Custos energéticos caso D. modelo 2 | 152 |
| Tabela 32 Custos energéticos caso E. modelos 1 e 2 | 152 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| DSR | Design Science Reseach |
| EE | Energia Embutida |
| EED | Energia Embutida Descartada |
| EER | Energia Embutida Relativa |
| EERM | Energia Embutida Relativa no Módulo |
| EESub | Energia Embutida na Substituição |
| ER | Energia Recuperada |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| LCA | <i>Life Cycle Assessment</i> |
| LLS | <i>Lower Lifespan</i> |
| MBOM | <i>Manufacturing Bill of Materials</i> |
| OP | <i>Planned Obsolescence</i> |
| PAE | Pequenas Aplicações Elétricas |
| REP | Resiliência Embutida no Produto |
| SP | Sistema de Produto |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 23 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA SOCIAL E ACADÊMICA | 26 |
| 1.2 | ALGUNS TRABALHOS ANTERIORES | 28 |
| 1.3 | OBJETIVOS..... | 29 |
| | 1.3.1 Objetivo geral..... | 29 |
| | 1.3.2 Objetivos específicos | 29 |
| 1.4 | CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS | 29 |
| 1.5 | METODOLOGIA CIENTÍFICA DA TESE..... | 30 |
| 1.6 | METODOLOGIA CIENTÍFICA APLICADA AO METODOLOGIA PROPOSTA..... | 31 |
| 1.7 | ESTRUTURA DO DOCUMENTO | 32 |
| | | |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 33 |
| 2.1 | ESTRUTURA DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 33 |
| 2.2 | ANÁLISES SUSTENTÁVEIS NA MANUFATURA | 34 |
| | 2.2.1 Tripé da Sustentabilidade..... | 36 |
| | 2.2.2 <i>Ecological Overshoot</i> (Dia da sobrecarga da Terra)..... | 40 |
| | 2.2.3 Contribuição da manufatura à pegada de carbono | 41 |
| | 2.2.4 Práticas de manufatura sustentável | 42 |
| 2.3 | AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (LCA) | 44 |
| | 2.3.1 Clube de Roma..... | 44 |
| | 2.3.2 Era SETAC | 45 |
| | 2.3.3 Era ISO 14040..... | 47 |
| | 2.3.4 Mapa do Sistema LCA (<i>Cradle to Grave - Cradle to Cradle</i>) | 47 |
| | 2.3.5 Energia embutida | 49 |
| | 2.3.5.1 <i>Materiais</i> | 50 |
| | 2.3.5.2 <i>Processos</i> | 52 |
| | 2.3.5.3 <i>Semicondutores</i> | 53 |
| | 2.3.5.4 <i>Terceirização</i> | 55 |
| | 2.3.5.5 <i>Transporte</i> | 56 |
| | 2.3.5.6 <i>Fase de uso</i> | 56 |
| | 2.3.5.7 <i>Descarte</i> | 58 |
| | 2.3.6 Ecoauditoria | 59 |
| 2.4 | FUNCIONALIDADE DO PRODUTO..... | 64 |
| | 2.4.1 Falha..... | 65 |
| | 2.4.2 Ocorrência da falha | 66 |
| | 2.4.3 Confiabilidade..... | 69 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 2.4.4 | Vigência do produto..... | 70 |
| 2.5 | OBSOLESCÊNCIA | 72 |
| 2.5.1 | Obsolescência programada | 73 |
| 2.5.2 | Resiliência..... | 77 |
| 2.5.3 | Ciclo fechado de produção..... | 81 |
| 2.6 | REDES BAYESIANAS E LÓGICA DE PRIMEIRA ORDEM..... | 84 |
| 2.6.1 | Redes Bayesianas..... | 85 |
| 2.6.1.1 | Inferência em redes Bayesianas multiconectadas..... | 85 |
| 2.6.2 | Linguagem de ordem | 87 |
| 2.6.3 | Lógica preposicional | 88 |
| 2.6.4 | Saídas do capítulo de fundamentação teórica | 90 |
| 3 | METODOLOGIA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA EMBUTIDA NO PRODUTO | 91 |
| 3.1 | IMPACTOS, INDICADORES DE CATEGORIA E MODELOS DE CARACTERIZAÇÃO..... | 92 |
| 3.2 | ESCOLHA DE PRODUTO E IDENTIFICAÇÃO DOS MÓDULOS | 93 |
| 3.2.1 | Mapeamento..... | 94 |
| 3.2.2 | Indicadores de categoria dos módulos | 95 |
| 3.3 | CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO | 97 |
| 3.3.1 | Distribuição de <i>lifespan</i> por módulos | 98 |
| 3.3.2 | Construção do modelo de precedência | 101 |
| 3.3.3 | Cálculo de energia de consumo em fase de uso..... | 104 |
| 3.4 | ANÁLISE DE FALHA CONSEQUENTE DA OBSOLESCÊNCIA..... | 107 |
| 3.4.1 | Delimitação da falha | 107 |
| 3.4.2 | Ocorrência da falha | 108 |
| 3.4.3 | Energia embutida relativa e energia recuperada | 111 |
| 3.5 | DETERMINAÇÃO ÍNDICE DE DESCARTE E RESILIÊNCIA EMBUTIDA DO PRODUTO | 113 |
| 3.5.1 | Índice de descarte..... | 114 |
| 3.5.2 | Cálculo da REP | 114 |
| 3.5.3 | Saída da proposta metodológica | 120 |
| 4 | APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA | 123 |
| 4.1 | SELEÇÃO DE IMPACTOS, INDICADORES DE CATEGORIA E MODELOS DE CARACTERIZAÇÃO..... | 123 |
| 4.2 | ESCOLHA DO PRODUTO E IDENTIFICAÇÃO DOS MÓDULOS..... | 124 |
| 4.2.1 | Energia embutida por módulo..... | 127 |
| 4.2.2 | Ecoauditoria | 133 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.3 | CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO..... | 134 |
| 4.4 | ANÁLISE DE FALHA CONSEQUENTE DA OBSOLESCÊNCIA..... | 141 |
| 4.5 | DETERMINAÇÃO DA ENERGIA EMBUTIDA RELATIVA E ENERGIA RECUPERADA E ENERGIA DESCARTADA | 145 |
| 4.5.1 | Energia descartada | 145 |
| 4.5.2 | Energia relativa | 146 |
| 4.5.3 | Energia armazenada | 146 |
| 4.5.4 | Cálculo do índice de descarte (ID)..... | 147 |
| 4.5.5 | Calculo da REP | 149 |
| 4.6 | ANÁLISES DE RESULTADOS DA AVALIAÇÃO..... | 153 |
| 4.7 | DISCUSSÃO DE RESULTADOS | 155 |
| 4.8 | COMPARAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS POR OUTROS AUTORES | 156 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 159 |
| 5.1 | CONCLUSÕES DA TESE | 159 |
| 5.1.1 | A respeito do escopo da tese..... | 159 |
| 5.1.2 | A respeito da metodologia formulada..... | 159 |
| 5.1.3 | A respeito dos objetivos da tese..... | 160 |
| 5.1.4 | A respeito do conceito de sustentabilidade..... | 161 |
| 5.2 | TRABALHOS FUTUROS..... | 161 |
| 6 | REFERÊNCIAS | 163 |

1 INTRODUÇÃO

Uma população, dentro de um sistema de limites infinitos e recursos ilimitados, aumentará de tamanho ilimitadamente seguindo um padrão logarítmico, conforme proposto por Malthus no século XVIII. Com limites finitos e recursos limitados, entretanto, Verhulst posteriormente percebeu que a população iria se expandir de acordo com as capacidades de carga do sistema até atingir o ponto de equilíbrio. Ele chamou esse comportamento sigmoide que definia o número de indivíduos ao longo do tempo de Função Logística. Conseqüentemente, sendo os seres humanos uma população que habita um planeta de extensão finita e recursos limitados, o esperado seria um comportamento similar ao estudado por Verhulst, porém a realidade não corresponde.

A sociedade atual quantifica as limitações do sistema por meio do indicador economia em, basicamente, quatro variáveis: Consumo, Investimento, gasto público e Exportações Netas (KUZNETS, 1955). Segundo informações fornecidas pelo Banco Mundial, o incremento do Produto Interno Bruto (PIB) no ano de 2017 foi de 3,8% em nível global (WORLD BANK, 2018) e, quando esse incremento é contrastado com o crescimento demográfico de 1,1%, observa-se que a economia apresenta um crescimento significativamente maior do que a população. Essa relação é recorrente desde a segunda metade do século XX (AGRAWAL, 2011), e tal fenômeno requer que exista maior consumo per capita anualmente. Isso é possível aumentando a oferta de produtos e diminuindo o ciclo de vida dos mesmos (MEADOWS *et al*, 1972).

A satisfação da demanda de consumo e exportações que incluam *commodities* (que são consideradas no primeiro e quarto item da equação de produto interno bruto) é garantida pela produção industrial, assim como pela mineração, as quais são responsáveis por mais de 30% do PIB mundial e, também, por 21% da produção de carbono, segundo informa a agência americana de proteção ambiental (EPA, 2016). Os esforços multidisciplinares para melhorar esses índices, na procura de aprimoramento do desempenho ambiental, apontam para o desenvolvimento conjunto de metodologias e políticas focadas na diminuição do consumo de recursos, revisão das necessidades e reutilização dos materiais. Dito isto, pode-se entender por que a manufatura sustentável está relacionada diretamente ao desafio de propor soluções ambientais e sociais que evitem o impacto negativo na economia.

Entretanto, a relação entre economia, ambiente e sociedade nem sempre foi vista como é atualmente e, para entendê-la, é preciso fazer uma breve resenha desde o ponto de

inflexão. O processo de responsabilidade ambiental contextualiza-se dentro de um roteiro de desenvolvimento mundial cercado por mudanças próprias referentes aos acontecimentos observados no decorrer das décadas (BOCKEN *et al*, 2016)

Em um primeiro cenário, com viés social, a revolução industrial forneceu produtos inovadores aos consumidores nas décadas iniciais do século XX, desconsiderando as limitações de recursos. Sendo assim, foi transmitida à população a carência de políticas sociais e de cuidado ao trabalhador mediante documentos como “tempos modernos” e suas análises subsequentes (ANDRIGHETTO, 2016); (ALLEN, 2019).

No segundo cenário, observando o viés econômico após a 2ª guerra mundial, apontava-se para o aumento na produção de bens requeridos em todos os países arrasados pelo conflito. Assim, simulava-se o cenário de crescimento sem a restrição de Verhulst, o que favoreceu a expansão da produção industrial ilimitada junto com benefícios econômicos ilimitados. O período descrito terminou junto com a execução do plano Marshall (EICHENGREEN, 2010). Naquele momento, em 1953, pode-se ver como o efeito da desaceleração no consumo após a reconstrução da Europa e Ásia definiu os limites da moral ambiental (BERENGUER, 2010).

A necessidade de manter os níveis de manufatura e produção industrial durante a chamada Era Dourada dos Estados Unidos (FIELD, 2009), assim como os indicadores de crescimento econômico, trouxe de volta as ideias propostas nos tempos da depressão norte-americana. Essas ideias consistiam, principalmente, em encurtar o tempo de vida dos produtos propositalmente, de forma a fazê-los apresentarem o que é conhecido nos dias de hoje como “obsolescência programada” (LONDON, 1932)

O conceito de obsolescência programada (OP) deriva do desenvolvimento do controle tecnológico (SLADE.G, 2009). O domínio das técnicas e processos de fabricação de bens contribuiu para a criação de conhecimento, o qual inclui confiabilidade, desempenho e tempo de vida projetados no desenvolvimento desses bens. A aplicação da OP propicia o encurtamento deliberado do tempo de vida desses produtos, dado o conhecimento do tempo de uso e do número de utilizações que o produto suporta. O fabricante justificaria as novas características do produto se apoiando na melhoria dos atributos e da entrega do valor agregado para o usuário, em detrimento do tempo de vida do produto (SHERIF, 1986), com o intuito de evitar a insatisfação do consumidor.

É necessário afirmar que, além da OP, o desenvolvimento acelerado de novos materiais e tecnologias, que acontece mais frequentemente desde o descobrimento da

microeletrônica (JOSIAS, 2009), encurta o tempo de vida dos produtos de base tecnológica. Essa situação acontece devido às próprias limitações do produto, que não mais consegue entregar a função requerida pelo usuário e, por conseguinte, torna-se obsoleto. Esse cenário não deve ser considerado OP, mas, ainda assim, ocorre descarte de produto em que alguns componentes internos do mesmo se encontram dentro da sua fase de vida útil. A característica comum com a OP é a quantidade uso de recursos disponíveis desnecessariamente (GUTOWSKI, 2017).

Atualmente, o descarte dos produtos pode ser quantificado em função da energia necessária para a fabricação dos bens, assim como em função da energia potencialmente economizada, caso os recursos utilizados consigam ser aproveitados para um segundo ciclo de vida. Isso é possível mediante técnicas como a Avaliação do Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment*, LCA) (FINNVEDEN *et al*, 2009); (GUINEE *et al*, 2011) e de softwares como SIMAPRO e GaBi (HERRMANN, 2015), entre outros, que conseguem identificar e mensurar os fluxos materiais e energéticos que permeiam fronteiras com os sistemas analisados.

Os resultados fornecidos pelas técnicas mencionadas permitem, segundo explicado anteriormente, estabelecer as variáveis de impacto e desempenho, ou mesmo conhecer o desenvolvimento técnico disponível, a fim de determinar a quantidade de recursos necessários para produzir um bem desde seu surgimento até seu fim.

É importante ressaltar que, com base na literatura disponível, estabeleceu-se a definição de obsolescência de um produto como a suspensão da entrega de sua função (ALADEOJEBI, 2013). Em vista das necessidades ambientais que a engenharia enfrenta visando resolver problemas no século XXI, a proposta do presente trabalho consiste em formular uma metodologia que permita quantificar a capacidade de um produto de se adaptar à obsolescência evitando, assim, seu descarte e otimizando a energia requerida para retorná-lo ao chamado ponto de equilíbrio.

Neste contexto, nesta tese foram utilizadas ferramentas disponíveis na literatura e plataformas de busca acadêmicas, em conjunto com uma revisão de literatura permanente, para construir o conceito de resiliência embutida no produto - REP, sendo a metodologia proposta aplicado a uma família de equipamentos eletrônicos. Os resultados conseguidos indicaram que a abordagem tradicional na a dimensão tempo não é garantia de sustentabilidade.

1.1 JUSTIFICATIVA SOCIAL E ACADÊMICA

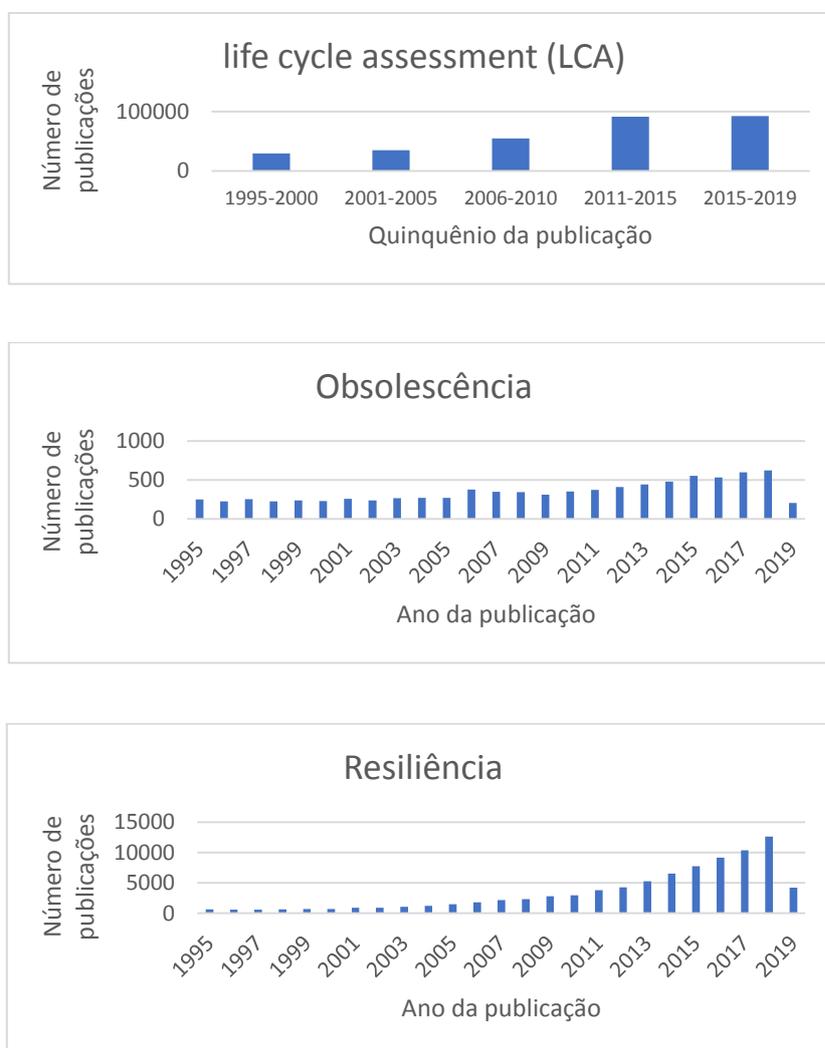
“Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente, mas o que melhor se adapta às mudanças” (atribuído a Charles Darwin) (MEGGINSON, 1964).

Durante o Acordo de Paris, no ano de 2015, foi mencionado pela primeira vez o termo “Metas de Adaptação Global”. Os participantes, cientes de que a redução de emissões de carbono podia não ser mais suficiente para evitar a mudança climática, expuseram a possibilidade de ser necessário se adaptar às condições futuras (ONU, 2018). No ano de 2017, a conferência sobre mudanças climáticas realizada em Bonn (Alemanha) reforçou esse objetivo e implementou o Plano de Adaptação das Nações (NAPS), baseado em quatro objetivos: a) adaptação fundamentada nos ecossistemas, b) conhecimento, análise e redes de comunicação, c) programas científicos sobre adaptação mundial, e d) acesso financeiro à adaptação (UNFCCC, 2012). Os incisos b) e c) pertencem ao escopo da responsabilidade da engenharia, da pesquisa, da manufatura e da fabricação, e sua motivação se baseia no desenvolvimento de soluções para problemas pertinentes. No caso desta tese, busca-se contribuir para a otimização de recursos já extraídos (ou minerados).

Simultaneamente, a consideração de que a cada novo ano os recursos que o planeta consegue recuperar anualmente terminam mais cedo, aparece como primeira justificativa desta tese. No ano de 2018 os recursos correspondentes àquele ano esgotaram em 1º de agosto, marcando assim o chamado “dia da sobrecarga da terra” mais cedo da história (LIN *et al*, 2018). A análise do ciclo de vida é, atualmente, uma das ferramentas mais utilizadas para conseguir entender os impactos ambientais gerados quando se analisam os processos como sistemas que interagem com os ecossistemas. Sendo assim, o passo seguinte foi a comprovação da pertinência e atualidade do tema objeto do trabalho a ser desenvolvido.

Utilizando duas das plataformas de busca mais reconhecidas no mundo acadêmico, verificou-se um aumento significativo na produção de artigos acadêmicos referentes às áreas específicas pertinentes a esta tese. Nas plataformas Google Scholar[®] e Scopus[®] observou-se que, em 2010, foram registradas em média 170.000 publicações com a palavra-chave “análise de ciclo de vida” e, desde 2011, publicaram-se mais 270.000. Intuitivamente, observa-se que a ferramenta tem sido bastante utilizada pelos cientistas e pesquisadores para analisar problemas ambientais, porém, para verificar e criar um sistema de confrontação dessas informações, foi realizada uma comparação técnica utilizando a base de dados Science Direct[®]. Os resultados encontrados são mostrados na figura 1.

Figura 1 - Aumento nas publicações com palavras-chave presentes nesta tese



Fonte. Elaborado pelo autor com dados do *Science Direct* (2019)

Com base na figura anterior, pode-se expressar o aumento no interesse relativo pelos temas desta tese ao redor do mundo acadêmico-científico nos últimos 25 anos como a segunda justificativa na elaboração deste trabalho.

Finalmente, a falta de consenso sobre o peso dos fatores de impacto ambiental causados pela indústria (REAP *et al*, 2008) convida os pesquisadores a propor novos conceitos que auxiliem na procura de propostas inéditas. A busca por esse ineditismo fornece a terceira justificativa para elaboração da tese.

1.2 ALGUNS TRABALHOS ANTERIORES

Abaixo são citados alguns trabalhos acadêmicos anteriores que, pela sua contribuição e relevância, são considerados no tocante à construção desse trabalho. Cada um deles será apresentado ao longo do capítulo de fundamentação teórica e assim aprofundada a sua contribuição acadêmica para a área específica estudada.

Tabela 1- Trabalhos relevantes relacionados

| | AUTOR E REFERÊNCIA | CONTRIBUIÇÃO ACADEMICA | CONTRIBUIÇÃO AO TRABALHO |
|----|---------------------------------|--|---|
| 1 | (MAXWELL, 2003) | Design sustentável e processos mais limpos | Atingimento do objetivo específico 1 |
| 2 | (RUSINKO, 2007) | Coordenação multinível dos <i>Stakeholders</i> | Atingimento do Objetivo específico 2 |
| 3 | (RACHURI, 2009) | Abordagem integrada ao ambiente, à economia e à sociedade | Atingimento do Objetivo Geral |
| 4 | (ASHBY, 2012) | Padronização da medição de energia embutida | Atingimento do Objetivo específico 2 |
| 5 | (DREXHAGE, 2010) | Acompanhamento e supervisão dos acordos mundiais sobre sustentabilidade | Atingimento do Objetivo específico 1 e do Objetivo geral |
| 6 | (DESPEISSE <i>et al</i> , 2012) | Produtividade dos recursos | Atingimento do Objetivo específico 1 |
| 7 | (SEOW, 2011) | Minimização do consumo energético | Atingimento do Objetivo específico 1, Objetivo específico 2, Objetivo específico 4 |
| 8 | (AUER, 2012) | Quantificação da energia requerida na operação de equipamentos eletrônicos | Atingimento do Objetivo específico 3 e Objetivo específico 4 |
| 9 | (DURAN, 2015) | Quantificação da energia descartada decorrente da obsolescência | Atingimento do Objetivo geral, objetivo específico 2, objetivo específico 3 |
| 10 | (GU, 2015) | Design para resiliência | Atingimento do Objetivo geral, Objetivo específico 3, Objetivo específico 4 |
| 11 | (DESPEISSE, 2013) | Redução de desperdício e recursos | Atingimento do Objetivo específico 1 |
| 12 | (HOSSEINI, 2016a) | Modelamento de redes bayesianas para resiliência | Atingimento do objetivo específico 1, Objetivo específico 2, Objetivo específico 3 |
| 13 | (CHASTAS, 2016) | Design de redes de energia embutida zero | Atingimento do Objetivo geral, Objetivo específico 1, Objetivo específico 2, Objetivo específico 3. |

Fonte: Elaborado pelo autor

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 **Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo geral definir o conceito de resiliência embutida no produto (REP) utilizando uma análise sistêmica na formulação de uma metodologia que permita otimizar o retorno ao ponto de equilíbrio (controle) para um produto que atingiu o estado de obsolescência, buscando a transição para um novo ciclo de uso.

1.3.2 **Objetivos específicos**

- Estabelecer através da revisão bibliográfica sistemática a identificação do ineditismo na área de pesquisa, que contribui para contextualizar a pertinência do problema analisado como atual e relevante para o ambiente científico.
- Construir uma metodologia que permita minimizar o descarte energético no retorno de um produto considerado obsoleto para o ponto de equilíbrio.
- Determinar a resiliência embutida no produto e o índice de descarte como duas propriedades do produto (PEP) que define a sua capacidade para ser retornado ao sistema de ciclo de vida
- Realizar a construção de um ambiente visual de ferramentas de análise que permita enxergar os critérios de tomada de decisão após o estado de obsolescência.
- Aplicar os indicadores formulados na análise a uma família de produtos com o intuito de avaliar a metodologia.

1.4 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

A principal contribuição esperada é a geração de conhecimento inédito para a área de manufatura sustentável. Considera-se aqui que se aplicou o rigor científico no desenvolvimento de procedimentos para a solução de problemas referentes à energia embutida e ao gerenciamento de recursos.

A segunda contribuição esperada é a elaboração de uma metodologia que possa ser utilizada, sem dificuldades e com resultados positivos, por diferentes tipos de usuários e para diferentes tipos de produtos.

Também deseja-se contribuir por meio da geração de questionamentos a respeito dos indicadores ambientais atuais e da possibilidade de melhorá-los com base na integração de vieses compartilhados. Como exemplo tem-se a comparação entre o tempo no aterro (plástico) e a energia requerida na fabricação (alumínio), em que pode-se perguntar qual deles é mais sustentável.

Espera-se ainda contribuir com o desenvolvimento de técnicas que, aproveitando propostas inéditas diante da utilização de lógica booleana, permitam a integração dos critérios de tomada de decisão comumente utilizados em outras áreas nessa aplicação específica. Por exemplo, serão utilizados os critérios de substituição de equipamentos no chão de fábrica, dada a sua obsolescência, e o modo como podem ser aplicados para a substituição de componentes do produto quando projetados para tal fim.

1.5 METODOLOGIA CIENTÍFICA DA TESE

A metodologia utilizada ao longo do desenvolvimento da tese adota duas abordagens a serem integradas no âmbito do método científico: a primeira permite um levantamento bibliográfico contextual visando a validação do ineditismo e relevância do trabalho, enquanto na segunda cria-se um artefato informacional (VON ALAN *et al.*, 2004). Depois, busca-se criar novo conhecimento por meio da solução de um problema prático que demanda uma mudança de maneira a contribuir com os objetivos dos tomadores de decisão.

A observação do problema no contexto da investigação acadêmica requer a delimitação do conteúdo, o que significa especificar com precisão a extensão das conclusões, assim como os fatores que serão levados em consideração.

As etapas do método científico para definir o problema e que foram adotadas são as seguintes: a) tema de pesquisa, b) contextualização dentro do conhecimento científico, c) causas do problema, d) fatores que afetam as causas do problema, e) identificação do problema de forma precisa, as consequências do problema com base em uma análise causa-efeito em que se explique o que gera o problema e o que acontece se não se soluciona o mesmo, f) identificação dos fatores principais, tanto ativos quanto passivos ou, ainda, diretos e indiretos, g) identificação das relações entre os atores dado o problema identificado, i)

formulação de um prognóstico com base em possíveis cenários, elencados a partir do menos favorável ao mais favorável, eliminando o problema, e j) geração de um modelo inicial do caminho a seguir para dar resposta efetiva ao problema. O acompanhamento dessas etapas permitirá uma fundamentação sistêmica da tese, assim como definirá a relação entre os objetivos e as conclusões obtidas. Tal processo será explicado em detalhes a seguir.

O processo epistêmico desenvolvido irá se fundamentar na dialética dedutiva que, segundo (SILVA, 2001), só permite a geração do conhecimento por meio da razão. O raciocínio dedutivo permite chegar à explicação do conteúdo das premissas, mediante uma cadeia descendente de raciocínio, partindo do geral para o particular, de forma a gerar uma conclusão.

Conceitualmente, o seguimento bibliométrico é uma metodologia de contagem de conteúdos bibliográficos e, portanto, não baseia-se na análise do conteúdo das publicações, mas, sim, na quantidade de vezes em que os respectivos termos aparecem nas mesmas ou na quantidade de publicações contendo os termos rastreados (YOSHIDA, 2010).

A importância da produção original do trabalho doutoral requer que o levantamento de dados transcenda a observação do problema e o levantamento de dados experimentais, diferenciando-se assim de outros tipos de pesquisas acadêmicas. Esse requerimento consiste no motivo pelo qual o levantamento bibliométrico é utilizado como ferramenta ativa que acompanha permanentemente o trabalho desenvolvido, servindo para rastreabilidade na avaliação dos objetivos formulados.

1.6 METODOLOGIA CIENTIFICA APLICADA AO METODOLOGIA PROPOSTA

Em segunda instancia a formulação do artefato informacional possibilita o auxílio no processo de tomada de decisões, pois permite explorar, organizar e analisar massas de dados que, caso não sejam avaliadas com algum método mais estruturado, não gerariam resultados tão valiosos para a tomada de decisões (DAIM, 2005).

A natureza dos dados é de metodologia quantitativa e o objeto do estudo é externo ao sujeito que o pesquisa, procurando alcançar máxima objetividade e identificando o comportamento e as limitações naturais do grupo sujeito aos fatos. Os instrumentos utilizam dados quantitativos, os quais incluem medições sistemáticas, e análise estatística como características ressaltantes (FERRER, 2010).

A pesquisa é caracterizada como exploratória, devido a suas características prescritivas que apontam para determinado fenômeno, ao estabelecimento de relações entre variáveis e ao envolvimento na utilização de técnicas padronizadas e de coleta de dados e tomada de decisão. Tomando então princípios do método tipo *Design Research Science* (DSR) mediante o ciclo mostrado por (WIERINGA, 2009).

Finalizado o capítulo de introdução, por meio do qual foi definido o escopo científico do trabalho, no próximo capítulo (fundamentação teórica) é descrito o processo de revisão bibliográfica.

1.7 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O documento de tese apresentado está conformado por 6 capítulos sendo eles:

1. INTRODUÇÃO. Na qual é definido o escopo acadêmico do trabalho realizado, relevância acadêmica, definição dos objetivos e metodologia aplicada na tese

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA. O capítulo apresenta a contextualização teórica formulada por outros autores, mediante a qual espera-se construir as bases conceituais para estruturar a metodologia acadêmica projetada para a tese.

3. METODOLOGIA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA EMBUTIDA NO PRODUTO. Capítulo no qual desenvolve-se a estrutura metodológica proposta pelo autor para qualquer corpo de estudo. A saída do capítulo é uma proposta metodológica que pode ser aplicada para diferentes produtos sempre que satisfazer os requisitos mínimos apresentados na etapa 1 do fluxograma de etapas que a compõem.

4. APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA. com o intuito de avaliar a proposta metodológica, utiliza-se uma família de produtos como aplicação de caso para analisar resultados primários e contrastá-los com aqueles esperados.

5. CONCLUSÕES. Uma vez avaliada a metodologia, o capítulo aborda a relação entre os objetivos propostos no momento inicial da tese e os resultados conseguidos, com o intuito de validar o atingimento dos mesmos, mesmo que a declaração de intenções para execução de trabalhos futuros.

6. REFERÊNCIAS. O capítulo apresenta o listado de autores e trabalhos acadêmicos utilizados ao longo do trabalho como base para sua construção conceitual acadêmica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O desenvolvimento do presente trabalho exigiu a construção de uma revisão bibliográfica contínua, a qual se iniciou em 2014 utilizando diferentes plataformas acadêmicas, sites de busca e bases de dados acadêmicas fornecidas tanto pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), quanto pela Universidade de Barcelona (UB), sendo elas: Google Scholar[®], Science Direct[®], Scopus[®], Scielo[®], mesmo que a plataforma Sucupira[®] com o intuito de tamisar a relevância das publicações segundo o index CAPES. A revisão de publicações compreendeu artigos publicados em periódicos indexados, memórias de congressos pertencentes às áreas de interesse, livros e informes técnicos, levando em consideração a qualidade e fidedignidade das informações fornecidas por órgãos mundiais dedicados à pesquisa ambiental e socioeconômica como a ONU e o Banco Mundial. Considerou-se também os sites pertencentes a estas organizações.

A revisão sistemática mencionada compõe-se de duas etapas.

- Revisão bibliográfica: É a primeira fase, anterior à Qualificação para o Doutorado, que ocorreu em outubro de 2016, na qual se construíram as bases da pesquisa documental. Os critérios de busca foram as palavras-chave definidas, assim como os conceitos derivados delas, complementando o escopo. Foram encontradas 550 publicações relacionadas ao tema específico, das quais 63 foram selecionadas para serem referenciadas no texto.
- Atualização bibliográfica: É a segunda fase, que começou depois do exame de Qualificação para o Doutorado, sendo influenciada pelas observações feitas pela banca avaliadora, bem como pelo doutorado sanduíche realizado na Universidade de Barcelona em 2017. Foram encontrados 350 artigos entre novas publicações e publicações não revisadas anteriormente, dos quais 82 foram incluídos como novas referências no presente trabalho. Houve um total de 145 trabalhos citados.

Ao longo do corrente capítulo será apresentado um resumo dos conceitos considerados facilitadores na compreensão e desenvolvimento da metodologia proposta.

2.1 ESTRUTURA DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A figura 2 mostra o fluxograma que descreve os temas abordados durante a fundamentação teórica. As áreas maiores do conhecimento necessárias na tese são

representadas pelos quadros brancos como seções numeradas que, por sua vez, estão conectadas entre si por meio das células intermediárias, vinculando os temas e conceitos que estão relacionados.

Adicionalmente, os quadros verdes trazem os tópicos específicos explicativos abordados nas seções, a fim de complementar o conhecimento necessário. A contextualização do problema é transversal às seções 1-4, enquanto as bases da resolução dos objetivos podem ser encontradas nas seções 4-5.

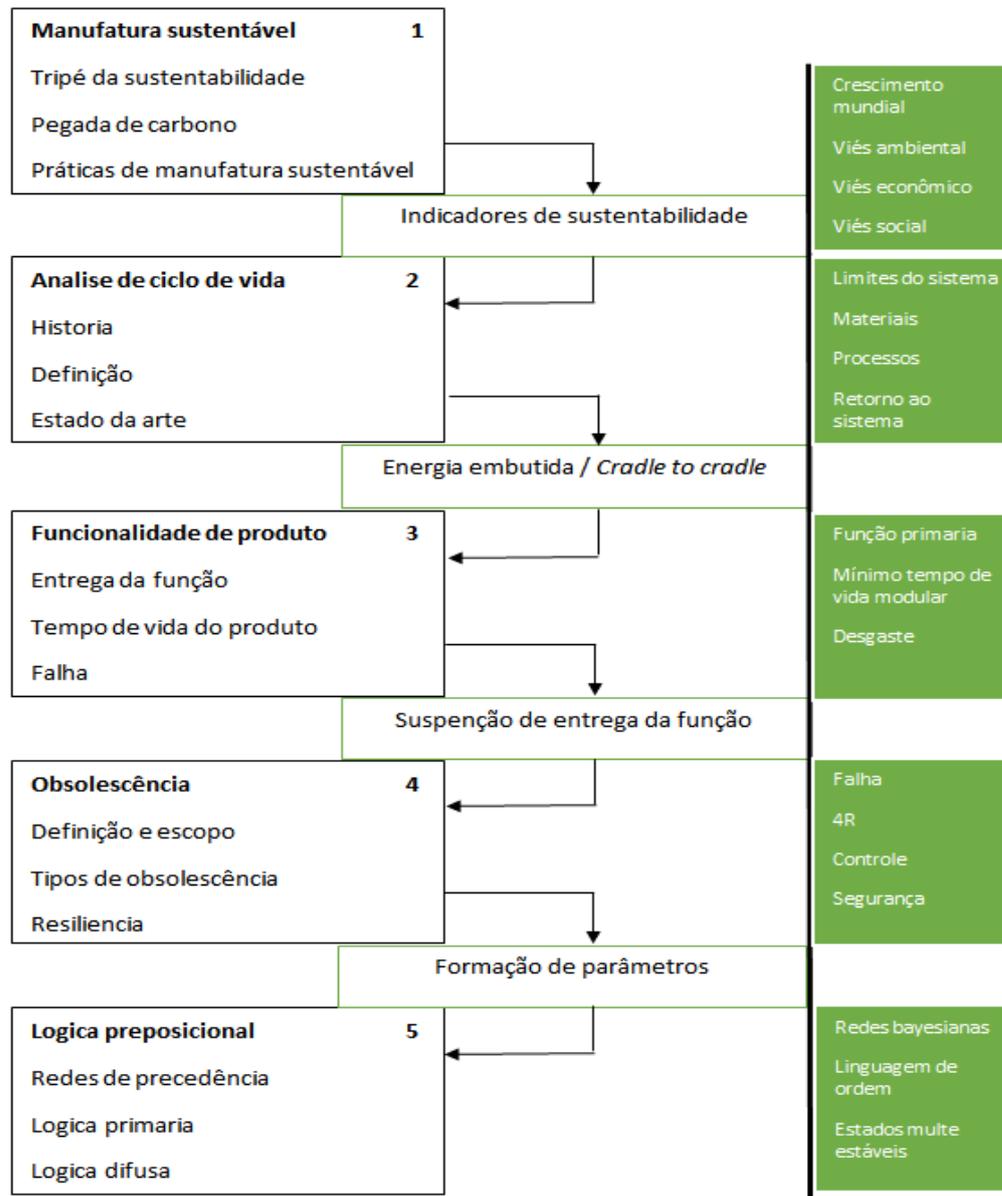
2.2 ANÁLISES SUSTENTÁVEIS NA MANUFATURA

Os questionamentos ambientais iniciais focaram-se nos impactos dos processos industriais nos ecossistemas, durante o desenvolvimento de projetos pontuais (POPE, 2004). As primeiras aproximações ao conceito atual referem-se a um binômio composto pelo desenvolvimento sustentável e desenvolvimento industrial, o qual foi ampliando seu escopo ao longo da segunda metade do século XX.

“O conceito de sustentabilidade e seu corolário, o desenvolvimento sustentável, converteram-se em parte da retórica política dos anos 1980. Isto se deve, em parte, à recente publicação do relatório da comissão Brundtland: ‘Nosso futuro comum’. Posteriormente, governos, grupos e indivíduos aproveitam-se do uso desses conceitos para justificar as suas propostas e (algumas vezes conflitivas) ações (DIXON, 1989)”.

Segundo Dixon (1989), a publicação da comissão Brundtland (BRUNDTLAND, 1987) foi um divisor de águas no desenvolvimento de políticas, indicadores e projetos ambientais no mundo. Cientistas, acadêmicos e pesquisadores aproveitaram seus ineditismos e unificação de conceitos para direcionar o desenvolvimento ambiental e sustentável no século XXI. Tanto “os limites do crescimento”, quanto o “nosso futuro comum” converteram-se em obras de referência, gerando múltiplas atualizações e análises subsequentes baseadas nos conceitos originais (DREXHAGE, 2010) (BARKEMEYER, 2014).

Figura 2 - Estrutura da fundamentação teórica



Fonte: Elaborado pelo autor

Um dos aportes principais da revolução do desenvolvimento sustentável foi a inclusão da variável social no binômio ambiente-indústria, transformando-o pela primeira vez num sólido tripé que incluía o humano dentro do equilíbrio ambiental (ELKINGTON, 2004).

Ainda no final da década de 1980, transcorridos 20 anos da publicação de importantes estudos sobre sustentabilidade, os quais fundamentaram múltiplos conceitos relevantes (MEADOWS *et al*, 1972) (MEADOWS, 2012), havia discrepância entre a

importância da sustentabilidade por parte dos acadêmicos, gerando divisões sobre o que se define como sustentável.

A produção prolífica de medidores de performance contava, já no final do século XX, com mais de 100 indicadores diferentes de sustentabilidade, como explicado por (SINGH *et al*, 2012). Segundo a caracterização dos indicadores específicos, foram definidos grupos classificados em áreas de pertinência como inovação, conhecimento, tecnologia, desenvolvimento e sustentabilidade de produto. Paralelamente, acrescentam-se indicadores de ordem geográfica como os indicadores de sustentabilidade para cidade, região e nação, indicadores baseados em energia e, finalmente, indicadores de qualidade de vida.

2.2.1 Tripé da Sustentabilidade

Com base nas informações mencionadas anteriormente, não é de estranhar que na contextualização dos problemas analisados pela manufatura aparecessem dimensões a serem levadas em consideração como: as pessoas, o planeta e a economia, constituindo bases do desenvolvimento da manufatura sustentável. O chamado tripé da sustentabilidade (ELKINGTON, 2004), representado nas políticas sustentáveis a seguir (Figura 3), define os três pilares sobre os quais se fundamenta a formulação de melhorias e melhores práticas no âmbito da manufatura (ALHADDI, 2015), sendo ele o motivo de permanentes revisões para a sua atualização (MAXWELL, 2003). Porém, os três pilares não são paralelos, requerendo a interação cooperativa das partes para conseguir atingir os requisitos de uma sociedade mais exigente e que, atualmente, presta mais atenção a como são fabricados os produtos que consomem.

Figura 3 – O Tripé da Sustentabilidade



Fonte: (GRUPO SANTA CATARINA, 2016)

“A sustentabilidade da *Santa Catarina Industrial Land* leva em conta três aspectos muito importantes: o aspecto ambiental, o social e o econômico. Juntos, estes conceitos formam o tripé da sustentabilidade da *Santa Catarina Industrial Land*. Sendo assim, além do uso dos recursos naturais, aspectos sociais e econômicos sempre são analisados, de modo a suprir as necessidades de nossos clientes, sem comprometer as gerações futuras” (GRUPO SANTA CATARINA, 2016).

No parágrafo anterior evidenciam-se as empresas em geral e, como exemplo, a indústria local, que se encontra em um processo de adaptação aos requerimentos ambientais exigidos pelo cliente como diferenciador na tomada de decisão (RUSINKO, 2007) , (THEOTOKIS, 2015) (LEE *et al*, 2016); A seguir serão detalhadas as três dimensões que compõem o tripé da sustentabilidade.

A. Dimensão ambiental

A dimensão ambiental ou ecológica (MILNE, 2013) se preocupa com a interação da empresa com o entorno no qual ela está localizada, assim como com os seus produtos, identificando potenciais efeitos causados pelo funcionamento da empresa, como também todos os processos de fabricação de bens.

Estudos realizados apresentam as necessidades de ações ecológicas para que as empresas caminhem para o chamado “estado atual de produção” que os autores definem como “estado melhorado” (SCHLICKMANN, 2015).

Segundo (SAVITZ, 2013), do ponto de vista ambiental, devem-se representar as medições de recursos naturais e refletir sobre as possíveis influências da sua viabilidade, em longo prazo. A partir daí, pode-se auxiliar as organizações a identificar os impactos que um projeto ou política teria sobre uma região. As variáveis incluem consumo de água, consumo de energia, resíduos tóxicos e sólidos, uso da terra, entre outros (SLAPER, 2011). Exemplos específicos de indicadores são:

- Concentração de dióxido de enxofre;
- Concentração de óxido nitroso;
- Seleção de poluentes prioritários;
- Consumo de eletricidade;
- Gerenciamento de resíduos sólidos;
- Mudanças na composição de superfícies de terras.

B. Dimensão econômica

A poluição pertence à empresa, ou seja, a empresa paga por ela seja como matérias-primas, ou como energia e tempo. A poluição é desperdício e o desperdício é descartado sem ser aproveitado. A redução de desperdício se verá refletida mediante a melhor utilização dos recursos da empresa (SAVITZ, 2013).

A sustentabilidade não pode ser considerada uma atitude altruísta. A função primária da empresa é a geração de lucro e, portanto, atividades destinadas à sustentabilidade que não gerem benefícios para a empresa aumentarão os custos de funcionamento, e tais custos terão que ser repassados para o cliente. Sendo assim, as políticas de sustentabilidade das empresas deverão estar focadas, em um primeiro estágio, na proteção do negócio, reduzindo o risco para consumidores, empregados e comunidades, identificando diariamente os riscos emergentes de forma a gerenciar falhas antecipadamente e se ajustar às modificações nas políticas públicas (SAVITZ, 2013).

Outros autores asseguram que, além do capital econômico, existem outros tipos de capital, como o capital ambiental/natural, o capital humano e capital social. A partir desse viés, a responsabilidade social da empresa confere compromissos com o meio ambiente, desenvolvendo políticas estratégicas que capitalizam ganhos com base em melhorias ambientais como conquistas próprias (SCHLICKMANN, 2015). Finalmente, a utilização dos reconhecimentos ambientais, tanto públicos como particulares, oferecem também uma boa chance de gerar reconhecimento para as empresas, se baseando nos progressos do tipo ambiental, que são utilizados como uma ferramenta para converter os gastos associados em vantagens econômicas para a empresa.

Segundo (SLAPER, 2011), alguns exemplos específicos de variáveis na dimensão econômica são:

- Ingresso pessoal;
- Custo do subemprego;
- Crescimento do trabalho;
- Porcentagem de empresas por setor;
- Retornos por setor que contribuem para produção estadual.

C. Dimensão social

Partindo do princípio que assume-se que é a atividade humana que entra em conflito com o equilíbrio natural, como mostrado anteriormente, e que o benefício econômico é também consequência de uma atividade humana (KNIGHT, 1942), considera-se o fator social como o terceiro pilar da sustentabilidade. No âmbito da dimensão social, devem ser incluídas medições para educação, pobreza relativa, porcentagem de população com estudos superiores, taxa de crimes violentos per capita e outros.

Mencionada anteriormente na subseção 2.2, utilizou-se a definição de (BRUNDTLAND, 1987) para começar a conceitualização do desenvolvimento sustentável. Porém, a definição leva em consideração críticos que consideram que os fatores utilizados para estabelecer a importância e a participação da sociedade no planejamento das atividades industriais do futuro, assim como a nossa permanência no planeta, são desconhecidos.

Segundo (GOLDEMBERG, 2015), a primeira das críticas é a de que a definição não diz nada sobre a métrica a ser usada. Como se deve interpretar a menção às “gerações futuras”? Quantas gerações? Nossos filhos? Nossos netos? A segunda crítica é a de que a definição ignora o fato de que existem grupos e classes sociais diferentes numa sociedade e que o interesse em garantir a sustentabilidade de cada uma delas pode ser diferente. Para os trabalhadores, por exemplo, ela pode representar melhores salários, para os bancos, melhor retorno para seus investimentos, para os produtores de carvão, maior consumo a preços compensadores, para os ambientalistas, melhor proteção ao meio ambiente, e assim por diante. Em análise, pode-se observar que algumas dessas situações são, evidentemente, conflitantes.

Outros trabalhos oferecem vieses contraditórios a respeito da dimensão social. Como explica (MILNE, 2013), existem posturas chamadas de “*Promethean optimism*”, explicada por (KEARY, 2016), que afirmam que nada deve ser feito, pois nada vai acontecer, dado que a civilização terminará por autorregular-se, ou por que a tecnologia se encarregará de solucionar os problemas. Por outro lado, os fatalistas propõem que não importa mais o que for feito, porque é impossível mudar o destino do planeta (GRAY, 2010). No meio termo, existem propostas que se fundamentam no *Overshoot* mencionado na introdução e que propõem o retorno da pegada de carbono a níveis inferiores aos valores de biocapacidade, o que permitiria ao meio ambiente começar uma recuperação prolongada.

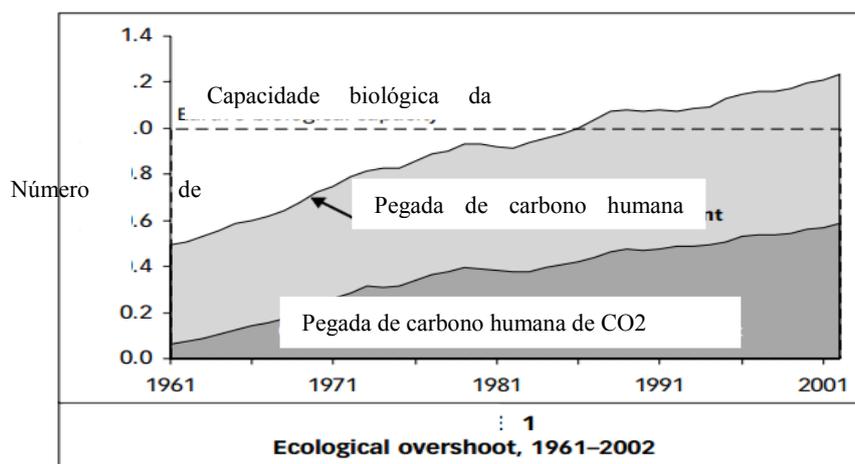
2.2.2 *Ecological Overshoot* (Dia da sobrecarga da Terra)

Quando se compara a oferta e a demanda, a humanidade ultrapassou a biocapacidade da terra, tendo chegado em 2002 a 20% a mais da capacidade máxima (Figura 4). Pode-se observar que, a partir da década de 1980, o planeta demorou mais do que um ano para se curar do dano sofrido ao longo de cada ano de exploração de recursos, ou seja, se estaria superando o consumo de recursos de mais do que um planeta Terra (NETWORK GLOBAL FOOTPRINT, 2009). A diferença entre a pegada ecológica gerada e a biocapacidade do planeta é chamada de *Ecological Overshoot*.

Essa variável pode ser expressa também como a data do ano em que os recursos do planeta correspondentes ao ano considerado foram esgotados. O que significa que todos os recursos consumidos a partir daquele dia corresponderiam àqueles a serem consumidos no ano seguinte, e essa variável derivada recebe o nome de *Ecological Overshoot Day* (POSTHUMA *et al*, 2014) (TOTH, 2016).

$$\text{Biocapacidade} = 1,8 \text{ ha/pessoa} < \text{Ecological Footprint} = 2,2 \text{ ha/pessoa}$$

Figura 4 - *Ecological Overshoot*

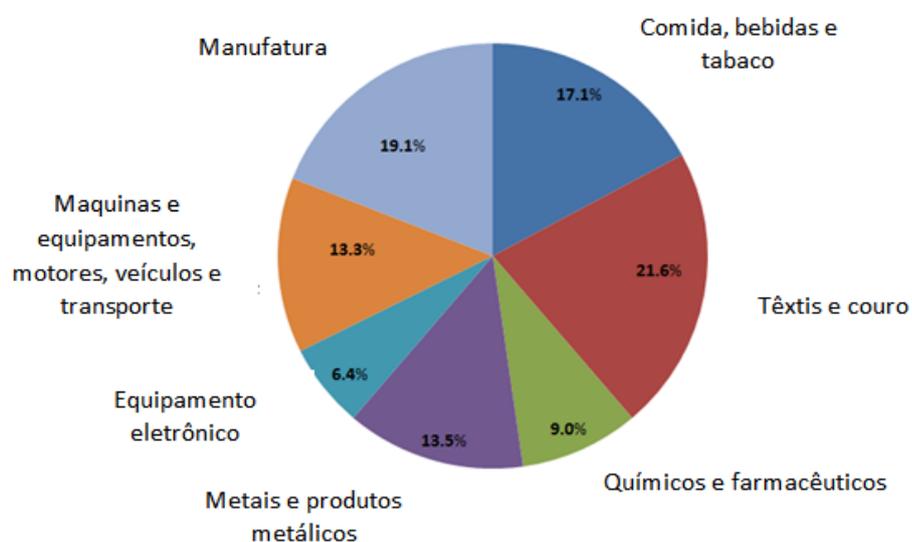


Fonte: (NETWORK GLOBAL FOOTPRINT, 2009).

2.2.3 Contribuição da manufatura à pegada de carbono

A produção mundial de GHG (*Greenhouse Gases* – Gases do Efeito Estufa) para 2015 encontra-se próxima dos 50 bilhões de toneladas métricas totais (EPA, 2016). Segundo indicadores fornecidos pela mesma agência governamental, 21% representa a produção industrial, o que corresponde a 10,5 bilhões de toneladas métricas. A produção industrial é focada na manufatura de diversos bens de consumo, em áreas alimentícias, têxteis, metalúrgicas, eletrônicas, entre outras (figura 5). A unidade apresentada para medição (Ton./m³ de CO₂-equivalente) homogeneiza a quantidade de recursos necessários para produzir todos os produtos que serão utilizados pelos consumidores, ajudando a entender o tamanho da contribuição industrial aos diversos fenômenos apresentados no mundo, estando as normas para sua parametrização disponíveis desde 2006 (NETWORK GLOBAL FOOTPRINT, 2009). Porém, quando detalhada segundo seus componentes, pode-se identificar a participação de diversos tipos de recursos como água, energia, materiais, etc.

Figura 5 - Discriminação industrial mundial por setor de produção.



Fonte: (BLS, 2013)

A indústria é responsável por um quinto da geração de GHG no mundo, assim como pela extração de matérias-primas virgens, tanto em mineração como em florestação. Pode-se observar que, no caso do Brasil, projeta-se que para 2030 será necessária a exploração dos recursos em 100% da sua capacidade, assim como o incremento das zonas de mineração de 3 a 5 vezes (FERREIRA, 2014), sendo muitas áreas pertencentes à região amazônica. Em relação a isso, pode-se inferir que o aumento demográfico e o modelo econômico inspirado no aumento da produção como indicador do PIB (SLADE.G, 2009), pressionarão a extração de materiais e da manufatura na fabricação de produtos comerciais. Considerando-se os estágios anteriores, seria pertinente que as preocupações dos pesquisadores conduzissem à definição de indicadores que permitissem o monitoramento e controle da degradação dos recursos naturais, bem como à determinação da capacidade do planeta de se recuperar, denominada biocapacidade.

2.2.4 Práticas de manufatura sustentável

No início da década de 1990 deu-se início à homogeneização dos conceitos de produção sustentável, que foram exibidos na Conferência das Nações Unidas para o Desenvolvimento do Meio Ambiente (UNCED, 1992), conhecida como Rio-92. Ali foi discutida a participação das indústrias mediante o elevado consumo de produtos, como parcela crítica da utilização de recursos ambientais, responsabilizando-as pela ameaça à sustentabilidade global. Como resultado, observou-se o aumento da procura por métodos de manufatura que reduzam o consumo de energia, materiais e água no escopo ambiental, e o início das políticas de responsabilidade social para os trabalhadores e comunidades envolvidas no sistema onde a empresa está localizada.

Os princípios da manufatura sustentável devem ser considerados como um caminho e não como um fim, visando a melhora permanente dos indicadores, sem buscar atingir metas fixas (VELEVA, 2001). Os principais indicadores estão representados na Tabela 2.

Tabela 2- Princípios da manufatura sustentável

| Dimensão | Descrição |
|--------------------|---|
| Produto e Serviços | Produtos e serviços devem causar pouco impacto ao meio ambiente e seguros ao longo do seu ciclo de vida |
| | Produtos e serviços devem ser projetados para serem duráveis, reparáveis, recicláveis, compostáveis e facilmente biodegradáveis |
| | Produtos e serviços devem ser produzidos e embalados com uma quantidade mínima de materiais e energia |
| Processos | Os resíduos e subprodutos “não ecológicos” devem ser eliminados, reduzidos ou reciclados |
| | Substâncias químicas e agentes físicos que representam ameaças a saúde humana e ao meio ambiente devem ser continuamente eliminados |
| | Energia e materiais devem ser conservados |
| | O local de trabalho deve ser desenhado para minimizar ou eliminar riscos físicos, químicos, biológicos e ergonômicos |
| Trabalhadores | Seus trabalhos devem ser organizados para conservar e melhorar a eficiência e a criatividade |
| | A segurança e o bem-estar são prioridades |
| | Devem ser encorajados e auxiliados para continuamente desenvolver seus talentos e capacidades |
| | Sua participação no processo de decisão deve ser incentivada |
| Comunidade | As comunidades impactadas pela atividade produtiva devem ser respeitadas e devem crescer nos aspectos econômicos, sociais, físicos e culturais. |
| | A justiça e igualdades devem ser promovidas |

Fonte: (SCHLICKMANN, 2015).

Finalmente, os objetivos principais dos indicadores de produção sustentável escolhidos por (SCHLICKMANN, 2015) são os seguintes:

- Educar empresas na produção sustentável;
- Comunicar os *decision makers*, fornecendo informações concisas sobre as tendências do desempenho da empresa/fábrica;
- Promover a aprendizagem organizacional;
- Fornecer ferramentas para mensurar seus objetivos, metas e alcances na produção sustentável (*Internal Benchmarking*);
- Permitir a comparação entre organizações do desempenho nos aspectos ambientais, econômicos e sociais da produção (*External Benchmarking*);
- Fornecer ferramentas para encorajar os *stakeholders* a se envolver na tomada de decisões.

A formulação dos objetivos não se refere especificamente a nenhum dos pilares da sustentabilidade, nem aos problemas específicos tratados no início da subseção, embora a

aplicação das práticas sugeridas e o alcance dos objetivos da manufatura sustentável consigam solucionar muitos dos problemas mostrados ao longo do capítulo.

Tendo construído o contexto histórico ambiental e de produção no qual irá se desenvolver esta tese, é evidente a importância de propor técnicas, métodos e metodologias que permitem otimizar a performance dos processos produtivos, minimizando o impacto ambiental. Porém, esse caminho não se inicia com este trabalho, mas, sim, com quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento de cientistas e governos interessados em propor políticas ambientais benéficas para o planeta.

Pesquisas posteriores visaram o caminho focando-se nos fluxos de materiais e energia para entender as interações entre operações de manufatura, infraestrutura e o entorno (DESPEISSE et al, 2012), introduzindo regras de eficiência na manufatura. Tais pesquisas formularam, também, modelos de ferramentas para mapeamentos de processos e sistemas para melhorar o impacto das atividades de fabricação (DESPEISSE, 2013).

Hoje em dia, a ferramenta mais utilizada para avaliar os impactos ambientais para inúmeros processos industriais, agropecuários e até mesmo de assentamentos humanos é a chamada Avaliação de Ciclo de Vida (LCA), e ela será descrita na próxima seção.

2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (LCA)

Como explicado por (GUINEE, 2011), a necessidade de comparar se o produto A é mais sustentável do que o produto B fez emergirem metodologias científicas com o intuito de comparar os impactos ambientais durante as diferentes etapas de vida dos produtos. Durante três décadas, a história de como a medição desses indicadores tem evoluído mostra a importância de se considerar a interação do consumo com as consequências para o planeta. A seguir é feita uma breve descrição da evolução do conceito de avaliação do ciclo de vida.

2.3.1 **Clube de Roma**

O Clube de Roma é uma organização nascida em 1968, como resultado da reunião de um grupo de industriais, cientistas e economistas. Esta organização se preocupava com as potenciais consequências da produção desmedida e sem controle, e seus participantes decidiram que era o momento de compartilhar conhecimento e gerar ideias e trabalhos conjuntos para mitigar o impacto daquelas atividades. Em 1972 a pesquisa foi encaminhada

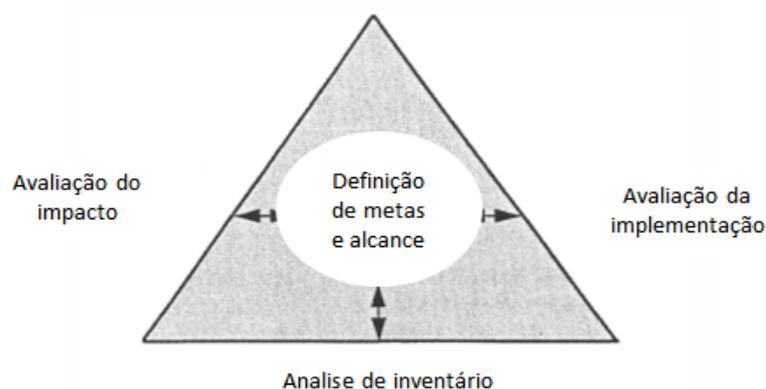
ao MIT e, posteriormente, publicada como o livro intitulado “Os Limites do Crescimento”, formalizando conceitos como a pegada de carbono. Dessa forma, se começou a definir os indicadores de aumento da pegada de carbono em consequência das atividades humanas, além de formular o primeiro modelo mundial. Finalizada a década de 1980, após a primeira crise do petróleo, ficou óbvio que os recursos não iriam durar para sempre, e que o crescimento econômico global poderia resultar em um desastre ambiental e social (MEADOWS *et al*, 1972).

Em 1969, a empresa Coca-Cola havia percebido a importância de formalizar as informações referentes ao uso da energia e materiais, assim como aos referentes ao impacto ambiental durante a extração dos materiais necessários para produção e embalagem dos seus produtos, de forma a utilizar essas informações como ferramenta na tomada de decisões gerenciais. Solicitou-se ao *Midwest Research Institute* (MRI) a formulação de uma metodologia para definir e avaliar os impactos da indústria no sistema circundante, que é conhecido como o primeiro LCA (HUNT, 1996).

2.3.2 Era SETAC

Posteriormente, como consequência dos trabalhos desenvolvidos na área, entre 1990 e 1993 a *Society of Environmental Toxicology And Chemistry* (SETAC) formulou o que seriam os princípios documentos formais do *Life Cycle Assessment* (LCA) ou, em português, Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), culminando na publicação do código de práticas (CONSOLI, 1993). Os resultados publicados pelo SETAC estão resumidos na Figura 6 e, posteriormente, serão apresentadas e detalhadas as relações entre as etapas do LCA.

Figura 6 - Resultados apresentados pela SETAC como princípios do LCA



Fonte: (KLOPFER, 1997)

Segundo (KLOPPFER, 1997) (SOARES, 2004) (GUINEE, 2011), as etapas do LCA são:

A. Definição de metas e alcance

Define as fronteiras do sistema (técnica, geográfica e temporal), as unidades funcionais, as regras e assunções (data, localização, regras para coprodutores, agregações), o tipo de impacto avaliado e valorização, os grupos que serão o motivo da análise (departamentos ou processos) e os observadores. Destaca-se a escolha da unidade funcional, que está definida a partir do objetivo de estudo, da sua utilização e da função estruturada.

B. Análise de inventário

Representa a análise central do LCA, sendo mais bem desenvolvida e com mais componentes técnicos. É relativamente bem conhecida e foi utilizada desde o começo.

Observa-se a definição das etapas do ciclo de vida: extração, produtos intermediários, o produto, a fase de uso e o descarte (incluindo também a energia), transporte e produtos auxiliares. Os resultados obtidos são quantidades de energia, materiais, fluxos, etc.

É importante destacar nessa etapa a formulação dos conceitos que compõem a homogeneização na construção do LCA atual.

- Processos elementares: Aqueles processos e funções presentes durante as fases do ciclo de vida e que devem cumprir as leis de conservação da massa e energia (mineração, fabricação e manufatura, por exemplo).
- Sistemas de produtos: Aqueles materiais que atravessam o sistema de processos na forma de fluxos.
- Categoria de dados: Categorizados como primários e secundários, são aqueles que quantificam as entradas e saídas (medidos, calculados ou estimados).

C. Avaliação do Impacto

O desempenho formal do impacto foi dividido em duas categorias de impacto. Na categoria A têm-se as entradas: a) fontes abióticas (fluxos, depósitos), b) fontes bióticas, e c) território. Na categoria B têm-se as saídas: a) gases de estufa, b) afetação da capa de ozônio,

c) impactos tóxicos humanos, d) impactos eco-toxicológicos, e) formação de foto-oxidantes, f) acidificação, g) eutrofização, h) odor, i) ruído, j) radiação, e k) vítimas.

D. Avaliação da Implementação (Melhorias)

Consiste na comparação dos estados passados, presentes e futuros, antes, durante e depois das implementações, valorizando a melhoria nos valores dos indicadores.

Com a designação da ISO para formulação da norma 14040, a última etapa, “validação das melhorias”, foi ampliada com interpretações, dado que o comitê técnico da ISO, encarregado da construção, considerou que a validação das melhorias era só uma das etapas para executar a conclusão do processo. O anterior foi feito de forma a se obter uma análise crítica de todo o LCA, e não apenas das melhoras nos impactos, abrindo espaço para a proposta de melhoras.

2.3.3 Era ISO 14040

A norma ISO 14040 define as metas e o alcance da Avaliação de Ciclo de Vida (LCA) como: compilação e inventário das entradas e saídas de um sistema de produção (produto), avaliação do potencial impacto associado com essas entradas e saídas, interpretação dos resultados das análises dos inventários e a avaliação das fases de impacto, em relação aos objetivos do estudo.

O estudo do LCA deve: examinar os fluxos de material e energia na obtenção do material, preparação, manufatura, distribuição, estocagem, uso, manutenção e opções de reparação e reciclagem, além do manejo de resíduos gerados (ICONTEC, 2000).

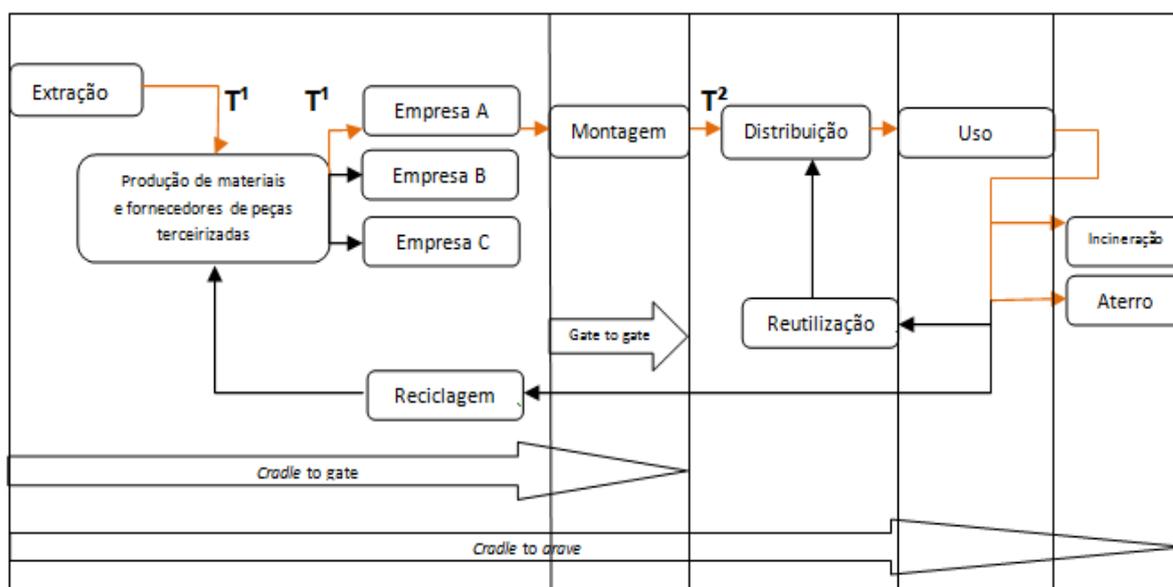
2.3.4 Mapa do Sistema LCA (*Cradle to Grave - Cradle to Cradle*)

O método para avaliação do ciclo de vida pode ser utilizado para mapear o fluxo dos recursos referentes ao produto. Aplicando-se as definições do *Life Cycle Inventory* (LCI), um produto pode ser discriminado nas etapas do seu ciclo de vida (mineração, preparação, produção, uso, descarte), e delimitado por uma fronteira que define o sistema e o entorno da empresa, referente ao produto analisado (KLOPFER, 1997). O mapeamento, desde a extração de materiais até o descarte dos produtos, assim como do fluxo da energia e geração

de gases do efeito estufa durante a vida do produto, é conhecido como *Cradle to Grave* (do berço ao túmulo).

Na figura 7 se observa um exemplo de mapeamento *Cradle to Grave*: as setas em branco na parte inferior separam a fase *Cradle to Gate* (do berço ao portão), que engloba todos os processos ocorridos desde a extração até a saída do produto para uso, e a *Cradle to Grave*, que começa desde a extração até o descarte, incluindo as fases de uso de produto e descarte em aterro ou incineração. O fluxo de materiais e energia pode ser acompanhado pelas setas conectoras das caixas de processo. Leva-se sempre em conta que o sentido da seta define se o valor é adicionado ao subtraído do valor da pegada ecológica (DURAN, 2015).

Figura 7 - Mapa *Cradle to Cradle/Cradle to Grave*



Fonte: (DURAN, 2015)

O mapeamento *Cradle to Grave* se caracteriza por ser linear, ou seja, é acumulativo ao longo da cadeia. A energia e a geração de poluentes se incrementam paralelamente à vida do produto. Isso significa que, quando descartado, o produto leva consigo uma carga inerente à pegada ecológica, e na figura 7 corresponde às setas que vão da esquerda para a direita, em cor laranja.

Continuando com (DURAN, 2014) explica que, se durante as etapas de ciclo de vida se reutilizam os subprodutos gerados, aproveitando a energia que iria ser descartada em forma de calor, ou, ainda, reinsertando materiais e peças no final da vida útil do produto efetuando a

reciclagem, acondicionamento ou reuso, tem-se uma diminuição da pegada ecológica. Na figura 7 isto corresponderia às setas que vão da direita para a esquerda ou de baixo para cima, em cor preta.

Os recursos reaproveitados são quantificados em forma de energia, e os valores são traduzidos como energia armazenada, já que correspondem a processos que não deverão ser efetuados novamente. Ao estado ideal de reaproveitamento, evitando descarte de materiais no aterro, dá-se o nome de sistema *Cradle to Cradle*. Evidentemente não é fácil efetuar um processo com reaproveitamento total (“zero desperdício”), motivo pelo qual os estudos focam na geração de produtos que combinam os dois estágios, procurando minimizar o valor final da pegada ecológica mediante o reaproveitamento máximo de recursos sem afetar os benefícios econômicos – conceito definido por (BRAUNGART, 2007) e chamado de eco efetividade.

O intuito de conceitualizar a energia utilizada durante os processos do ciclo de vida do produto corresponde ao domínio técnico do sistema. O consumo de energia na manufatura pode ser reduzido mediante o uso eficiente de tecnologias e equipamentos e/ou por meio do monitoramento e controle da energia usada durante a fabricação (SEOW, 2011).

2.3.5 Energia embutida

Como visto na definição de *Cradle to Grave / Cradle to Cradle*, a vida útil de um produto pode ser expressa em função de um sistema de limites definidos, no qual ocorre intercâmbio de materiais e energia, e que contém uma série de processos elementares durante as fases de transformação, uso, transporte e descarte. Um dos fluxos que o atravessa é a energia, e ela pode ser mensurada em relação ao investimento acumulado nessas fases, conforme descrito a seguir.

Por definição a energia embutida é a quantidade de energia requerida para fabricar 1 kg de material utilizável (ASHBY, 2012). Isto significa que os processos requeridos para transformar o material desde a sua extração, transporte e, posteriormente, refinamento, até transformá-lo em *pellets*, são somados para calcular a energia embutida de um polímero (plástico) específico, expressa em megajoules (MJ) por kg. Por exemplo, o valor da energia embutida para o polímero PET (politereftalato de etileno) é 83 MJ/kg.

A padronização dos processos necessários para a adequação dos materiais elementares já foi tabelada (ASHBY, 2012) (GUTOWSKI *et al*, 2013), e continua sendo

atualizada à medida que aparecem novos processos de manufatura. Abaixo serão mostrados alguns exemplos desses dados.

2.3.5.1 *Materiais*

Na Tabela 3 é apresentada a energia embutida para a produção de alguns materiais metálicos.

Tabela 3 - Energia embutida em alguns materiais metálicos

| <i>Material</i> | <i>Massa (kg)</i> | <i>Energia</i> | <i>CO₂</i> |
|--------------------|-------------------|----------------|-----------------------|
| Alumínio comercial | 1 | 220 | 12 |
| Magnésio | 1 | 375 | 23,6 |
| Titânio | 1 | 670 | 41 |
| Cobre | 1 | 71 | 5,25 |
| Chumbo | 1 | 55,5 | 3,5 |
| Zinco | 1 | 13,05 | 3,85 |
| Níquel | 1 | 133,5 | 8,35 |
| Aço | 1 | 32 | 2,5 |
| Aço inoxidável | 1 | 81 | 5,05 |
| Ferro | 1 | 17 | 1,05 |
| Latão | 1 | 72 | 2 |

Fonte: Adaptado de (CICERI, 2010)

A equação da energia embutida, composta pela soma da energia de processamento do material e pela energia de mineração e transporte primário, permite quantificar a energia embutida em uma peça manufaturada considerando os processos necessários para a sua fabricação. Ela considera o processo de preparação do material primário unicamente, e torna possível conhecer a energia investida durante os processos de fabricação.

Na Tabela 4 são mostrados dados obtidos mediante bases de dados abertas (CICERI, 2010). Deve-se considerar que os dados fornecidos são discretos, e podem variar devido aos diversos processos e máquinas utilizadas, bem como pela localização geográfica da empresa que realiza a operação.

Tabela 4 – Energia embutida de processamento

| <i>Processo</i> | <i>Energia consumida MJ/kg de material</i> |
|--------------------|--|
| Fresamento | 1,3-2,6 |
| Moagem | 8,8 |
| Fundição de ferro | 19-29 |
| Moldagem em areia | 11,6-15,4 |
| Forjamento | 16,3 |
| Jato de água (aço) | 167-238 |

Fonte: Adaptado de (CICERI, 2010).

Para quantificar a energia embutida na preparação de polímeros, é preciso levar em conta o processo de refinamento dos hidrocarbonetos, que depende do tipo de polímero e, posteriormente, dos processos de preparação do material para ser utilizado nos processos industriais (peletização). Na Tabela 5 se observam os valores da energia embutida, assim como do CO₂ gerado na fabricação de alguns polímeros, por kg.

Tabela 5 - Energia embutida na preparação de polímeros

| <i>Material</i> | <i>Massa kg</i> | <i>Energia</i> | <i>CO₂</i> |
|------------------|-----------------|----------------|-----------------------|
| ABS | 1 | 96,5 | 3,45 |
| Poliamida | 1 | 128 | 5,5 |
| Polipropileno | 1 | 97,5 | 2,7 |
| Polietileno | 1 | 81 | 2,1 |
| Policarbonato | 1 | 110 | 5,65 |
| PET | 1 | 83,8 | 2,33 |
| PVC | 1 | 81,5 | 2,4 |
| Poliestireno | 1 | 92,5 | 2,85 |
| PLA | 1 | 53 | 2,37 |
| Epóxis | 1 | 117,5 | 4,39 |
| Poliéster | 1 | 88 | 2,85 |
| Borracha | 1 | 66 | 1,5 |
| Elastômero (EVA) | 1 | 91,25 | 3,035 |

Fonte: Adaptado de (ASHBY, 2012).

2.3.5.2 Processos

Trabalhos posteriores utilizam a metodologia de (ASHBY, 2012) sobre energia embutida em materiais, para quantificar a energia acumulada no produto. Considerando que existe uma semelhança entre a preparação de 1 kg de material para processamento e a preparação de uma peça para montagem, considera-se que a energia embutida na peça final é a energia requerida para a fabricação da peça somada ao acúmulo energético.

O processo de injeção, por exemplo, é executado por máquinas hidráulicas, eletrônicas ou híbridas, e a média de consumo de energia encontra-se entre 12,6 e 19 MJ/kg de material obtido (Tabela 6).

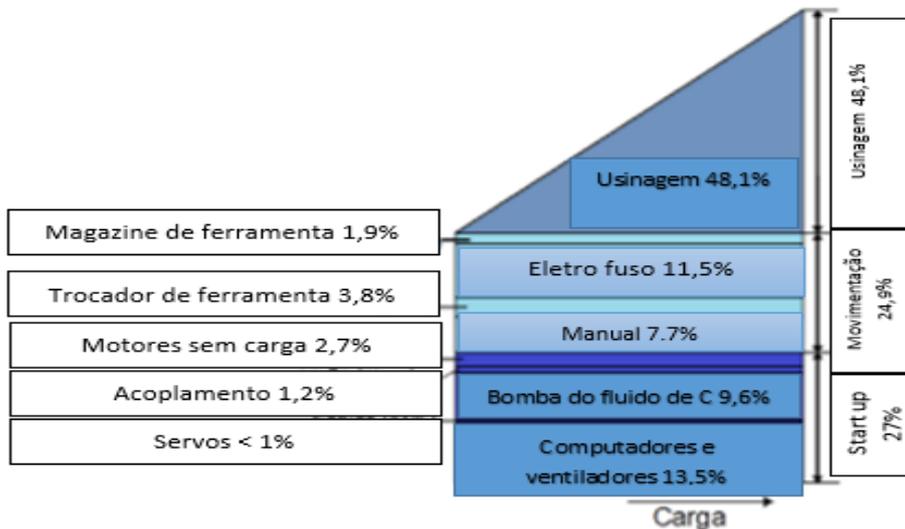
Tabela 6 - Energia acumulada na injeção de peças plásticas

| <i>Processo</i> | <i>Fornecimento E</i> | <i>Fornecimento MJ</i> | <i># Peças/Hora</i> | <i>Energia/Peça</i> |
|-----------------|-----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| | kW/h | Austrália | | |
| Injeção | 55 | 10 | 40 | 13,75 |

Fonte: Adaptado de (ASHBY, 2012)

Os valores de consumo energético alteram-se de acordo com diversas variáveis, entre elas a potência da máquina utilizada, o *mix* energético da região onde se encontra a máquina (WOO, 2017) e a quantidade de peças por unidade de tempo. Segundo (DE CARVALHO, 2015), a energia consumida durante a fase de agregação de valor desconsidera valores importantes para o cálculo do investimento total energético em cada peça, sugerindo-se realizar uma análise completa da célula de produção, do tempo total de funcionamento e das paradas programadas da máquina na quantificação do consumo. Na Figura 8 se observa como a energia diretamente dedicada ao processamento não corresponde à indicada pelo manual técnico da máquina.

Figura 8 - Distribuição do consumo energético de uma máquina ferramenta



Fonte: Adaptado de (DE CARVALHO, 2015)

Considerando-se os aspectos citados anteriormente, os cálculos de investimento energético nos processos devem incluir os valores ocultos da manufatura para chegar a quantidades mais próximas do consumo real, antes de serem normalizados como energia embutida.

2.3.5.3 Semicondutores

A categoria de semicondutores merece um destaque no que se refere aos tipos de componentes fabricados, devido ao que aparece depois da definição de energia embutida nos processos. Segundo (DURAN, 2015), a categoria de semicondutores é uma exceção em relação aos outros tipos de materiais, dado que o investimento energético na obtenção dos materiais será menor do que o requerido no processamento, pois a sua manufatura pode conter até 400 etapas. A variedade de métodos com os quais cada empresa pode levar ao final o desenvolvimento desse produto faz com que as fontes de dados não sejam normalizadas com facilidade. Porém, a apresentação física e comercial do material básico (“*core*”), do qual serão cortados os *chips*, é padronizada. Estes são discos de silício de pureza de 99,99%, polidos e tratados segundo os procedimentos e requerimentos da empresa fabricante para atingir as características funcionais do produto a ser manufaturado, denominados *wafers* (bolachas).

Os estágios estabelecidos separam a fabricação nas seguintes categorias: (i) manufatura do *wafer*; (ii) nível de empacotamento dos *chips*; (iii) manufatura do PWB (*printed wiring board*); (iv) manufatura dos conectores (v) manufatura do display; (vi) montagem final.

A literatura sugere medir a energia embutida do material *core* (KRISHNAN et al, 2008), calcular a área do material inserido no produto, e o tamanho do disco de *wafer* de procedência. Por exemplo, um *wafer* de 200 mm contém uma quantidade de energia igual a 1,495 kWh/cm², enquanto a quantidade de energia para um *wafer* de 300 mm é igual a 1,07 kWh/cm².

Seguindo o método proposto por (CICERI, 2010), apresentam-se na tabela 7 valores para calcular a energia consumida na manufatura de componentes eletrônicos.

Tabela 7 - Valores para calcular a energia consumida na manufatura de componentes eletrônicos

| | |
|--|----------------------|
| <i>Manufatura do wafer / Empacotamento do chip</i> | |
| <i>150 mm</i> | <i>9,7 kWh/g</i> |
| <i>200 mm</i> | <i>8,3-9,4 kWh/g</i> |
| <i>300 mm</i> | <i>4,6-5,2 kWh/g</i> |
| <i>Manufatura do PWB</i> | |
| <i>6 camadas kg/m²</i> | <i>333 MJ/ kg</i> |
| <i>Montagem final</i> | |
| <i>Por chip</i> | <i>0,2-0,3 MJ</i> |

Fonte: (CICERI, 2010)

Analisa-se, então, o tipo de *wafer* de procedência, que é definido muitas vezes pelo ano de produção da peça, dado que a maioria das empresas fornecedoras aumenta o tamanho do disco, quando tecnologicamente possível. Com isso, o analista situa-se na região da tabela correspondente a 150 mm, 200 mm e 300 mm e, depois, concatena o empacotamento do material dentro dos *chips*, que será calculado conforme descrito a seguir.

A massa resultante da soma dos *chips* é multiplicada pelo índice correspondente ao tamanho do *wafer*, obtendo-se um resultado em kWh, o qual vai ser multiplicado por 3,6 para obter-se o resultado em MJ. Depois esse valor é adicionado ao valor correspondente à manufatura do PWB, assim como ao valor da montagem final, que depende diretamente do número de *chips*. Caso se desconheça a massa dos *chips*, ou já esteja inserido no PWB, há a

possibilidade de realizar uma comparação seguindo a proporção proposta por (WILLIAMS, 2002), uma vez que um *chip* de 2g terá uma área de 2,7cm².

2.3.5.4 Terceirização

Na modelagem clássica do LCA no plano *Cradle to Cradle*, não aparece uma etapa chamada terceirização, mas existe na formulação do LCI uma etapa chamada produtos intermediários (CRAWFORD *et al*, 2018). Deve-se observar que, atualmente, é incomum que uma empresa fabrique todos os componentes dos seus produtos. Assim, a gestão de fornecedores tem se fortalecido por meio dos sistemas de gestão da qualidade e administração, com o intuito de aproximar os fornecedores das empresas que adquirem seus produtos, na procura por padronização e confiabilidade dos produtos fornecidos. A motivação consiste em incrementar o conhecimento sobre a origem de matérias-primas, tipos de processos executados e políticas trabalhistas.

Como consequência disso, quando as empresas realizam análises de risco e impacto dos produtos, elas precisam entrar em contato com seus *stakeholders* internos para compartilhar informações pertinentes.

Consideram-se, então, as peças não manufaturadas no interior da fábrica como contendo um aporte energético no valor final do produto, e deve-se calcular também o valor energético individual, como um dos fatores que influenciam no aporte dentro dos limites do subsistema *Gate to Gate* (CICERI, 2010). Alguns dos componentes terceirizados incluem telas, motores, baterias e câmera. Na soma final da energia embutida no produto devem ser acrescentados os valores de energia correspondentes a cada peça não manufaturada dentro do subsistema.

Uma possível resposta seria a utilização das tabelas de padronização desenvolvidas, e que fornecem dados aproximados de acordo com as medições indiretas que poderão ser realizadas pela empresa compradora ou até mesmo informadas pelo fabricante. No trabalho de (DANIEL, 2008), calculou-se que, para baterias Li-Íon, a energia embutida é igual a 150 MJ/kg. Isto significa que um comprador que quiser quantificar a energia embutida referente à bateria que compra para seu próprio produto, deve pesar a bateria, expressar o resultado em kg, e dividir por 150 MJ. Assim, outras peças como motores elétricos, telas LCD, câmeras e outros bens podem ser encontrados na literatura e utilizados para calcular a energia embutida nos produtos.

2.3.5.5 Transporte

Após quantificar a soma da energia na mineração, processos e produtos fabricados fora da fábrica, ainda falta considerar os transportes, que correspondem aos deslocamentos dos materiais do produto ao longo do processo de manufatura e que, dada a natureza do modal de transporte, requerem um gasto energético adicional (ASHBY, 2012).

O transporte inclui duas etapas bem definidas: (a) o transporte primário, que está limitado pelo fornecimento dos materiais processados ou sem processar, e que serão necessários na manufatura do produto, como matérias-primas ou peças adquiridas do fornecedor que serão localizadas no Gate e estão identificadas na Figura 7 como T¹; e (b) o transporte secundário (T² na Figura 7), que é o transporte requerido para levar o produto manufaturado e embalado até o consumidor final (MENTEZ *et al*, 2001).

O valor energético depende de três elementos mensuráveis: a distância percorrida, o modal escolhido (barco, trem, caminhão, avião), e o peso da peça transportada, como pode ser visto na tabela 8.

Tabela 8 - Energia embutida por km percorrido

| <i>Transporte</i> | <i>Km</i> | <i>MJ/t.km</i> | <i>Energia embutida</i> | <i>Massa t</i> |
|---------------------------|-----------|----------------|-------------------------|----------------|
| Mar | 100 | 0,16 | 0,01 | 0,001 |
| Trem 32 t | 100 | 0,31 | 0,03 | 0,001 |
| Caminhão 14 t | 100 | 0,46 | 0,04 | 0,001 |
| Caminhão | 100 | 0,9 | 0,09 | 0,001 |
| Carro a gasolina | 100 | 2,06 | 0,20 | 0,001 |
| Avião - grande autonomia | 100 | 8,32 | 0,83 | 0,001 |
| Avião - pequeno autonomia | 100 | 15 | 1,5 | 0,001 |
| Total | | | | |

Fonte: adaptada de (ASHBY, 2012).

2.3.5.6 Fase de uso

Segundo (DURAN, 2015), depois da entrega do produto ao consumidor, se inicia um novo estágio do sistema visto na figura 7. Todo produto possui uma finalidade para a qual foi projetado, e o desenvolvimento desta atividade será considerado no seu uso. O valor

energético associado a esse serviço será medido pelo consumo de energia elétrica durante a sua utilização.

Devido às perdas na transmissão, assim como dos *mix* energéticos individuais de cada região, o cálculo não pode menosprezar o *mix* energético para cada país, que se encontra disponível na literatura, uma vez que o consumo local deve ser multiplicado pelo fator correspondente. Além disso, existe um consumo indireto associado que depende das instalações requeridas para o uso do produto como, por exemplo, quando se requer redes de informações e transmissão de dados. Esse consumo também deve ser acrescentado, já que sem essas redes o funcionamento alvo do produto não pode ser realizado.

O tratamento da fase de uso para os produtos apresenta um desafio à análise de ciclo de vida, dado que a energia embutida pode ser quantificada com base nos diferentes vieses de acordo as necessidades do problema (Tabela 9).

Tabela 9 - Leiaute cálculo de energia embutida na fase de consumo

| Aparelho | kWh | | Tempo M uso | Dias | Tempo de | Energia cons. | OE Equiv. | OE Equiv. WO/SB |
|----------------|-------|-----------------|-------------|------|----------|---------------|-----------|--------------------|
| | Ativo | <i>Stand by</i> | dia | | uso | | | |
| | | | Horas/dia | | Anos | MJ | Japão | |
| Forno Elétrico | 1,5 | 0 | 2 | 100 | 4 | 1.200,00 | 6.480,00 | 6.480 |
| TV. CTR | 0,05 | 0,003 | 7 | 300 | 10 | 1.203,00 | 6.496,20 | 5.670 |
| | | | | | | 2.403,00 | 12.976,20 | |

Fonte: (DURAN, 2015).

Nesse contexto, (AUER *et al*, 2012) explica como a rede de comunicação sem cabo para celulares consiste de uma vasta rede de equipamentos para instalação de bases de transmissão de dados. A densidade de energia necessária dependerá da quantidade de equipamentos utilizando a rede, assim como do tipo de fluxo de dados presentes, tais como voz, internet, entre outros. A operação do sistema requer energia, mão de obra, manutenção, substituição de peças, etc. Sendo assim, pode-se assumir que o cálculo da fase de uso de um smartphone pode considerar valores além do período de carga e descarga da bateria durante a sua vida útil.

2.3.5.7 Descarte

Atingido o tempo de vida útil projetado pelo fabricante e, com a suspensão na entrega da função objetivo do produto, causada por uma falha, efetua-se o descarte do produto. Isto pode acontecer de vários modos, alguns com mais e outros com menos impacto para o ambiente, o que será explicado tomando como base o trabalho de (DURAN, 2015). Os materiais podem ser levados aos aterros, onde, dependendo do tipo de material, ficará inerte, esperando a degradação própria. Neste caso, o aporte energético no descarte dentro do plano *Cradle to Grave* será igual a zero, podendo aumentar quando for preciso tratar ou transportar novamente, como, por exemplo, para ajudar na degradação (BRAUNGART, 2007) Outra possibilidade corresponde a materiais que, durante a sua degradação, reagem quimicamente interagindo com o meio e, assim, após o descarte, estará gerando gases ou vazamentos. Neste caso, tais valores devem ser adicionados à soma final do aporte energético CTG (*Cradle to Grave*) dada a sua contaminação. Pode ser necessário, nessa situação, utilizar a incineração, caso a energia de radiação não seja aproveitada.

Uma opção mais amigável para o meio ambiente é o reingresso dos componentes ao ciclo de vida do produto. Outra possibilidade é o prolongamento do uso do produto mediante o condicionamento (que é uma contribuição positiva deste cenário, mediante a substituição da peça que ocasiona a quebra). Nesse caso, o produto mantém o valor agregado do produto original, o que evita/regula a entrada de um produto novo com as mesmas características. Uma terceira possibilidade é o reuso das peças ainda úteis na manufatura de outros produtos, economizando assim a energia correspondente à produção destas. Finalmente, tem-se o uso do produto para outro fim diferente do planejado, mas que cumpre outra função de utilidade para o consumidor.

A reciclagem é outra opção para reintegração dos materiais. Em muitas ocasiões, a reciclagem requer um reprocesso dos materiais para que possam ser usados na manufatura de novos produtos, geralmente de menor valor agregado, devido às novas características do material. Alguns autores consideram a reciclagem como *downcycling* devido à perda de algumas propriedades após a adequação (MCDONOUGH, 2010).

Tanto o condicionamento quanto o reuso e a reciclagem contribuem para a energia no resultado da ecoauditoria, uma vez que se evita o uso de novos materiais, processos de manufatura e transportes, no momento de fabricação dos novos produtos. Nesse caso, o valor

do *Cradle to Gate* correspondente aos materiais reingressados ao sistema deve ser subtraído do valor de ecoauditoria (ASHBY, 2012).

2.3.6 Ecoauditoria

Como desenvolvido por (ASHBY *et al*, 2009), (ASHBY, 2012), ao atingir o ponto de domínio técnico que permite conhecer os impactos ambientais ao longo da vida útil do produto, é possível modelar e simular diferentes variáveis e cenários para criar *decision makers*. O primeiro passo é a escolha e caracterização dos medidores e, para isso, existem duas tendências marcadas pelos acordos mundiais de sustentabilidade:

- O protocolo de Tóquio sugere a redução progressiva da emissão de gases do efeito estufa.
- Os tratados da União Europeia são focados na redução no consumo energético dos processos industriais.

A proximidade conceitual das duas variáveis permite combiná-las para realizar uma análise de estado atual e uma proposta de melhora chamada ecoauditoria, que é realizada como explicado a seguir.

A ecoauditoria agrupa os dados calculados para o mapeamento *Cradle to Cradle* e os apresenta como subsistemas, sendo estes decorrentes das fases de vida do produto. A análise permite buscar o *trade-off* no diagrama energético para propor melhoras que diminuam os valores resultantes dos fatores que contribuem energeticamente ao sistema, simulando mudanças como tipo de material, utilizando fornecedores mais próximos e melhorando os processos de manufatura. Isto é feito controlando-se as variações ocorridas nos outros subsistemas derivados de cada nova decisão. As categorias utilizadas, segundo (ASHBY, 2012), são:

- Materiais;
- Manufatura;
- Transporte;
- Uso;
- Total;
- Descarte;
- Total após descarte.

No exemplo apresentado por (ASHBY, 2012), para o caso de um secador de cabelo tem-se as seguintes condições iniciais:

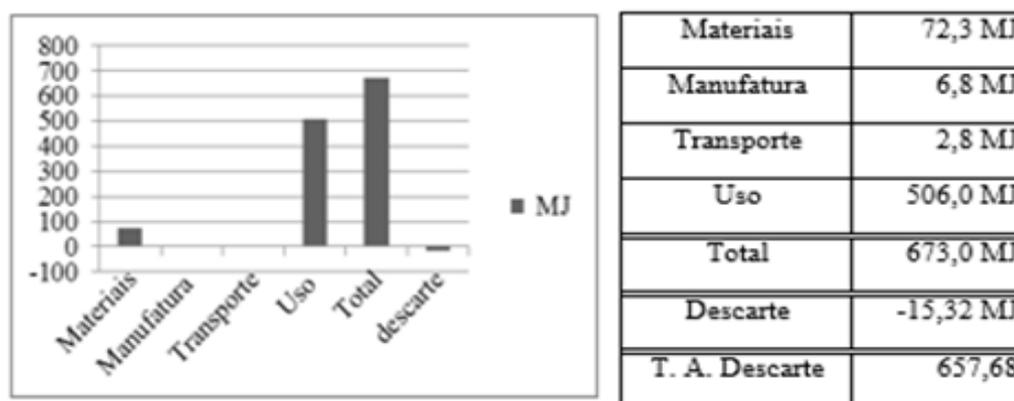
- Cradle to Use: consumo = 2 kW; massa = 0,89 kg; uso funcional = quando ligado; uso real = 3 minutos por dia; tempo total de uso (*lifespan*) = 3 anos; local de fabricação = sudeste da Ásia.
- Descarte: reciclagem da carcaça de polímero e subsistema do bocal.

Calculando-se os subsistemas segundo os itens anteriores, de acordo com a metodologia de (ASHBY, 2012), a energia embutida é quantificada pela Equação (1).

$$EMat + EMan + ETr + EU - ERd = EEP \quad (1)$$

Definindo E como a energia necessária para atingir a fase correspondente, sendo “Mat” (materiais), “Man” (manufatura), “Tr” (transporte), “U” (uso) e “Rd” (recuperada no descarte), a soma dos valores representa a energia embutida no produto. Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 9.

Figura 9 - Informe de ecoauditoria

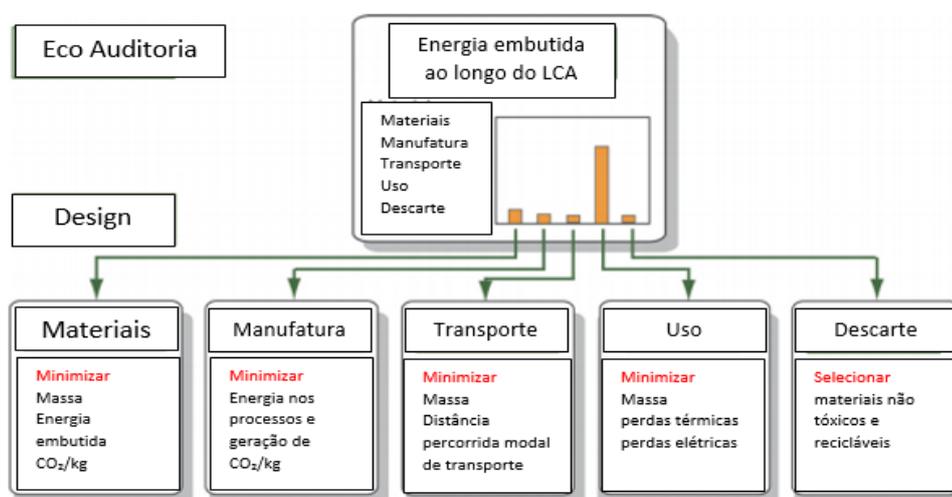


Fonte: (DURAN, 2015)

Analisando os resultados, constata-se que pode-se melhorar cada um dos subsistemas para diminuir o consumo energético durante as etapas da vida do secador, a fim de torná-lo mais sustentável. Porém, percebe-se que o valor que tem mais impacto é a fase de uso, correspondendo a 77% do total da energia embutida no produto, de forma que este poderia ser

o primeiro subsistema para propor melhoras, otimizando, por exemplo, o funcionamento do produto para que o secador consuma menos energia durante o seu funcionamento. Na figura 10 evidencia-se como a ecoauditoria sugere a implementação das ações à procura de uma melhor performance ambiental do produto para cada fase do LCA.

Figura 10 - Melhorias sugeridas com base na ecoauditoria



Fonte: Adaptado de (ASHBY, 2012).

2.3.6.1 Densidade energética

Como visto na subseção anterior, uma das possibilidades para mensurar os impactos ambientais criados pela produção é a quantificação da energia requerida durante a vida útil do produto perante a metodologia LCA.

De acordo com (SMIL, 2016) e (ZU, 2011) a densidade energética é a quantidade de energia por unidade de peso (densidade de energia gravimétrica), ou por unidade de volume (densidade de energia volumétrica):

- Densidade energética gravimétrica (J/kg) ou (Wh/kg)
- Densidade energética volumétrica (J/m³) ou (Wh/m³)

Também define a potência como volumétrica ou gravimétrica quando avaliada em função da massa ou o volume dos convertedores de energia. Por exemplo, para quantificar a taxa de entrega de energia de uma bateria de acordo ao seu peso ou volume, tem-se:

- Densidade de potência gravimétrica (W/kg)
- Densidade de potência volumétrica (W/m³)

Assim, conclui-se que os valores energéticos e de potência a serem entregues pelos produtos ou equipamentos podem ser medidos em função das suas características (massa e volume), assumindo a relação entre energia e a variável analisada como uma distribuição ou densidade. Do ponto de vista conceitual, há outra área do conhecimento que utiliza o mesmo princípio para analisar a energia embutida acumulada durante o ciclo de vida do produto como uma distribuição, que é o projeto de estruturas civis sustentáveis.

2.3.6.2 *Energia embutida anualizada*

A seleção de materiais é normalmente feita com base na intuição, experiência ou inspiração dos projetistas (MORALES, 2014). Começando com o desenvolvimento de estudos de propriedades e custos, podem ser criadas bases de dados de materiais candidatos para uso específico.

Mapas de materiais têm sido desenvolvidos para apresentar dados apropriados sobre as características dos materiais (ASHBY, 2012). Eles são utilizados para comparar diferentes características como custo, força, resistência, elasticidade, buscando auxiliar os projetistas na escolha de diferentes matérias-primas que satisfaçam os requisitos dos diferentes *stakeholders* (JAHAN *et al*, 2010).

Esta seleção de materiais afeta o uso do produto. A relação entre energia embutida durante a fase de uso e os materiais escolhidos é considerada na pesquisa relacionada à construção de edificações (HERNANDEZ, 2010), porém a relação pode ser aplicada a qualquer produto. Um elemento importante dessa relação é a energia embutida anualizada, a qual considera a relação entre o tempo de vida projetado para o produto, uma característica inerente dele (área, volume, massa), e a energia requerida para a sua manutenção ao longo do tempo de vida esperado para o seu funcionamento.

A energia embutida necessária para construir um metro quadrado da estrutura analisada, levando em consideração sua avaliação do ciclo de vida e, dependendo do tempo de vida projetado para a sua vida útil, resulta no valor indicado como AEE (*annualized embodied energy* - energia embutida anualizada). Isto sugere que, quanto menor for o valor da taxa da variável, mais sustentável será a construção. Em contrapartida, aquela que necessitar mais energia (construção e manutenção) em relação ao tempo de uso será menos sustentável (HUMAR *et al*, 2011).

Utilizando a metodologia explicada por (PADGETT, 2008), na Tabela 10 estão representados 4 exemplos de estrutura com as seguintes especificações: energia embutida, tempo de vida projetado em horas e área ocupada. Nos resultados observa-se que as AEE dos produtos 1 e 2 são iguais, assim como para 3 e 4, mesmo que possuam diferentes valores durante a tomada de decisão de projeto.

Tabela 10 - Análise do AEE para diferentes produtos

| Produto | Energia Embutida (MJ) | Vida útil projetada (horas) | Área (m ²) | AEE (MJ / h m ²) |
|--------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------|
| Construção 1 | 2.400 | 6.000 | 400 | 0,10 |
| Construção 2 | 4.000 | 8.000 | 500 | 0,10 |
| Construção 3 | 1.500 | 2.000 | 300 | 0,25 |
| Construção 4 | 2.000 | 4.000 | 200 | 0,25 |

Fonte: Elaborado pelo autor

As unidades para a energia embutida anualizada (AEE) são MJ/m²h, nas análises de edificações de carbono zero. Mas pode ser MJ/kggh quando a abordagem requerer um estudo baseado na massa.

O resultado será sempre uma taxa representada por uma coordenada de três valores, indicando energia embutida, tempo de vida e área de construção. Como visto na Tabela 10, os valores da taxa podem ser iguais para dois cenários diferentes, que indica correlação entre os valores adotados.

O intuito da metodologia para calcular o AEE consiste em comparar o investimento energético durante a etapa de construção de uma estrutura com a energia necessária para aquecer e prestar manutenção durante o tempo de vida projetado, possibilitando que um

investimento inicial maior alcance melhores resultados na poupança energética no final da vida útil da estrutura (SARTORI, 2012).

Explicada a ferramenta LCA e entendidos o produto como um sistema de limites definidos através dos quais flui energia, materiais e subprodutos com diferentes níveis de impacto, a próxima seção dará enfoque ao produto como meio pelo qual o usuário satisfaz uma necessidade.

2.4 FUNCIONALIDADE DO PRODUTO

O objetivo principal das empresas é o crescimento econômico (BOCKEN *et al*, 2016), sendo o desenvolvimento de novos produtos um dos meios para conseguir se manter competitivo nos mercados. O processo de criação de produtos pode ser analisado como um processo de negócio, ou seja, a organização de processos e atividades que transforme entradas (*inputs*) em saídas (*outputs*) de interesse para o usuário ou consumidor (MORRIS, 2011). Esse interesse pode surgir de várias maneiras, como, por exemplo:

- Demandas não atendidas;
- Atualização de produtos existentes;
- Alternativas para produtos existentes de difícil acesso para determinado grupo de consumidores.

Como explicado por (DUHOVNIK, 2005), a existência do produto se justifica por meio da satisfação da função para a qual ele foi criado. Durante o processo de planejamento de produto essa função se define conforme descrito a seguir.

A função do produto é determinada pelo objetivo para o qual foi projetado o sistema técnico. As funções são descritas usando expressões físicas e, quando necessário, expressões geométricas e sua relação topológica. Como exemplo tem-se a transformação de energia mecânica, possibilitando que um sistema técnico satisfaça mais do que uma função. Portanto, é necessário ordenar todas as funções que o produto foi projetado para realizar. Os requerimentos funcionais são expressos como a lista de requisitos que o sistema técnico deve ser capaz de cumprir.

Posteriormente, (DUHOVNIK, 2005) explica que a funcionalidade do produto expressa a relação entre a função e o produto, ou o uso que será dado pelo consumidor, criando uma relação dinâmica entre o objeto, o requisito e o usuário que necessitar utilizá-lo

para concluir uma tarefa ou ação. Existe então uma relação entre os elementos que compõem do produto e os requisitos funcionais do mesmo, através dos quais o usuário verá satisfeitas as suas necessidades.

Considerando que, segundo (ZHOU, 2018), a distribuição hierárquica dos elementos do produto pode ser expressa em função do seu MBOM (*Manufacturing Bill of Materials*), o termo utilizado no texto será granulação estrutural. A granulação representa a distribuição hierárquica entre os elementos que compõem o produto.

A partir da codependência nos elementos do produto, infere-se que, retirando um dos fatores de funcionalidade do produto, o equilíbrio da fase de uso durante a vida útil do produto será interrompido. O que acontece quando o produto suspende a sua funcionalidade será explicado a seguir.

2.4.1 Falha

Uma falha é definida como uma ocorrência que interrompe a função do item. Segundo (FERNANDES, 2015), pode-se classificar uma falha como um colapso total do sistema, deixar de operar por completo, ou continuar a operar, mas fora de uma faixa tolerada, desviando-se assim do ponto desejado de operação e comprometendo a sua funcionalidade. O segundo caso pode ser desdobrado de acordo com o tipo de resultado obtido durante o estado de interrupção:

- O produto encontra-se abaixo das especificações de produto;
- As especificações conseguidas encontram-se sobre as projetadas para o produto;
- O produto é prejudicial para uso.

Em qualquer um dos casos, o sistema analisado parou de entregar a sua função e, portanto, falhou (ZHANG, 2011).

É preciso esclarecer que a definição de falha corresponde ao evento. O estado no qual foi levado o sistema após a ocorrência é definido como pane e, como explica (TAKAHASHI, 2010), pode ser classificado segundo a sua duração em:

1) Avarias abruptas:

- Fatais: mais de três horas de duração;
- De longa duração: mais de uma hora;
- Gerais: de cinco a dez minutos;
- Menores: menos de cinco minutos.

2) Avarias por deterioração: inicialmente não levam à parada, mas, ao longo do tempo, comprometem a função do equipamento:

- Por deterioração funcional;
- Por deterioração da qualidade.

2.4.2 Ocorrência da falha

O evento de falha acontece no momento em que a interação das cargas atuantes em um equipamento ou estrutura supera a resistência dos materiais ou estruturas utilizados na sua construção. É preciso então entender a importância da relação entre as forças e limites que ocorrem durante a vida dos produtos (LAFRAIA, 2001).

Se os valores de carga e a resistência fossem estáticos e exatos, seria muito simples escolher um material ou estrutura mais resistente do que a carga a que encontra se submetido, e o produto não apresentaria falhas, como é mostrado na figura 11. Porém, na realidade, existem outros fatores físico-químicos que levam ao comportamento das variáveis e ao porquê das ocorrências (FERNANDES, 2015).

Figura 11 - Carga e resistência paralelas no produto

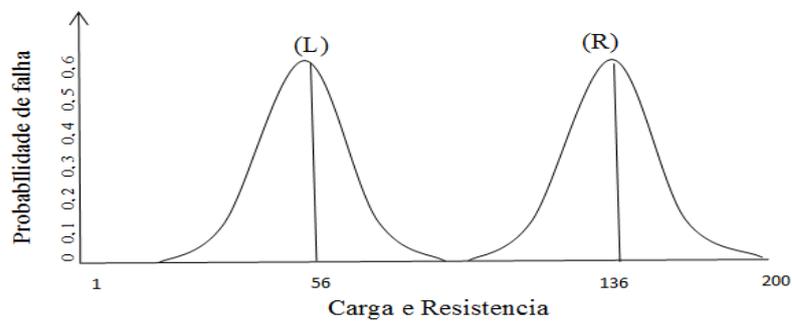


Fonte: adaptado de (FERNANDES, 2015).

Considerando-se um modelo mais próximo da realidade, as duas variáveis não são discretas e, sim, apresentam comportamento de distribuição, no qual se pode notar que o valor correspondente ao tempo de vida útil é o valor médio da distribuição. Conhecendo o tipo de

processo, e os controles exercidos pelo fabricante, a amplitude das caudas de distribuição variará entre processos bem controlados com amplitudes reduzidas e processos mais sujeitos a variações como apresentado na Figura 12, o que naturalmente decorrerá de amplitudes mais largas na distribuição. Com isso, pode-se induzir que, mesmo que as médias da carga e resistência encontrem-se distantes, processos ou projetos descontrolados podem chegar a sobrepor áreas de probabilidade, desde o início da fase de funcionamento do produto.

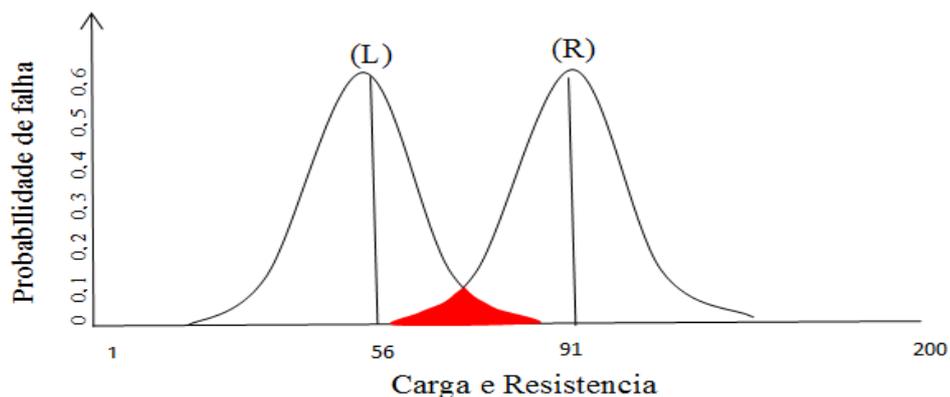
Figura 12 - Carga e resistência com distribuição normal sem sobreposição



Fonte: adaptado de (FERNANDES, 2015).

Para condições diferentes, na Figura 13, pode-se observar o que ocorre quando o valor de resistência é menor, mesmo que mantendo as características de controle do exemplo anterior. Ainda com média superior à média das cargas sofridas, as caudas de distribuição se sobrepõem, o que significa que para uma parcela de produtos ocorrerá uma falha causada pelo funcionamento natural do produto em um dado momento (FERNANDES, 2015).

Figura 13 - Carga e resistência com distribuições que se sobrepõem



Fonte: adaptado de (FERNANDES, 2015).

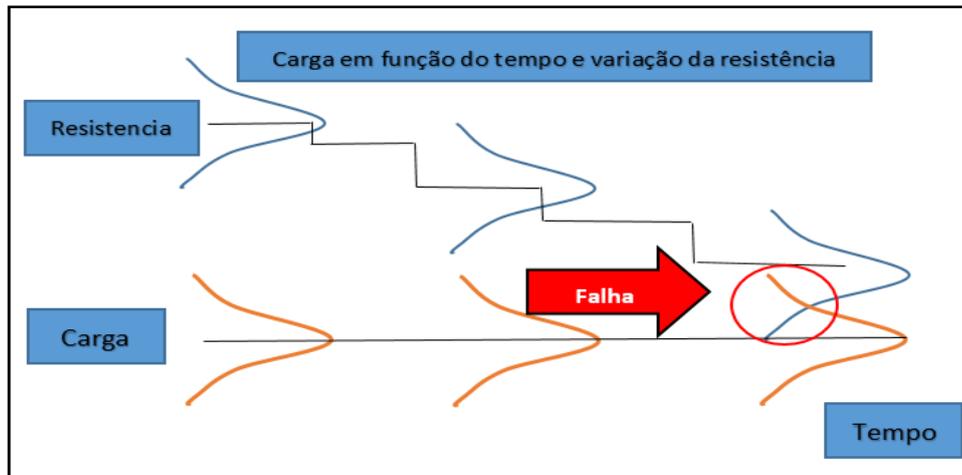
Neste cenário, pode-se concluir que controlando os processos e definindo materiais e estruturas que suportem as cargas as quais será submetido o produto durante a fase de uso, pode-se evitar as falhas potenciais ao longo da vida do produto. Algumas das opções dos projetistas incluem o distanciamento desses valores ou a melhora no controle da produção mediante ferramentas como seis sigma (6σ) ou controle estatístico de processos (CEP), garantindo assim a continuidade da função para a qual o produto foi desenvolvido.

Segundo (SONDALINI, 2016), as falhas apresentadas pelos equipamentos não são causadas por erros nos equipamentos em si, mas sim por falha dos seus componentes, o que significa que a interrupção na função é consequência de falhas parciais, e não totais. Assim, pode-se individualizar os diferentes componentes do produto e analisar separadamente as resistências para as quais estão projetados.

Por enquanto, o produto foi considerado como uma caixa preta, afetada pelas interações entre as cargas e a resistência dos seus materiais. Porém, segundo (NORTON, 2000), as falhas nas máquinas acontecem devido a cargas que variam ao longo do tempo e a esforços estáticos, ocorrendo em níveis de tensão inferiores aos valores de resistência dos materiais. Isso acontece porque, durante a interação carga-resistência, ocorre um desgaste decorrente dessa interação, que vai reduzindo a capacidade dos materiais e estruturas, levando o componente do estado inicial para outro estado, no qual poderá haver sobreposição dos valores de carga.

Na Figura 14 observa-se como um componente vai se deslocando da posição inicial de resistência com média definida e, ao longo do seu funcionamento, esse valor médio reduz, se aproximando do valor de carga. Finalmente, depois de uma quantidade determinada de ciclos, a cauda direita da distribuição irá se sobrepor à cauda esquerda da carga, e ocorrerá a falha.

Figura 14 - Transição da média da resistência ao longo do funcionamento



Fonte: Adaptado de (FERNANDES, 2015)

Como mencionado anteriormente, o produto é o resultado do agrupamento de diferentes componentes. A capacidade de equilíbrio do produto está diretamente relacionada à existência de distribuições de vida útil independentes para cada componente. Cada uma delas apresenta uma interação própria entre carga e resistência, como foi visto anteriormente. Isto significa que a coexistência de múltiplas linhas de deslocamento da resistência, causadas por desgaste, ocasionará múltiplos motivos de falha.

Pode-se inferir que, no momento do evento de falha, causado pela sobreposição da carga e da resistência, outros componentes ainda não estarão no ponto de falha, encontrando-se ainda em fase de uso. A transição entre o estado de funcionamento e o estado de falha, que pode ser calculada estatisticamente em função da probabilidade de entrega da função, é definida como confiabilidade.

2.4.3 Confiabilidade

De acordo com a norma técnica NBR 5462 (ABNT, 1994), a confiabilidade é a capacidade de desempenhar uma função requerida, sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo. Para (LAFRAIA, 2001), confiabilidade é a probabilidade de que um componente ou sistema permaneça funcionando dentro dos limites especificados de projeto, e não falhe durante o período de tempo previsto para a sua vida, dentro das condições de agressividade do meio. Por sua vez, (OHRING, 1998) define confiabilidade como a probabilidade de operar um produto por um período de tempo determinado sem falhar, sob

condições especificadas, refletindo o desempenho físico do mesmo ao longo do tempo e servindo como medida da referência para sua futura confiança. Para (OHRING, 1998), a confiabilidade inclui o desenvolvimento de protótipos para testes, análises estatísticas de falha e o uso de funções de distribuição para descrever a população que sofreu falha.

Conceitualmente, a confiabilidade está diretamente relacionada ao tempo, já que o funcionamento do produto depende do transcorrer dos ciclos de atividade, em que o produto encontra-se submetido ao estresse gerado pelas forças próprias da função (LAFRAIA, 2001). A natureza estatística da probabilidade de continuar funcionando deriva da existência de um evento contrário que interrompe o estado prévio.

Sendo assim, pode-se identificar uma linha de raciocínio durante a vida do produto, desde a sua formulação, iniciando desde o projeto conceitual e identificando os requisitos do cliente, assim como as funções do produto e a validação da sua funcionalidade. Posteriormente, durante a fase de uso, o desgaste constante a que está submetido irá aproximando os valores de resistência originais dos valores de carga. De acordo com a confiabilidade do produto (desempenho em condições pré-definidas), há a probabilidade de que, atingido o momento de superposição entre as distribuições, ocorra a suspensão da entrega da função. Esse momento será o final da vida útil do produto. A seguir será explicado como é classificado um produto que atinge o estado de fim de vida útil por suspensão na entrega da sua função.

2.4.4 **Vigência do produto**

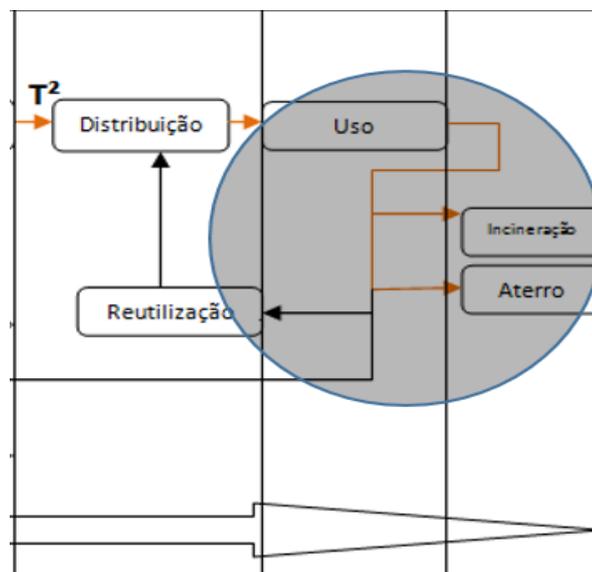
Estritamente falando, qualquer produto pode ser reparado quando apresentar uma falha (desconsiderando a energia e recursos necessários para retorná-lo ao estado de funcionamento). Nesse contexto, é importante responder esta pergunta: qual é o momento em que o produto não deve ser mais reparado? Para isso é preciso definir o que significa a vigência do produto. Os diferentes enfoques que podem auxiliar na definição dessa vigência são abordados por (ASHBY, 2012), e são listados abaixo:

- Vida física: Tempo decorrido até que o produto quebre definitivamente, isto é, não há possibilidade de reparo.
- Vida funcional: Momento em que a necessidade da existência do produto termina.
- Vida tecnológica: Ao longo do tempo as novas tecnologias tornam o produto obsoleto.

- Vida econômica: Tempo em que os avanços no projeto e na tecnologia proporcionam funcionalidades similares, mas o custo operacional é significativamente mais baixo.
- Vida legal: Tempo em que as mudanças na lei, derivadas da evolução cultural ou eventos situacionais, tornam o uso do produto ilegal.
- Perda do desejo: Tempo em que as mudanças no gosto, moda, ou preferência estética tornam o produto não atraente para o consumidor.

Considerando-se uma parte da Figura 7, na Figura 15 especifica-se o momento do LCA em que o produto atinge o final da sua vida útil, sendo necessário tomar uma decisão sobre o tratamento que ele deverá receber a seguir: descarte ou recuperação.

Figura 15 - Detalhe do sistema LCA, final de vida útil do produto



Fonte: Elaborado pelo autor

Para isso, deve-se categorizar o tipo de estado alcançado, uma vez atingido o final da sua vigência. Isto significa que o produto pode ser considerado obsoleto. Na próxima subseção será explicado o estado de obsolescência e suas diferentes abordagens.

2.5 OBSOLESCÊNCIA

Segundo (BURNS, 2016), o final da vida útil de um produto oferece a possibilidade de medir seu sucesso ou fracasso, bem como a oportunidade de analisar o valor resultante da sua utilização quando comparado com os custos da sua manufatura, assim como os impactos ambientais e sociais que derivam da sua existência.

A obsolescência está diretamente relacionada com a perda do valor de um ativo ou bem, causada pelo alcance do final do tempo de vida útil em relação ao que tinha sido previsto. Pode ser também uma perda do valor do bem devido aos avanços na tecnologia ou, ainda, devido às várias alterações ou mudanças nas condições de mercado para aquele produto. (SCHLICKMANN, 2015) afirma que a obsolescência pode ocorrer em diferentes tipos de produtos, materiais, ferramentas, fábricas e máquinas, e pode ser motivada por várias razões, como mudanças de projeto, processo, demanda, métodos de produção e, ainda, novos modelos de máquinas. Tais mudanças estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Razões para a obsolescência

| Materiais | Ferramentas e Equipamentos | Fábricas e Máquinas |
|----------------------------|---|---|
| Alteração de projeto | Alteração no produto | Descontinuidade do produto |
| Alteração de processo | Alteração no método de produção | Mudanças nos métodos de produção, processos e/ou técnicas |
| Descontinuidade do produto | Disponibilidade de sistemas mais eficientes | Mudança no produto, inovação ou novas máquinas |
| Substituição | | |

Fonte: (SCHLICKMANN, 2015).

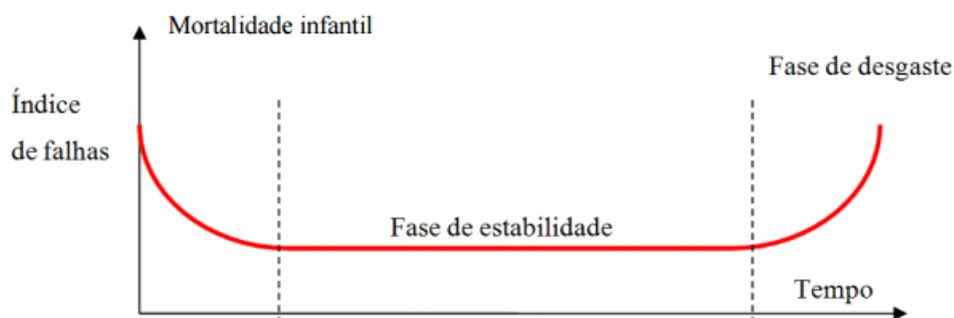
Seguindo o enfoque econômico proposto por (JOSIAS, 2009), a classificação para definir a obsolescência de uma família de produtos é explicada por (DURAN, 2015) por meio da acessibilidade aos componentes. Considerando os fornecedores, essa classificação é descrita a seguir:

- Identificação de peças e tecnologia de grupos: Mediante a identificação de tecnologia de grupos, agrupando famílias ou produtos com a mesma

funcionalidade. Por exemplo, o número de transistores e a velocidade dos processadores.

- Identificação de atributos primários e secundários: Durante o desenvolvimento da fase de projeto são definidas características que visam satisfazer os requisitos do cliente, classificadas como primárias e secundárias de acordo com a importância de entregar a função que o consumidor final espera do produto.
- Determinação do número de fornecedores: A acessibilidade às peças, distância percorrida, custos, etc., são condições que dependem do número de fornecedores disponíveis. Um número limitado de fornecedores, ou a falta da qualidade dos mesmos, pode tornar uma peça obsoleta.
- Resultados das vendas dos atributos primários: Os resultados das vendas oferecem indicadores sobre a etapa de maturidade da curva, localizando o produto e permitindo criar estratégias gerenciais para o futuro.
- Construção do perfil e determinação do parâmetro: Segundo (PECHT *et al*, 2002), a distribuição gaussiana é analisada para calcular a maturidade do produto, de acordo a quantidade de falhas que o produto apresenta para uma etapa específica, como pode ser visto na Figura 16. Muitas falhas em uma fase avançada podem significar uma demora na chegada da fase de maturidade do produto.

Figura 16 - Curva da banheira para análise de falhas



Fonte: (MAROCCO, 2013)

2.5.1 **Obsolescência programada**

A obsolescência programada é definida pelo encurtamento proposital da vigência do produto, mediante estratégias para motivar a movimentação do mercado, favorecendo a

empresa do ponto de vista econômico. Segundo (AGRAWAL, 2011), essas práticas começaram nas primeiras décadas do século XX. A partir da grande depressão econômica de 1929, realizaram-se múltiplos esforços para ativar a economia americana, e uma das propostas foi a de encurtar os tempos de vida dos produtos para fomentar a compra de novos bens e, assim, favorecer a atividade econômica da indústria (LONDON, 1932). Um exemplo disso foi a empresa Dupont, que decidiu reduzir a qualidade do nylon usado nos seus produtos para aumentar o giro de estoque na década de 1930.

No período de 1930 a 1945, antes e durante a segunda guerra mundial, o foco socioeconômico encontrava-se no desenvolvimento de produtos e materiais para apoiar o que seria a nova distribuição geográfica. Na Alemanha, a construção de grandes vias para transportar tropas, tanques e insumos logísticos, gerou uma grande quantidade de empregos e uma economia pujante. Os esforços nacionais individuais deixaram de lado os trabalhos econômicos em grupo. No período seguinte ao final da segunda guerra mundial, os Estados Unidos encontraram-se numa posição vantajosa, pois foi geograficamente o país menos devastado dentre os envolvidos nos confrontos (BONAHOM, 2012).

Grandes regiões da Europa, Japão, China, Rússia, norte da África e outros tinham perdido milhões de lares e grandes quantidades de mão de obra, bem como capacidade produtiva. Nos anos seguintes, a tarefa de reconstrução incluiu a atividade econômica, requerendo vastas quantidades de materiais e indústrias, assim como a criação dos estados benfeitores, que ofereciam aos cidadãos garantias de satisfação das necessidades básicas como saúde, aposentadoria, educação, alimentação, e outras (URIBE, 2018). Esses esforços dos estados requereriam grandes somas de dinheiro para investimento social, motivo pelo qual a economia era um pilar crítico para o desenvolvimento dos projetos de reconstrução.

Os Estados Unidos, prevendo a potencialidade dos mercados, apoiou a Europa mediante o plano Marshall, injetando capital para acelerar a recuperação (170 bilhões de dólares atuais), o que aconteceu nos anos seguintes. Em consequência disso, as empresas norte-americanas e as europeias que iriam aparecendo contavam com um grande número de consumidores que adquiriam seus produtos aceleradamente. Entretanto, na metade da década de 1950, o consumo, assim como o crescimento econômico, começou a desacelerar. As empresas estavam produzindo no máximo da sua capacidade instalada e, então, houve a diminuição nas compras, fazendo com que os economistas enfrentassem um novo desafio (BONAHOM, 2012).

Seria preciso limitar a produção, com consequências para os empregos e a economia mundial, ou, então, buscar modos de fomentar o consumo da população. Foi em 1954, durante uma conferência, que o projetista industrial Brooks Stevens retomou o conceito criado por London vinte anos antes e propôs a redução da durabilidade dos produtos como acelerador de consumo, potencializando a economia da fabricação e tudo o que isso significa. O lema era “instigar no comprador o desejo de possuir algo, um pouco mais novo, um pouco melhor, um pouco antes do necessário”.

A consequência foi uma redução proposital no tempo de vida útil dos produtos manufaturados, vinculada diretamente ao aumento na utilização de matérias-primas. Por um lado, o aumento sistemático na produção melhorou a economia por meio do consumo, mas, por outro lado, o encurtamento do tempo de vida útil dos produtos gerou grandes quantidades de desperdício, as quais devem ser enfrentadas na sociedade atual (SLADE.G, 2009).

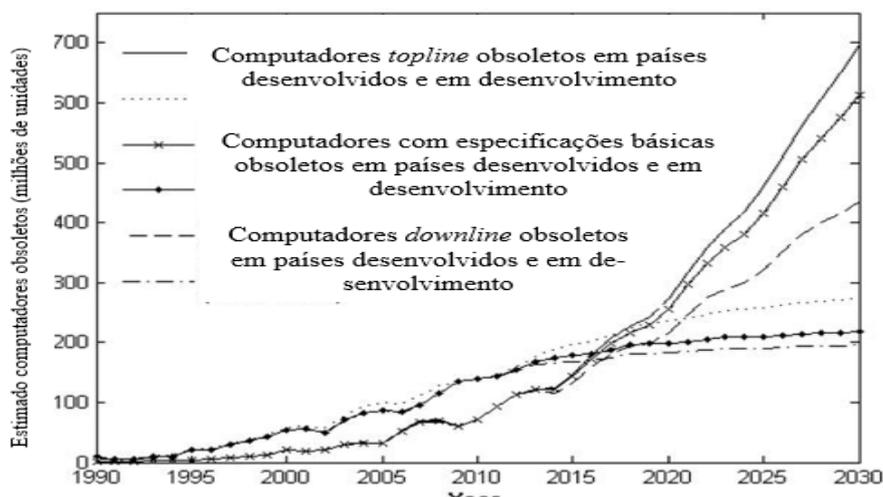
Atualmente a obsolescência programada pode-se classificar de acordo com os motivos que a causou e, segundo (SHERIF, 1986), ela obedece a diferentes tipos de interrupção da vigência de produtos:

- Obsolescência por fim de ciclo de vida: É a obsolescência no fim da vida útil do produto, dadas as características e propriedades físicas e químicas dos materiais utilizados. O produto foi projetado visando a máxima qualidade resultante dos seus materiais, projeto e uso.
- Obsolescência por incompatibilidade tecnológica: É a obsolescência resultante dos avanços tecnológicos que ocorrem quando um produto ainda está no seu ciclo de vida físico e, portanto, passa a não ser utilizado devido à impossibilidade de atualizar os seus componentes ou os seus softwares.
- Obsolescência por estilo (moda): Obsolescência apontada pela mídia, que convence os consumidores a desejar trocar seus produtos ainda na faixa de vida tecnológica plena, impulsionados pelo desejo de adquirir um produto novo e mais moderno. O comprador se vê obrigado a se desfazer de seu produto original.

Devido à quantidade de processos requeridos e de materiais complexos, os produtos eletrônicos contribuem significativamente para a geração de desperdício, ainda que seja um tipo de tecnologia na qual se tenha um alto domínio, no que se refere ao tempo de vida útil projetado. O trabalho de (LOVETT, 2010) oferece informações sobre o desperdício gerado por computadores no mundo todo, classificados por países desenvolvidos ou em desenvolvimento. Ultrapassados os 100 milhões de unidades obsoletas por tipo de

computador em 2015, pode-se observar que a cifra se duplicará e multiplicará nos 15 anos seguintes, conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Computadores obsoletos por linha descartados por ano



Fonte: (LOVETT, 2010)

Deve-se levar em consideração que o viés do presente trabalho é focado em um contexto não somente de engenharia, mas em um contexto que considera o tripé da sustentabilidade. Portanto, é preciso abordar a dimensão social na produção de materiais necessários para a fabricação de diversos bens definidos como conflitivos (GIRVAN, 2017). No caso da fabricação de microeletrônicos, é reconhecido que um dos principais materiais necessários para a fabricação de *chips* é o tântalo, obtido da natureza por meio da mineração do coltan (mistura de columbita-tantalita). Como explicado por (MELCHER, 2008), regiões que, na atualidade, encontram-se no meio de fortes conflitos armados, principalmente na África, fornecem as 3/4 da produção mundial de coltan, e seu elevado custo de venda contribui para patrocinar grupos armados presentes naquelas regiões. Desta forma, entende-se a necessidade de maximizar a utilização dos materiais procedentes de equipamentos eletrônicos como uma contribuição ética para a sociedade.

Neste momento da revisão da literatura foi realizada uma contextualização social e histórica da evolução das políticas ambientais e sociais para a manufatura de bens desde o pós-guerra. Foi descrito também o processo de maturidade das ferramentas de medição de impactos ambientais até os dias atuais, e sustentada a existência de produtos com a única justificativa de satisfazer requisitos para o usuário. Finalmente foi explicado o processo mediante o qual o produto atinge o final da sua vida útil, transitando pelo estado de falha até o

conceito de obsoleto. A seguir será descrita a pesquisa realizada para que o produto retorne para um segundo ciclo de vida.

2.5.2 Resiliência

Na natureza, quando um sistema encontra-se dentro de um estado de equilíbrio, a ocorrência de um evento disruptivo ativa uma série de ações que procuram manter o seu funcionamento. A eficiência do conjunto de reações que acontecem para evitar o colapso permanente expressa a capacidade de retorno ao estado de equilíbrio. A abordagem possui duas linearidades: (a) a carga de eventos agressivos que pode suportar o sistema antes de entrar em suspensão da função, amplamente vista nos ecossistemas; ou (b) a capacidade de retornar ao funcionamento uma vez que foi interrompida a entrega da função, muito mais de acordo com o comportamento humano e científico (HOLLING, 1996).

O termo “resiliência” pode ser analisado e contextualizado em múltiplas áreas e disciplinas, mas, para todas elas, o termo está relacionado com a capacidade para se adaptar às mudanças ocorridas ao longo do tempo. Segundo (GU, 2015), a resiliência no contexto dos sistemas de manufatura refere-se à capacidade do sistema de resistir a interrupções, e se caracteriza pela potencialidade para mitigar ou absorver o impacto e rapidamente retornar ao estado de normal funcionamento. Para esse fim, podem ser usadas redundâncias, o deslocamento de máquinas, a programação de paradas para manutenção, etc. Porém, deve-se analisar o conceito de resiliência que difere de adaptabilidade, e esta análise será feita concatenando-se as definições acadêmicas que permitirão entender a abrangência e importância do conceito.

Do ponto de vista social, segundo a *Office Disaster Risk Reduction* da ONU, a resiliência foi o conceito mais importante de 2015 (AITSI-SELM I *et al*, 2015). O relatório considera que a preocupação com as mudanças climáticas e desastres naturais que afetam o mundo ficou obsoleta, uma vez que foca no acompanhamento das ocorrências acontecidas no mundo, diminuindo o valor dos fatores que as provocam. A resiliência é marcada pela capacidade humana de retornar as civilizações para estados anteriores às ocorrências dos desastres naturais, sendo possível apenas mediante políticas de prevenção e definição de protocolos de ação a serem ativados antes da ocorrência dos eventos catastróficos.

A identificação de protocolos de ação em caso de ocorrência de eventos possui precedentes no estudo de sistemas neurológicos, em que se define a resiliência como resultado

dos mecanismos de resposta que se ativam depois que o sujeito é submetido a estresse, causado pelo acontecimento de situações fora do esperado. Pode-se inferir, então, que é difícil analisar a resiliência em condições de funcionamento normal (NOLTY *et al*, 2018) O ente afetado pelo estresse entra em um estado de proteção, ativando processos que liberam ordens de ação que permitam o retorno do sistema ao funcionamento normal. O grupo desses processos chama-se “alostase” que, etimologicamente, significa “diferente do estável”.

Nos seres humanos o efeito da alostase se regula mediante a liberação de adrenalina, noradrenalina, dopamina e cortisol (LAICH, 2012), podendo-se concluir que o retorno do sistema ao estado “normal” depende da interação de fluxos químicos e elétricos em quantidades específicas próprias do sistema nervoso central. Isso significa que pode-se analisar comparativamente o conceito de resiliência do ser humano, desde o equilíbrio, com um sistema técnico.

Finalmente, na física, o conceito de resiliência corresponde à máxima quantidade de energia por unidade de volume que um material pode absorver sem sofrer uma deformação permanente. A sua unidade é Joule por metro cúbico.

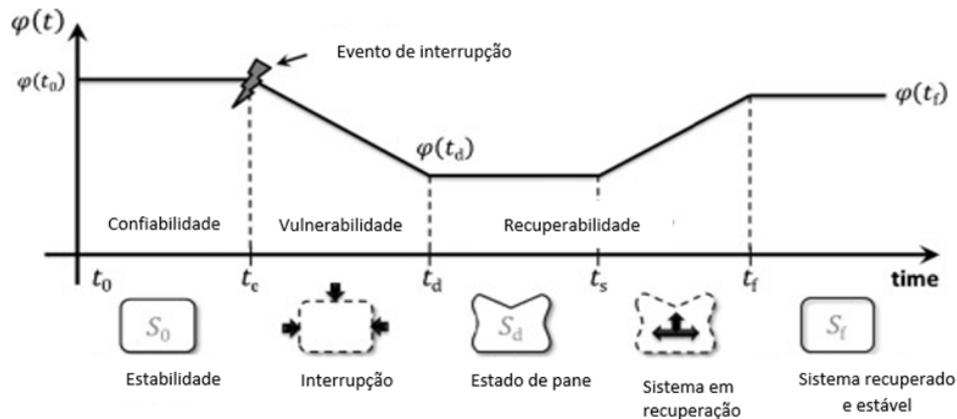
Analisando em conjunto as definições apresentadas, pode-se ver a harmonia conceitual da resiliência em diferentes áreas, sendo uma característica dinâmica, dado que depende do tempo e da ocorrência de um evento.

Embora a transição seja analisada quantitativamente, como no caso do módulo de resiliência, ela obedece a processos existentes que se ativam na presença de um estímulo ou estresse.

A existência destes processos e características permitem o retorno do sistema a especificações de funcionamento, o que, no caso dos sistemas técnicos, pode se chamar de “tão bom quanto novo”. A quantidade de energia requerida para o retorno dependerá do tipo de evento acontecido, e esse evento, quando interrompe a função do sistema analisado, é definido como falha.

O trabalho de (HENRY, 2012) define a resiliência como a habilidade de prever, adaptar e/ou se recuperar rapidamente de um evento de parada, que é representada pela taxa de recuperação em função do tempo (ρ). A Figura 18 exemplifica a transição entre o funcionamento normal do sistema e o retorno para o estado mais próximo a esse, quando ocorre um evento de interrupção da entrega da função.

Figura 18 - Desempenho do sistema após o evento de falha para descrever a resiliência



Fonte: (HENRY, 2012)

Sendo:

- $\varphi(t)$ = desempenho do sistema para o período de tempo considerado;
- S_0 = estado original estável;
- e^j = evento de interrupção;
- $t(0)$ = tempo específico analisado.

Observa-se que o sistema funciona de maneira constante no período t_e , quando acontece o evento e^j . A partir da falha, o desempenho decresce de $\varphi(t_e)$ para $\varphi(t_d)$. Então, o desempenho se mantém constante até o início das atividades de resiliência no momento t_s , quando o desempenho começa a aumentar gradualmente até chegar ao momento t_f . Baseando-se na descrição, (HENRY, 2012) calcula a resiliência segundo a Equação (2) para o tempo $t \in [t_s, t_f]$.

$$\mathfrak{R}(t|e^j) = \frac{\varphi(t|e^j) - \varphi(t_d|e^j)}{\varphi(t_0) - \varphi(t_d|e^j)} \quad (2)$$

Na Figura 18 (HOSSEINI, 2016a) foi observada a resiliência do sistema em três estágios: o absorptivo, o adaptativo e o recuperatório, os quais serão explicados a seguir.

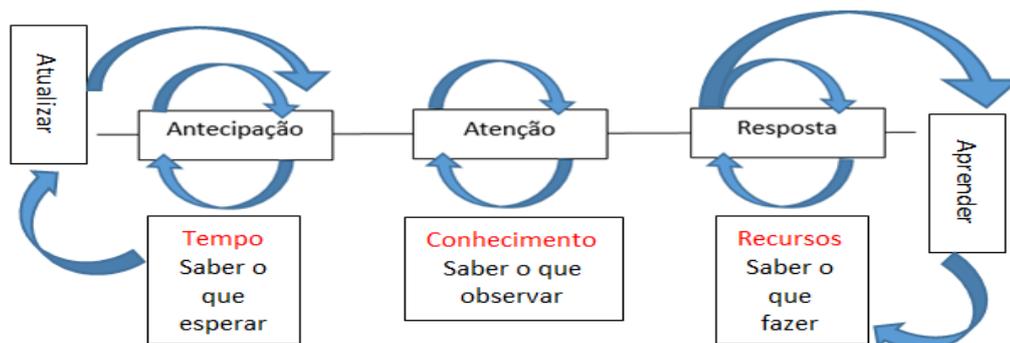
- **Capacidade absorptiva:** É a capacidade do sistema de minimizar o impacto do evento, assim como as suas consequências. Consiste em todas aquelas atividades

que se disparam no momento da ocorrência para tentar manter a entrega da função o mais perto possível do estado normal.

- **Capacidade adaptativa:** É a capacidade do sistema de se adaptar e equilibrar o seu desempenho, terminando o estado de diminuição continuada, mas sem começar a realizar atividades de recuperação. No período de tempo compreendido pela adaptação, o desempenho é estável, porém inferior ao normal.
- **Capacidade de recuperação:** É a capacidade do sistema de reparar ou recuperar os danos ocasionados pela interrupção, se diferenciando da adaptativa, no sentido que a adaptativa é uma capacidade temporal enquanto que a recuperatória procura o retorno do sistema ao nível mais próximo do estado original de funcionamento.

Na Figura 19 é mostrada a relação entre a resiliência e o controle do processo, como explicado por (HOLLNAGEL, 2018), quando discorre sobre a alimentação e retroalimentação mediante a informação permanente fornecida pelo processo de produção. O conhecimento tácito permite saber o que esperar das possíveis situações de risco pertinentes às atividades que estão sendo realizadas. Já a observação permanente do sistema permite manter a performance dos subsistemas que constituem o processo, de forma a identificar irregularidades nos resultados e entregas esperadas, constantemente. Finalmente, o conhecimento explícito permite reagir com ações que minimizam os danos e consequências da entrada no estado de falha, e posterior retorno do sistema ao estado de funcionamento. Tudo isso dentro do contexto de aprendizado para otimizar a velocidade e qualidade da resposta dos *stakeholders* do sistema.

Figura 19 - Modelo de transferência de conhecimento resiliente



Fonte: Adaptado de (HOLLNAGEL, 2018)

Das definições fornecidas pela literatura vistas anteriormente, pode-se definir a resiliência como a capacidade de retorno do sistema ao estado de entrega de uma função após uma irrupção, sendo possível de mensurar em diferentes vieses como tempo, recursos naturais, ações e, para o caso desse trabalho, energia. Mas, como saber se todos aqueles recursos não estão fugindo descontroladamente do sistema analisado? A seguir será explicado o funcionamento e as metodologias que estudam os ciclos fechados de produção buscando-se minimizar as perdas.

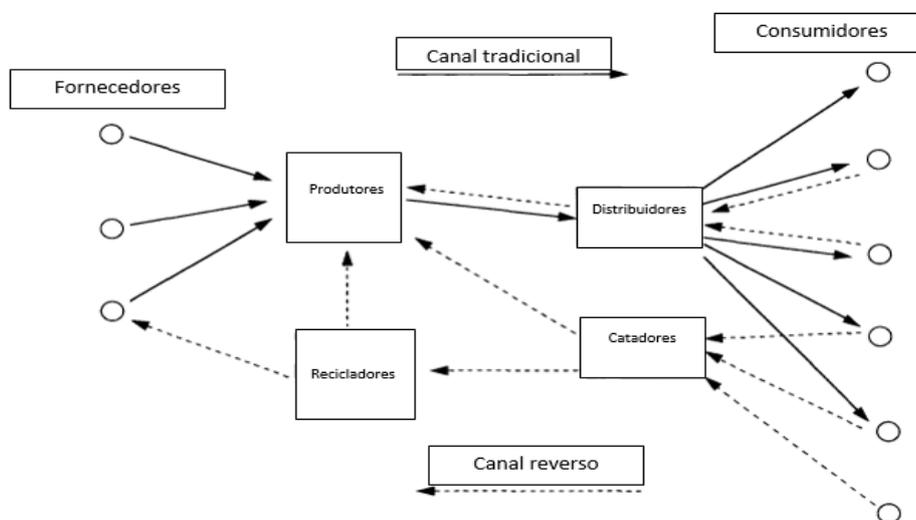
2.5.3 **Ciclo fechado de produção**

O objetivo do desenvolvimento sustentável no futuro é desenvolver produtos 100% recicláveis de maneira que o impacto da manufatura no meio ambiente seja nulo e a desmontagem total dos produtos seja rotina (RACHURI, 2009). As preocupações ambientais estão mudando as percepções dos governos e das indústrias, de forma a assegurar que as novas legislações permitam a produção de bens ambientalmente amigáveis. A geração de redes de suprimento verdes exerce um papel muito importante na criação de vantagens competitivas no uso de materiais e prevenção de descartes desnecessários (WANG, 2018).

A atenção sobre as redes logísticas reversas tem aumentado durante a última década. Devido aos impactos econômicos e ambientais, as metodologias propostas direcionam-se no sentido contrário da rede de produção tradicional, partindo da desmontagem, passando pelas redes de distribuição e retornando aos sistemas de manufatura na forma de peças e matérias-primas.

A abordagem tradicional do ciclo fechado de produção e logística reversa, como visto no trabalho de (FLEISCHMANN *et al*, 1997), foca no projeto de redes de captação, organização e separação de produtos e embalagens, na fase final da vida útil, com o intuito de recuperar os materiais para evitar nova mineração. Na Figura 20 pode-se ver o mapeamento da abordagem tradicional da logística reversa para ciclo fechado e a sua interação com o sistema de produção.

Figura 20 - Mapeamento tradicional de logística reversa



Fonte: Adaptado de (FLEISCHMANN, 1997)

O presente trabalho considera que a abordagem de captação de produtos e embalagens quebrados em uma rede reversa é muito importante para a recuperação e reciclagem de materiais no mundo atualmente. Nesse contexto, buscou-se por empresas de recuperação de matérias-primas mais próximas ao local de produção desta tese, tendo sido encontrada uma empresa especializada, localizada na cidade de Curitiba, PR. Isto significa que qualquer produto do tipo eletrônico que quiser ser recuperado deverá percorrer um mínimo de 340 km até a fábrica de recuperação, e isto requer investimento energético.

Trabalhos pesquisados, como os desenvolvidos por (WANG, 2018) e por (TEUNTER, 2000), propõem quantificação dos custos envolvidos na minimização de perdas econômicas no retorno dos produtos descartados (SRIVASTAVA, 2008), uma vez que buscar projetar redes de otimização de distâncias entre pontos de captação e processamento dos produtos, sem aprofundar nos requisitos energéticos necessários para tais fins.

Um dos principais questionamentos do presente trabalho argumenta a possibilidade de estar descartando-se energia desnecessariamente na forma de peças e módulos ainda funcionais, por considerar o produto como uma caixa preta da qual podem ser obtidos materiais reutilizáveis. Porém, a catação, o transporte e o processamento de componentes que ainda podem ser aproveitados, dependendo das condições as quais estejam fixados e vinculados dentro do produto, é um retrabalho que pode ser evitado. Portanto, propõe-se neste trabalho a consideração do produto como um sistema multivariável, que pode ser analisado

como uma rede de processos executados mediante a utilização de componentes individuais interligados.

O exemplo observado na definição do conceito de resiliência explica como, quando utilizado para produtos e sistemas fechados, o pesquisador encontra-se com uma caixa preta, pela impossibilidade de observar ou manipular os componentes que os integram. Entretanto, sabe-se que o motivo do evento de falha pode ocorrer devido a múltiplas causas e, portanto, é preciso realizar o mapeamento dos processos ativos durante a ocorrência.

A procura de metodologias e ferramentas que permitissem estruturar a complexidade de um produto como uma estrutura lógica de componentes encontrou-se o trabalho de (HOSSEINI, 2016a), que utiliza redes de codependência para identificar as atividades presentes na resiliência dos sistemas, assim como a relação entre elas durante a fase de recuperação. A rede de precedências condicional foi a escolhida para representar os diferentes processos e dependências durante a montagem de um produto, e será utilizada posteriormente para exemplificar um estudo de caso.

Observou-se que cada processo, representado por um círculo na Figura 22, está vinculado a uma atividade a ser desenvolvida. Caso aconteça uma falha, pode ser realizada a rastreabilidade por meio do mapa até chegar ao processo correspondente, permitindo isolar os processos e componentes encadeados, assim como encaminhar as ações de absorção, adaptabilidade e recuperação que permitam retornar o sistema ao funcionamento normal, como explicado por (GU, 2015) na seção de resiliência.

A nomenclatura utilizada corresponde a uma rede com interconectores lógicos do tipo booleano (*yes/no*) ou (*true/false*), e quantitativo de maneira que descreva mais detalhadamente o tipo de processo efetuado, assim como a ação requerida.

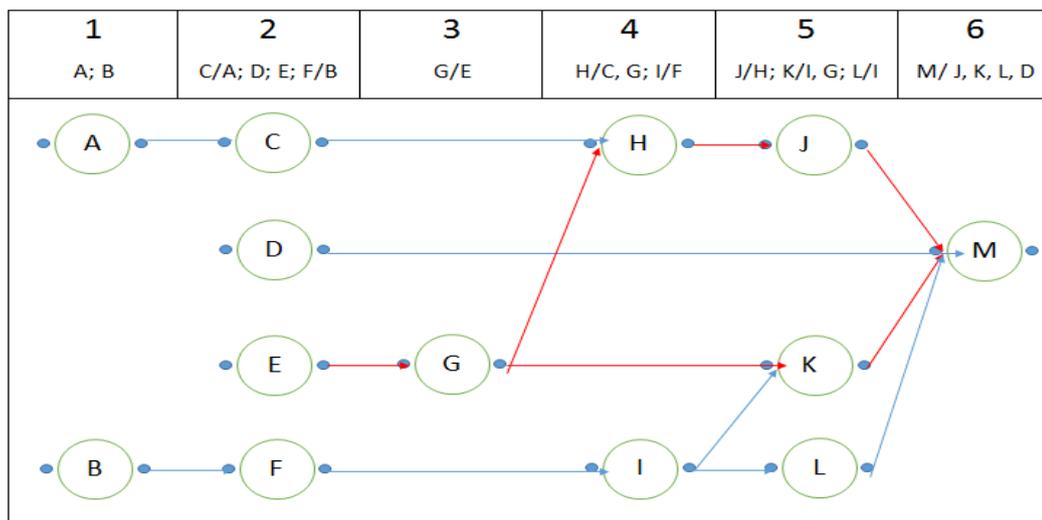
Começando pelo final do sistema (M), a pergunta realizada a cada processo sobre o estado do sistema para esse momento é se a situação é de operação estável. A resposta positiva recebe um valor *true* e, caso negativo, *false*. Segue-se então pelos conectores com valor *false* até chegar ao problema, precedido de um valor *true*. A rede com a ocorrência é destacada com setas vermelhas dentro do mapa apresentado na Figura 21. Definindo futuramente nesse trabalho os valores de estado estável, estado atual, estado de adaptação e estado resiliente, mesmo com as implicações de se transitar entre esses estados e os tempos relativos a cada momento, poder-se-á determinar a melhor escolha para minimizar o desperdício.

O domínio sobre o sistema (técnico, de processos, econômico e de confiabilidade) permitirá a realização de uma análise de resiliência de qualquer tipo, permitindo projetar ações de prevenção em benefício da empresa. Porém, é preciso desenvolver e seguir boas práticas e metodologias que permitam a obtenção de dados confiáveis e úteis. A seguir é apresentada uma ferramenta que facilita a descrição das atividades, assim como o fluxo de informações através dos processos: a rede bayesiana.

2.6 REDES BAYESIANAS E LÓGICA DE PRIMEIRA ORDEM

Na subseção anterior descreveu-se um método de redes de precedência com o qual se pode desenvolver uma metodologia que permita mensurar a resiliência de um sistema. Ele difere do mapa de processos por descrever elementos físicos concatenados sujeitos à probabilidade e, conceitualmente, define-se como rede bayesiana (HOSSEINI, 2016a) (HOSSEINI, 2016b). Essa metodologia construída para o presente trabalho valeu-se de ferramentas acadêmicas para a estruturação de dados, as quais serão detalhadas abaixo.

Figura 21 - Rede Bayesiana de precedências



Fonte: Elaborado pelo autor

2.6.1 Redes Bayesianas

(DUTRA, 2002) define redes bayesianas como sistemas de raciocínio probabilístico que permitem analisar sistemas onde não se conhece todo o seu escopo. A principal vantagem do raciocínio probabilístico sobre o raciocínio lógico é o fato de que agentes podem tomar decisões racionais mesmo quando não houver informação suficiente para se provar que uma ação funcionará. A composição da rede é a seguinte:

- Conjunto de variáveis e arcos ligando as variáveis;
- Cada variável possui um conjunto limitado de estados mutuamente exclusivos;
- As variáveis e arcos formam um grafo dirigido sem ciclos;
- Para cada variável A que possui como pais B_1, \dots, B_n existe uma tabela $P(A/B_1, \dots, B_n)$.

2.6.1.1 Inferência em redes Bayesianas multiconectadas

O agrupamento (*clustering*) transforma probabilisticamente a rede em uma rede simplesmente conexa. O condicionamento (*conditioning*) efetua uma transformação na rede, instanciando variáveis em valores definidos e, então, produz uma rede simplesmente conexa para cada variável instanciada. Finalmente, é efetuada a simulação estocástica (*stochastic simulation*), a qual utiliza a rede para gerar um elevado número de modelos concretos de um domínio. A partir desses modelos o algoritmo calcula uma aproximação de uma inferência.

Segundo (MORAL, 2014), as redes bayesianas baseiam-se no Teorema de Bayes, e pertencem aos sistemas especialistas probabilísticos, se caracterizando por:

- Representar conhecimento com incerteza;
- Ser úteis para realizar raciocínio e tomada de decisões;
- Ser representações multivariáveis;
- Permitir o cálculo de probabilidades com base em dados;
- Seu correto funcionamento se basear no cuidadoso projeto das regras em função do uso requerido.

Uma rede Bayesiana se compõe de duas partes: qualitativa e quantitativa.

Qualitativa:

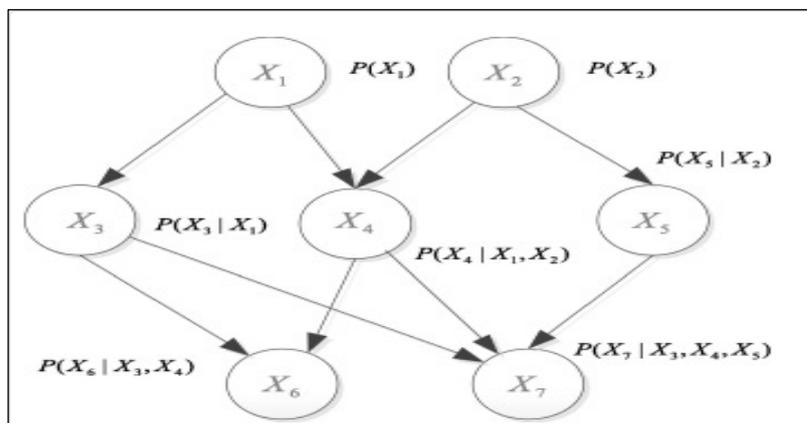
- Projeto dirigido não cíclico;
- Conjunto de enlaces (conectores entre nós) dirigidos sem criar ciclos (fechados) dirigidos.

Quantitativa:

- Série de probabilidades condicionadas, que determinam uma única distribuição de probabilidade conjunta.
- As redes Bayesianas representam um conjunto de independências que se divide em:
 - Básicas: aquelas que precisam ser verificadas quando se constrói a rede;
 - Totais: aquelas que se deduzem aplicando propriedades das relações de independência. Podem ser comprovadas pelo critério chamado D-separação.

No exemplo apresentado por (HOSSEINI, 2016a) e mostrado na figura 22, o campo $V = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ representa o domínio das variáveis na rede bayesiana (RB), a qual é condicionalmente independente. O arco de X_1 para X_3 indica a relação de valor onde X_3 é dependente do X_1 . Logo, X_3 é filho de X_1 . Existem, então, três classes de nós de relação nas RB: (i) os que não possuem filhos são chamados nós-folha (X_6); (ii) aqueles que não têm pai são os nós-raiz (X_1); (iii) aqueles que têm pai e filho são chamados nós intermediários (X_3).

Figura 22 - Rede Bayesiana de funções codependentes



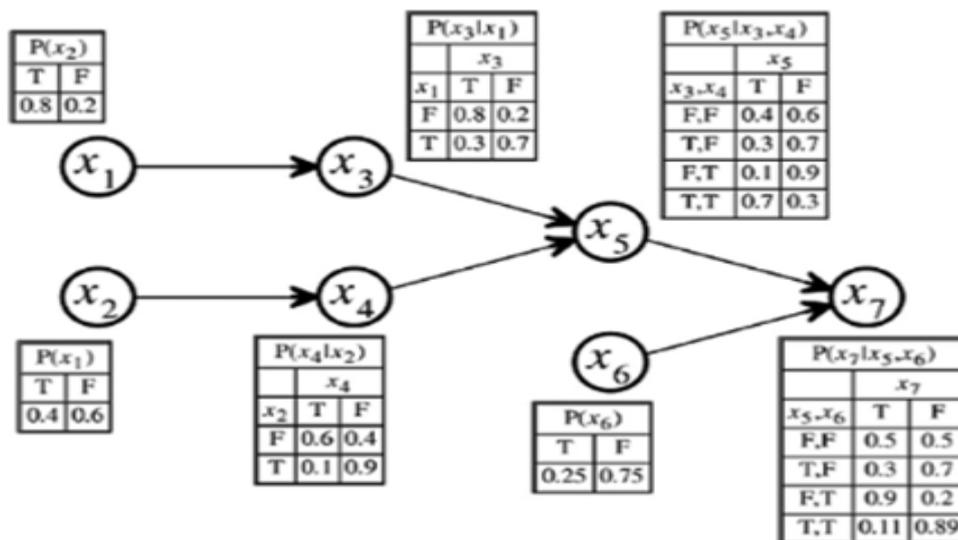
Fonte: (HOSSEINI, 2016a)

Finalmente, e ainda utilizando o exemplo da Figura 22, (HOSSEINI, 2016a) define a metodologia utilizada na análise dos nós. Existem três tipos de variáveis usadas nos modelos

de RB: (i) variáveis booleanas que respondem a perguntas dicotômicas (*yes/no*) (*true/false*); (ii) variáveis quantitativas que medem categorias ordinais, usadas para pesos ou fatores contributivos; e (iii) variáveis contínuas, que medem variáveis aleatórias com distribuição de probabilidade conhecida. Porém, para a solução de muitos problemas é preciso definir novos tipos de variáveis. Percorrendo a rede por meio dos conectores e nós da rede, pode-se analisar a probabilidade de ocorrência de um evento, assim como a acumulação de valores respectivos a características dos nós. Como exemplo tem-se as caixas de processo, das quais se conhece o tempo de processamento, a quantidade de operações, ou a energia necessária para a realização do processo naquela estação.

Seguindo a abordagem de (GARVEY, 2015), mostrada na Figura 23, pode-se representar as interações dos processos ocorridos ao longo do sistema em função da codependência acumulada. Utilizando essa abordagem, o intuito consiste em formular uma combinação de um sistema probabilístico e um determinista para estabelecer as relações entre os componentes dos produtos analisados e a cumulatividade da energia requerida tanto para a montagem quanto para a desmontagem do produto, dada a ocorrência de um evento de falha.

Figura 23 - Mapeamento de rede bayesiana acumulativa



Fonte: (GARVEY, 2015)

2.6.2 Linguagem de ordem

Para a pesquisa e desenvolvimento desta tese será necessário utilizar uma linguagem padronizada, prática e de fácil transição para software, que permita transmitir informações e dados para os mapeamentos bayesianos que serão utilizados. Na procura desta linguagem foram considerados vários tipos de código, e a lógica de ordem, com formulação de argumentos de valor e booleanos, satisfaz os requisitos do projeto.

As linguagens de ordem são lógicas que podem ser de ordem diferente (zero, um, dois), e que permitem representar eventos ou ações de interesse mediante argumentos que podem ser interconectados a diferentes tipos de ferramentas computacionais para homogeneizar a resolução de problemas. Nas últimas décadas tem-se aumentado significativamente o uso da informática na aplicação de lógica na programação. Seus fundamentos técnicos se baseiam no desenvolvimento da lógica de predicado, que busca resolver sistemas de demonstração automática de teoremas, entre outras aplicações (LABRA, 2010).

2.6.3 Lógica preposicional

Também chamada de lógica de ordem zero, a lógica preposicional é um sistema cujos elementos mais simples representam proposições e cujas constantes lógicas, denominadas conectivas, representam operações sobre estes elementos, sendo capazes de formar outras proposições de maior complexidade (ENDERTON, 2009).

A lógica preposicional se ocupa da validade ou invalidade dos raciocínios constituídos por expressões como: *e*, *ou*, *sim*, *então* e *não* (Figura 25). Usa-se a conjunção da sintaxe de fórmulas bem definidas como cadeias de símbolos, e a semântica como intérprete dessas fórmulas, isto é, como avaliador de verdade (MAUCO, 2009). Na Figura 24 é mostrado um exemplo da avaliação de dicotomias para a relação um a um de uma cadeia de decisão por meio das verdades dos conetores.

Figura 24 - Interpretação de verdade dos conectores booleanos

| | |
|--------|---|
| \neg | |
| 0 | 1 |
| 1 | 0 |

| | | |
|--------|---|---|
| \vee | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

| | | |
|-------------------|---|---|
| \leftrightarrow | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |

| | | |
|----------|---|---|
| \wedge | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |

| | | |
|---------------|---|---|
| \rightarrow | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |

Fonte: (MAUCO, 2009)

O alfabeto utilizado pela lógica proposicional é:

- APROP: variáveis (**Var**) $\cup \{', \grave{U}, \acute{U}, \textcircled{R}\}$ é $\{(,)\}$

Conectivos proposicionais. Negação, \neg e \bar{U} ou, \rightarrow Sim...então

- Variáveis ou símbolos proposicionais: (a, b, c..., p, q...)
- Existe: \exists ; pertence: \in

A evolução da lógica de ordem zero é a chamada lógica de primeira ordem, também conhecida como lógica de predicados. Esta lógica estuda as frases declarativas com maior grau de detalhamento, considerando a estrutura interna das proposições e tomando como elemento básico os objetos e as relações entre tais objetos. Ela distingue:

- O que é afirmado (predicado ou relação);
- De quem é afirmado (o objeto).

Adicionalmente, ela incrementa ao alfabeto de linguagem de proposição a definição das constantes (**cons**) – primeiras letras do alfabeto minúsculas, com ou sem subscritos, (a, b, c, a_1, b_1, c_1) – e do conjunto de letras de função (**func**) – formado por letras (f, g, h, f_1, g_1, h_1).

A possibilidade de definir variáveis, funções e constantes, e relacioná-las por meio de conectores, permitindo expressar modelos matemáticos gerais e aplicáveis aos problemas da indústria, como o cálculo de probabilidade, a análise determinística, a programação de software e a navegação por cadeias e redes de codependência, são motivos para considerar a linguagem de ordem como a ferramenta a ser utilizada para o desenvolvimento desta tese, que, mediante as ferramentas descritas, conduzirá ao atingimento dos objetivos formulados.

2.6.4 Saídas do capítulo de fundamentação teórica

Com as definições descritas anteriormente, dá-se por finalizado o capítulo de revisão bibliográfica desta tese, concluindo assim o escoamento de aqueles itens necessários para contextualizar e compreender os conceitos necessários para formulação da metodologia que visa responder a pergunta da tese.

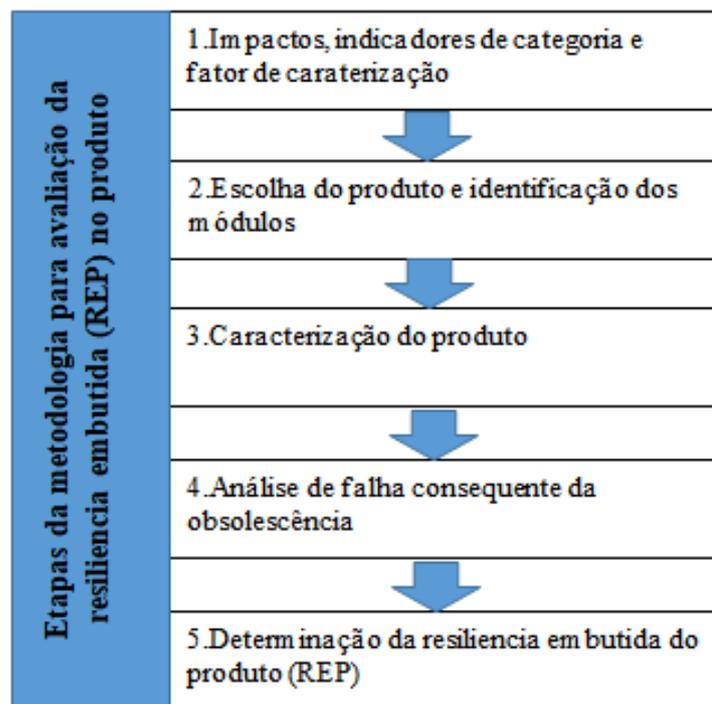
Destaca-se pela sua importância aqueles referentes a indicadores de sustentabilidade, propriedades intrínsecas dos produtos, energia embutida, suspensão da entrega da função e formação de parâmetros.

No próximo capítulo intitulado metodologia proposta para avaliação da resiliência embutida no produto, será descrita a construção dos processos de pesquisa considerados na formulação do artefato e subsequentes fases do ciclo de (WIERINGA, 2009), seguindo o método científico usados para tal fim.

3 METODOLOGIA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA EMBUTIDA NO PRODUTO

A metodologia proposta avalia a capacidade de retorno ao sistema de ciclo de vida, entre as fases de manufatura e uso, dos componentes e materiais que compõem um produto, dado o seu descarte antecipado como consequência da obsolescência. O indicador que visa quantificar essa capacidade é definido como Resiliência Embutida no Produto (REP), e foi determinado por meio da construção de cinco fases de análise, explicadas no fluxograma da Figura 25. O fluxograma mostra como a través do processo de definição do indicador a ser analisado, são utilizados os conceitos de LCA aplicados a um produto que cumpre uns requisitos mínimos. Posteriormente a granulação do produto é utilizada para criar uma caracterização funcional dos elementos que o compõem, mesmo que dos fixadores que vinculam aqueles elementos. Uma vez conseguido o anterior, a etapa quatro simula o evento de falha do corpo de estudo para enxergar as consequências da conformação do produto desde o viés de descarte do recurso analisado, e por fim na etapa cinco, quantificar a capacidade de retorno do produto para um segundo ciclo de vida através dos diferentes cenários de destino possíveis.

Figura 25 - Etapas da metodologia proposta



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 IMPACTOS, INDICADORES DE CATEGORIA E MODELOS DE CARACTERIZAÇÃO

Como visto no capítulo 2, a ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida visa identificar e mensurar os impactos dos fluxos de materiais e energia ao longo da vida dos produtos com o intuito de quantificar os impactos que eles constituem para o seu entorno. Isto requer a definição das variáveis que são consideradas determinantes para o tipo de análise a ser realizada.

A quantidade de recursos necessários para retornar um produto ao estado de funcionamento poderia ser quantificada para diversas variáveis como, por exemplo:

- Água;
- Solo;
- CO₂;
- Energia;
- Ozônio;
- Acidificação;
- Tempo.

O modelo proposto na primeira etapa da metodologia requer a definição do escopo para o qual será avaliado o indicador. Para isso é necessária a limitação da categoria de impacto, os indicadores de categoria e os fatores de caracterização que serão utilizados. Porém, deve-se ter em mente que eles devem ser passíveis de modificação de acordo com as necessidades do pesquisador. Na Tabela 12 contém a delimitação de escopo padrão, enquanto a Tabela 13 apresenta a delimitação de escopo definido para a metodologia, formulada para a variável energia.

Tabela 12 - Tabela de delimitação de escopo padrão

| Termo | Definição |
|-------------------------|------------------|
| Categoria do impacto | |
| Indicador de categoria | |
| Fator de caracterização | |

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 13– Tabela de delimitação de escopo definido para a variável energia

| Termo | Definição |
|-------------------------|---|
| Categoria do impacto | Energia descartada |
| Indicador de categoria | Energia embutida; Tempo |
| Fator de caracterização | Capacidade de retorno do sistema ao estado de funcionamento |

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o preenchimento da Tabela 13, deve-se ter em mente que a presente metodologia é focada na quantidade de energia necessária para retornar o produto em estado de falha para o estado de funcionamento.

3.2 ESCOLHA DE PRODUTO E IDENTIFICAÇÃO DOS MÓDULOS

O produto a ser analisado deve satisfazer os requisitos mínimos para o tratamento dos dados necessários na procura pela avaliação do indicador. Alguns requisitos específicos são:

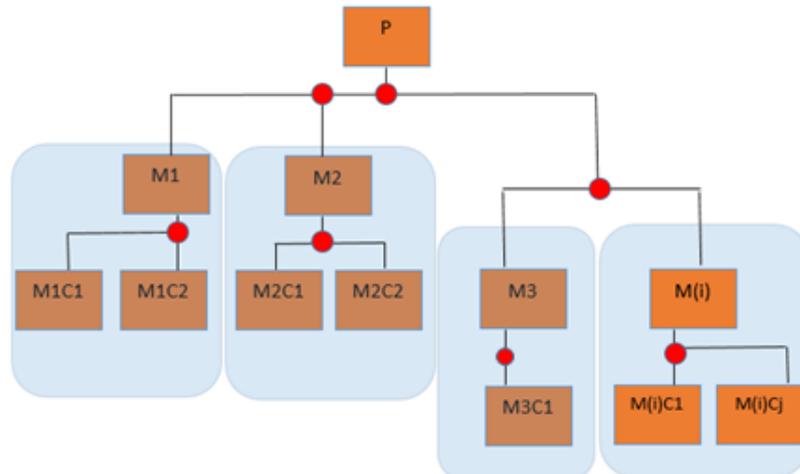
- Produto manipulável, evitando os sistemas fechados ao observador, chamados de caixa preta, pela impossibilidade de observar ou manipular os componentes que os integram;
- Estrutura modular;
- Fixações identificáveis;
- Diversos tipos de materiais;
- Tecnologias mistas (mecânicas, eletrônicas, elétricas, hidráulicas etc.);
- Tempo de vida do produto conhecido;

Os produtos eletrônicos são candidatos adequados a serem analisados, assim como os aparelhos de linha branca, linha marrom e as chamadas “pequenas aplicações elétricas” (PAE). Junto a eles estão também as máquinas de médio porte. Isto se deve à facilidade de obtenção das informações sobre a fabricação dos componentes e a origem das peças, assim como do mapeamento da estrutura do produto e da categorização das funções.

3.2.1 Mapeamento

Levando-se em consideração os seis itens anteriores, o produto escolhido deve ser mapeado de maneira granular, diferenciando cada módulo que o compõe hierarquicamente e identificando as fixações que conectam cada parte do produto. No segundo nível da distribuição hierárquica definida como granulação, são identificados os componentes que integram os módulos, levando em consideração a sequência de montagem. A nomenclatura utilizada obedece a seguinte nomenclatura: (P) corresponde ao produto, M(i) corresponde a cada módulo, C_j corresponde a cada componente que constitui cada módulo. A nomenclatura para a identificação de cada elemento é linear, de maneira que, por exemplo, M3C1 se lê “o elemento C1 que pertence ao módulo 3”. Finalmente, cada círculo vermelho identifica uma fixação entre dois elementos. Isso pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 - Mapeamento granular do produto P



Fonte: Elaborado pelo autor

A saída do processo de mapeamento é a classificação dos subsistemas compostos por cada módulo formado pelos seus componentes, assim como a informação sobre o número de fixações internas e externas. Essa saída será chamada “*Kanban* de Informação do Módulo” (KIM), e um exemplo é mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Cartão *Kanban* do Módulo (CKM)

| | |
|--------------------------|----------------------|
| Módulo | M(i) |
| Componentes | C_j |
| <i>Fixações internas</i> | X |
| Fixações externas | Y |

Fonte: Elaborado pelo autor

Finalizado o mapeamento, tem-se informações importantes para o desenvolvimento da pesquisa, no que se refere à distribuição modular do produto e à relação entre os diferentes subsistemas mediante mecanismos de fixação.

3.2.2 Indicadores de categoria dos módulos

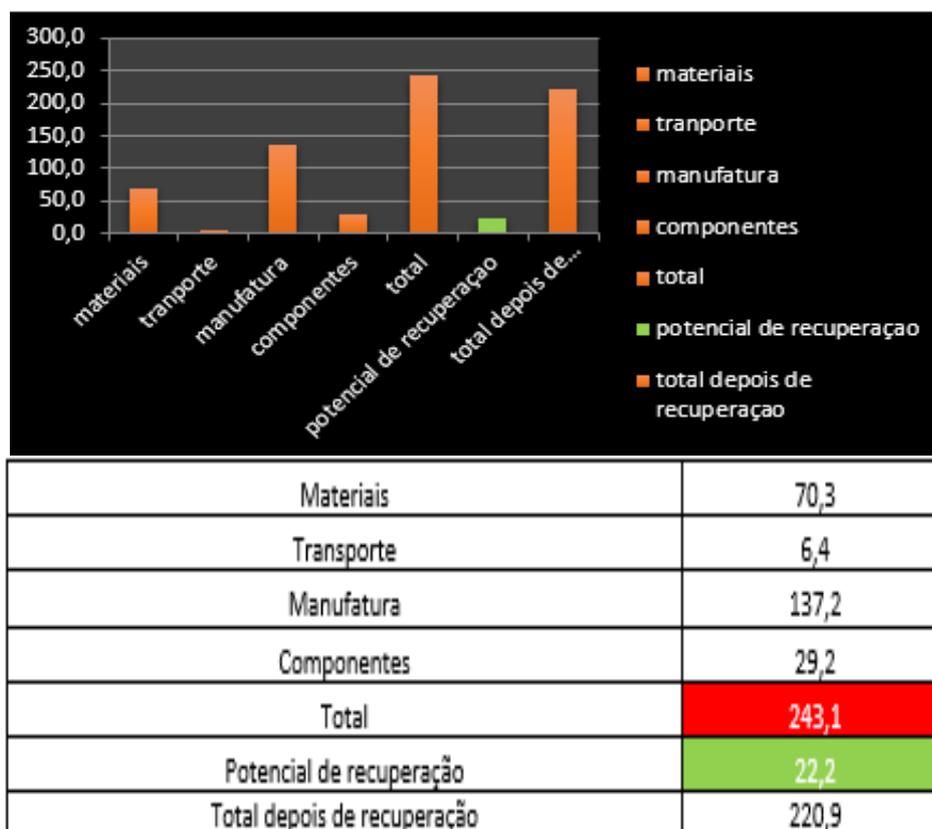
Obtidos os resultados dos mapeamentos, o produto é segmentado em módulos, os quais requerem análises individuais. A etapa seguinte associa as escolhas de escopo, tomadas na fase 1 (variável energia), para saber quais informações serão úteis e necessárias a partir desse momento. Sabendo-se que a categoria de impacto escolhida foi a energia descartada, tem-se que a análise foca na quantificação da energia embutida em cada módulo.

A fase de formulação de indicadores de categoria dos módulos requer um estudo detalhado sobre as operações necessárias para a fabricação de cada módulo, assim como sobre a mineração dos materiais utilizados, o transporte primário e todas as informações que podem compor a análise de ciclo de vida do produto, uma vez que, posteriormente, aquelas informações referentes à recuperação de materiais também serão utilizadas. A saída esperada é o cálculo da energia embutida em cada módulo.

Mediante a utilização de uma ferramenta computacional (no caso desta tese utilizou-se SEDOP-GRIMA), é calculada a energia embutida apresentada em mega joules para cada módulo partindo do somatório de cada um dos componentes que o compõe. Na Figura 28 são mostrados os resultados da ecoauditoria, calculados utilizando o software SEDOP GRIMA

para um módulo de um produto de linha branca, de forma a exemplificar como são apresentados os resultados da energia embutida em cada módulo.

Figura 28 – Resultados do relatório de ecoauditoria para um exemplo



Fonte: Elaborado pelo autor

Depois de obtidas as informações sobre a energia embutida para cada módulo, a etapa seguinte, em concordância com os indicadores de categoria definidos na limitação do escopo, é o tempo. Então, expressa-se a energia embutida em função do tempo de vida útil do produto. As informações a respeito do tempo de vida útil do módulo, ou *lifespan*, são extraídas das bases de dados disponíveis em (KUZNETS, 1955) (WORLD BANK, 2018) (AGRAWAL, 2011) e (MEADOWS, 2012), assim como das informações de sustentabilidade fornecidas pelas empresas de grande porte.

As informações referentes ao tipo de interface e interações entre módulos e/ou componentes (fixação) são limitadas para esse trabalho como destrutivas, reversíveis, de engates ou indiretas. Esse último caso corresponde à fixação com parafusos ou uniões, devido à interação de uma terceira peça (FORCELLINI, 2012).

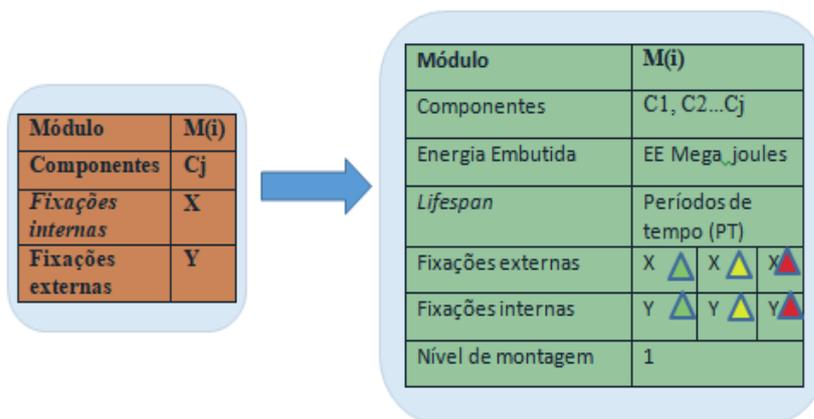
A interface entre componentes é definida pelo tipo de interação entre superfícies, sendo limitada a três tipos de fixação:

- Fixação direta, reversível, não destrutiva e não deformante.
Engates, cliques, guias passantes 
- Fixação indireta, não destrutiva e não deformante.
Parafusos, porcas, anéis, fitas 
- Fixação direta, destrutiva e alteração química.
Soldagem, fusão, *snap fits* irreversíveis 

O nível ou camada do módulo dependerá da sua montagem, considerando a ordem em que o produto foi manufaturado, a estrutura do *layout* e a ordem que deve ser seguida para a desmontagem. A lógica a ser seguida será: nós filhos, raiz e intermediário. O resultado do nível de montagem será avaliado e confirmado pela diagramação da rede bayesiana elaborada na etapa seguinte do trabalho.

Uma vez aprimorada a saída da fase de mapeamento, mostrada na Figura 28, e após a inclusão dos valores de energia embutida, tempo de vida do módulo nível ou camada de montagem de acordo com a granulação, o resultado obtido, chamado de evolução do KIM, é a entrada a fase de caracterização do produto (Figura 29).

Figura 29 - Evolução do KIM



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO

A caracterização do produto constrói a definição deste como um sistema de produto (SP) que recebe diferentes entradas e entrega um ou mais resultado(s) chamado(s) de função(es). Isso ocorre mediante a interação de processos e ações executadas por diferentes subsistemas.

O objetivo da caracterização é explicar aquelas interações por meio da comparação entre aqueles subsistemas e a sua contribuição para o sucesso na performance esperada, durante um tempo esperado em condições planejadas.

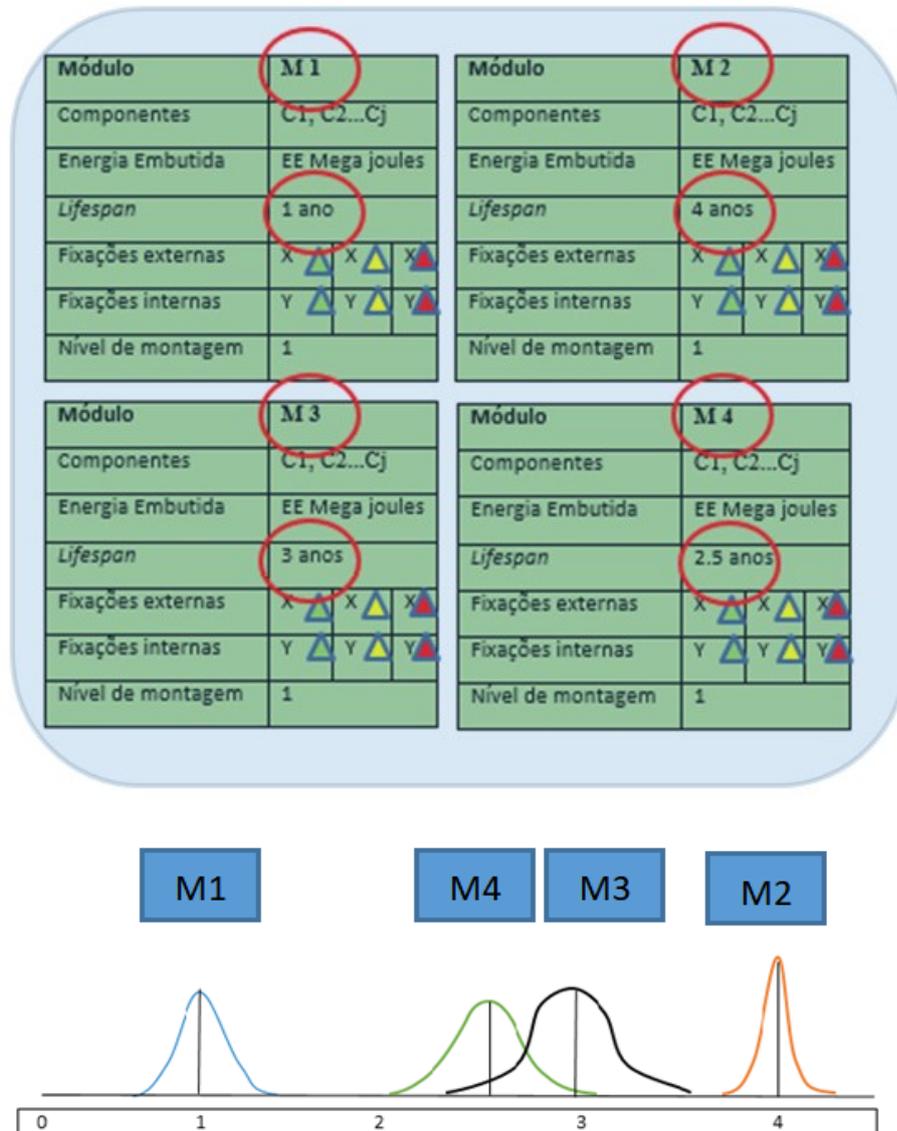
O processo de caracterização possui três sub-etapas: **1.** Formação das distribuições de tempo de vida por meio de módulos que determinam a vida útil do produto; **2.** Projeto das redes de precedência utilizando o modelo de redes bayesianas; e **3.** Cálculo da energia consumida na fase de uso. Do anterior se deduz que a fase de caracterização cobre as fases de ciclo de vida compreendidas entre a mineração e o uso.

3.3.1 Distribuição de *lifespan* por módulos

Utilizando a informação recolhida no KIM, identifica-se o tempo de vida para cada módulo que compõe o SP. O passo seguinte da metodologia aproveita essa informação para determinar o tempo de vida do produto, assim como para identificar as especificações de projeto que determinam possíveis planos de manutenção ou melhoras no desenho do produto no futuro.

Inserindo os valores dos tempos de vida útil (*lifespan*), para cada módulo, ao longo de uma reta de tempo de uso esperado, serão obtidos três dados. Esses dados são requeridos para construir uma ferramenta visual que ajuda no desenvolvimento da metodologia. Na Figura 30 observa-se uma reta de tempo com expectativa superior a 4 anos, e dados discretos para o tempo de vida útil de 4 módulos, com tempos de vida e distribuição de confiabilidade normal.

Figura 30 - Reta de distribuições de lifespan por módulo



Fonte: Elaborado pelo autor

- A vida útil do produto será a mesma que a do módulo que possua o menor tempo de vida útil não substituível. Na Figura 30 o módulo correspondente à distribuição azul (M1) será o que determina o momento de descarte do produto, mesmo que os outros três módulos ainda estejam em fase de uso e tempo de vida útil. O módulo com menor tempo de vida será definido a partir de agora como *Lower Lifespan Module* (LLM)
- É visível também a distância entre os tempos médios de vida dos componentes. Caso essa distância seja muito grande pode-se realizar um planejamento

inadequado ou um investimento energético desnecessário nos módulos mais à direita da reta de *lifespan*, dado que atingido o final da vida útil e aqueles módulos ainda se encontram distantes do seu próprio fim de vida útil.

- Finalmente, é claro o controle de processos sobre a manufatura dos equipamentos, uma vez que distribuições muito amplas abrangem muito espaço na reta, sobrepondo curvas, e podendo falhar em muitos momentos. Tal situação resulta em níveis baixos de confiabilidade, investimento alto com falhas prematuras ou investimento baixo e resultados aleatórios para o cliente.

Respondidas as três informações sobre o tempo de vida do produto e identificado o LLS, e as distâncias no tempo de vida dos outros subsistemas que compõem o produto (Figura 31 (a)), será preenchido um novo cartão auxiliar com as informações detalhadas. Esse cartão é chamado de *Kanban de Lifespan do Produto (KLP)* e está representado na Figura 31 (b).

Figura 31 - Kanban de *lifespan* de produto (KLP)

| Modulo | Lifespan modulo | Lifespan do produto | Diferencia |
|--------|-----------------|---------------------|------------|
| 1 | 1 ano | 1 ano* LLS | 0 |
| 2 | 4 anos | 1 ano | 3 anos |
| 3 | 3 anos | 1 ano | 2 anos |
| 4 | 2,5 anos | 1 ano | 1,5 anos |

(a)

| Modulo | Lifespan modulo | Lifespan do produto | Diferencia |
|--------|-----------------|---------------------|---------------------|
| M1 | X_1 ano | X_1 * LLS | 0 |
| M2 | X_2 anos | X_1 ano | $X_2 - X_1$ anos |
| M3 | X_3 anos | X_1 ano | $X_3 - X_1$ anos |
| M4 | X_4 anos | X_1 ano | $X_4 - X_1$ anos |

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

Para esse momento, a metodologia proposta apresenta duas saídas importantes das primeiras etapas. Dois cartões de informação sobre o SP que permitirão o desenvolvimento subsequente da pesquisa e obtenção da resposta as questões planejadas: o KIM e o KLP.

3.3.2 Construção do modelo de precedência

O princípio da lógica bayesiana fundamenta-se, como explicado na revisão bibliográfica, na consideração de que a probabilidade de ocorrência de um evento deverá ser analisada em conjunto com os fatores desencadeantes. Isto significa que um evento poderá ser avaliado para um instante, toda vez que seja avaliado em conjunto com a probabilidade do evento que o precede.

No desenvolvimento da rede bayesiana que é utilizada na metodologia proposta, parte-se de três premissas básicas, considerando o elemento analisado como elemento A e o elemento com quem este é comparado como elemento B.

Premissas básicas para a construção das matrizes de precedência:

- A pertence a esse nível de granulação?
- A é precedente de B?
- B é precedente de A?

A lista de elementos a serem avaliados para as três premissas é obtida da Figura 31, quando foi desenvolvida a construção do mapeamento do produto e a especificação de todos os módulos e seus componentes. A partir desse ponto, tanto os módulos quanto os componentes serão determinados como elementos durante a construção do mapa de precedências. O grupo de elementos é apresentado usando a sintaxe de conjunto abaixo:

SP: (P, M1, M2, M3, M(i), M1C1, M1C2, M3C1, M(i)C1, M(i)j...)

Cada avaliação ocorre dentro do escopo da lógica booleana para os valores possíveis: *true* (1) ou *false* (0). Caso exista uma codependência no mesmo nível o valor de saída será (2), o que gera uma matriz para cada caso. Essas matrizes estão apresentadas na Figura 32 como: (a) matriz de nível, (b) matriz de precedência de A, e (c) matriz de subsequência de A.

Figura 32 – Matrizes de nível, de precedência e de subsequência

(a) Matriz de nível

| Elemento | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 | Nível 4 |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| P | 1 | 0 | 0 | 0 |
| M1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| M2 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| M3 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| M(i) | 0 | 0 | 1 | 0 |
| MIC1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| MIC2 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| M3C1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| M(i)C1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| M(i)j | 0 | 0 | 0 | 1 |

(b) Matriz de precedência

| | P | M1 | M2 | M3 | M(i) | MIC1 | MIC2 | M3C1 | M3C2 | M3C1 | M(i)C1 | M(i)j |
|--------|---|----|----|----|------|------|------|------|------|------|--------|-------|
| P | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| M3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| M(i) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| MIC1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M3C1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M3C2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| MIC2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M3C1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M(i)C1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M(i)j | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

(c) Matriz de subsequência

| | P | M1 | M2 | M3 | M(i) | MIC1 | MIC2 | M3C1 | M3C2 | M3C1 | M(i)C1 | M(i)j |
|--------|---|----|----|----|------|------|------|------|------|------|--------|-------|
| P | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M(i) | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| MIC1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| MIC2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M3C1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M3C2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M3C1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M(i)C1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M(i)j | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Elaborado pelo autor

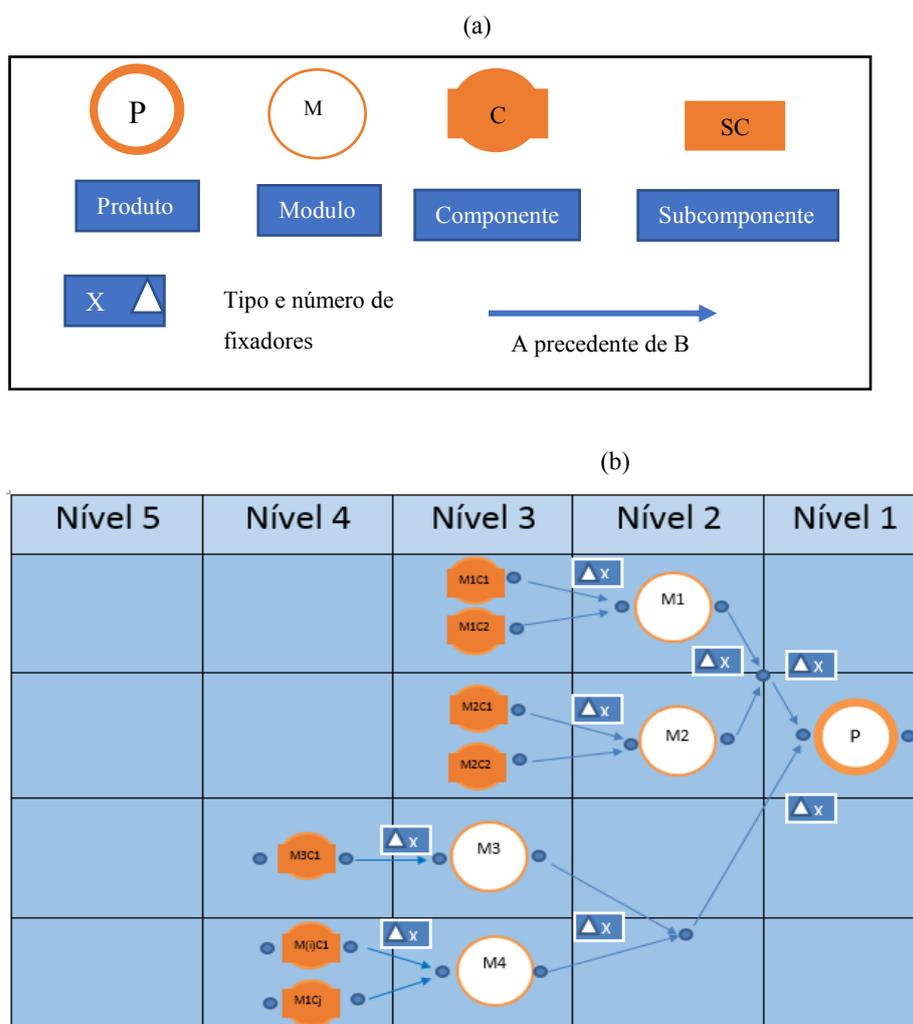
- A matriz (a) representa uma comparação um a um à resposta da pergunta: “A pertence a esse nível de granulação?”, atribuindo-se o valor (1) para resposta positiva, e (0) para negativa.
- A matriz (b) representa uma comparação um a um à resposta da pergunta: “A é precedente de B?”, atribuindo-se o valor (1) para resposta positiva e (0) para negativa.
- A matriz (c) representa uma comparação um a um à resposta da pergunta: “A é subsequente de B?”, atribuindo-se o valor (1) para resposta positiva e (0) para negativa.

Os valores obtidos por meio da análise são utilizados para diagramar sobre uma planilha de rede de projeto a localização dos elementos do SP, em conjunto com suas fixações e relações de dependência, seguindo a informação das matrizes.

A Figura 33 apresenta a rede de precedências para um produto com especificações vistas no conjunto (1). Na medida em que o SP analisado forneça os dados do KIM e KLP, os espaços para energia embutida e tempo de vida útil por módulo são inclusos na rede, assim como o número e o tipo de fixações.

Na parte (a) da figura pode-se observar as convenções gráficas que serão utilizadas posteriormente neste trabalho para identificar os elementos mapeados, sendo o mesmo que a identificação das fixações e setas relacionais entre elementos.

Figura 33 - Rede bayesiana de precedências



Fonte: Elaborado pelo autor

Concluídas as duas primeiras etapas da caracterização do produto, descreveram-se os eventos desenvolvidos entre as fases de mineração e de saída do portão (*Gate 2*) para entrar na fase de uso. Será realizada também a análise referente ao consumo do produto na fase de uso, uma vez que o consumo será fundamental na escolha da determinação mais apropriada de acordo com os critérios que foram definidos na pesquisa.

Para a quantificação da energia embutida na fase de uso, podem ser utilizados diversos programas computacionais como GABI, CES Edupack, etc. Na presente análise será utilizado o programa computacional SEDOP-GRIMA (DURAN, 2014). Na Tabela 14 é mostrado um exemplo de resultados obtidos utilizando-se o referido programa.

Tabela 14 - Cálculo do consumo de diferentes aparelhos eletrônicos em função do tempo usando-se o programa SEDOP-GRIMA

| Aparelho | kW.h | | Tempo M | Dias | Tempo | Energia | OE | OE Equiv. |
|----------|-------|----------|-----------|------|--------|---------|--------|-----------|
| | Ativo | Stand by | uso dia | | de uso | cons. | Equiv. | WO/SB |
| | | | Horas/dia | | Anos | Mj | USA | |
| Produto | 0,00 | 0,00 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | 0,00 | 0,00 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | | | | | | 0,00 | 0,00 | |

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.3 Cálculo de energia de consumo em fase de uso

As informações inseridas no programa SEDOP são o tempo de uso em horas por dia, o número de dias de utilização e o tempo de uso em anos. Nas células amarelas deverá ser colocado o tipo de produto, assim como o país onde serão realizados os experimentos. Isto se deve ao consumo real relacionado ao *mix* energético do país, assim como às perdas durante a transmissão pela rede elétrica. Na Tabela 15 tem-se como exemplo uma cafeteira que funciona duas horas por dia, cinco dias na semana, com dez anos de uso. Uma vez que o produto está instalado nos Estados Unidos, o cálculo se realiza de acordo com o *mix* energético do país.

Tabela 15 - Cálculo da energia de consumo em fase de uso de uma cafeteira nos EUA

| Aparelho | kW.h | | Tempo M | Dias | Tempo | Energia | OE | OE Equiv. |
|-----------|-------|----------|-----------|------|--------|---------|---------|-----------|
| | Ativo | Stand by | uso dia | | de uso | cons. | Equiv. | WO/SB |
| | | | Horas/dia | | Anos | Mj | USA | |
| Cafeteira | 0,64 | 0,0015 | 2 | 5 | 10 | 322,85 | 2292,24 | 2272 |
| | | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0 |
| | | | | | | 322,85 | 2229,24 | |

Fonte: Elaborado pelo autor

Depois de inseridos os dados, os resultados mostrados pelo simulador permitirão calcular tanto o consumo permanente durante o funcionamento, como o consumo total durante períodos de tempo específicos.

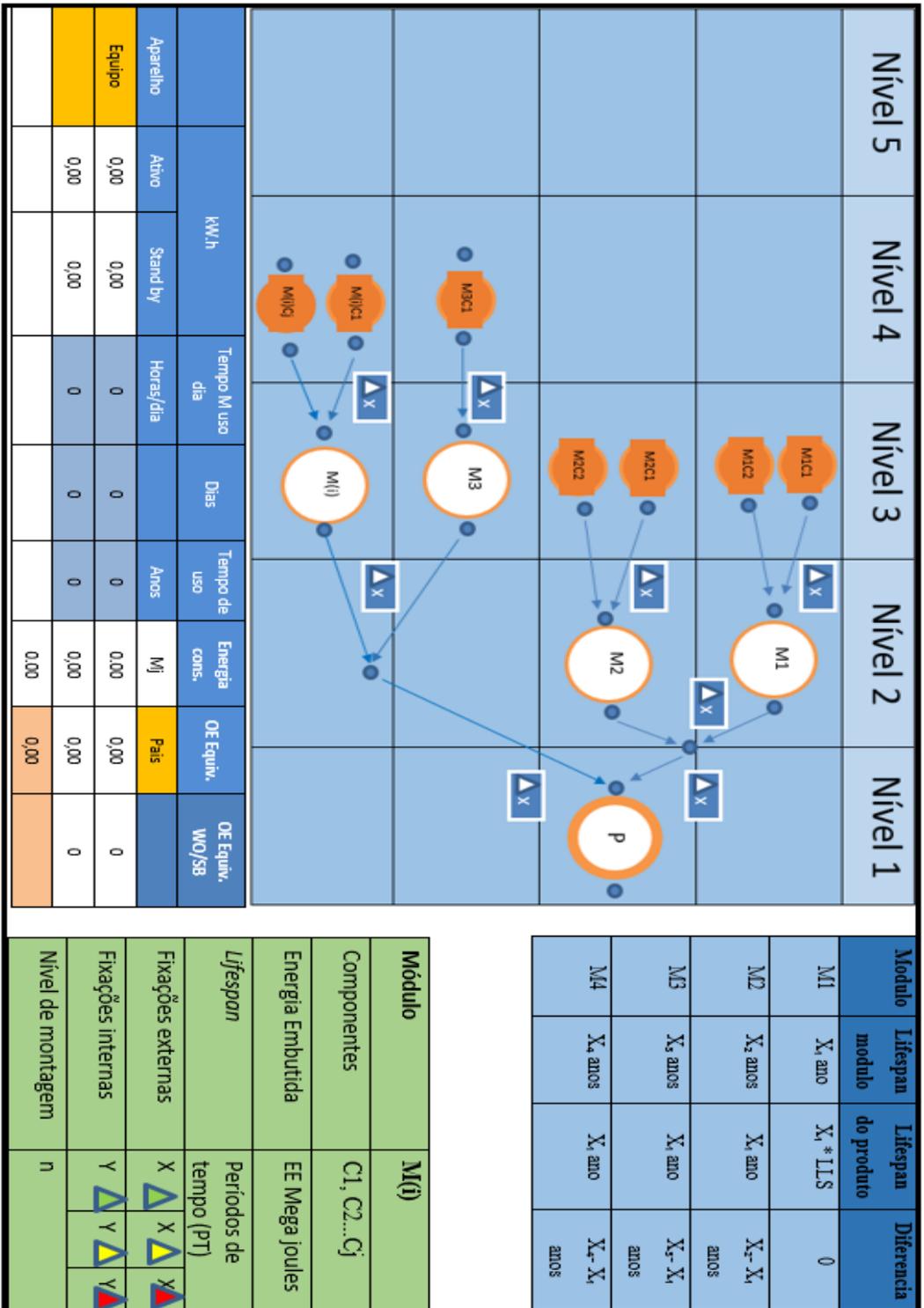
Do exemplo obtêm-se o consumo de 48,79 MJ e o consumo na fonte de geração, que é de 346,39 MJ. O procedimento anterior deverá ser realizado para o produto escolhido e replicado em diferentes condições de utilização. O resultado dos experimentos será utilizado para entender e decidir as consequências de se substituir um módulo quebrado por outro igual, ou por outro módulo compatível, porém mais eficiente. Além disso, pode-se compará-lo com outro produto que, sendo entregue a mesma função e tendo sido desenvolvido simultaneamente ao tempo de uso do produto, seja mais sustentável em termos do consumo elétrico.

Com o cálculo de energia durante a fase de uso, a rastreabilidade da energia embutida ao longo da vida útil do produto abrange desde a mineração até o final da fase de uso. A caracterização do produto entrega, então, quatro saídas que serão utilizadas a partir desse momento buscando-se avaliar a capacidade do produto para retornar ao estado de funcionamento do ciclo de vida. As saídas das três primeiras fases da metodologia apresentadas na caracterização do produto são as seguintes:

- KIM: o kanban de informação de módulo fornece informações sobre o nível de granulação, tipo e número de fixadores, e taxonomia do módulo;
- KLP: o kanban de *lifespan* de produto explica a relação entre os tempos de vida presentes em cada elemento que compõe o produto e define qual elemento será o LLS, sendo aquele com menor tempo de vida útil;
- Rede de precedências: a rede de precedências é preenchida com as informações provenientes dos kanban, e mostra a relação de codependência dos elementos que integram o sistema do produto SP;
- Cálculo de energia de consumo em fase de uso: a ferramenta utilizada na quantificação da energia utilizada pelo produto durante a sua fase de uso fornece uma ajuda visual para a tomada de decisões.

Essas saídas são mostradas na Figura 34, que corresponde à ficha de caracterização do produto. A ficha de caracterização de produto é utilizada para mostrar o estado estático pontual do produto no momento anterior à ocorrência da falha.

Figura 34 - Ficha de caracterização de produto



Fonte: elaborado pelo autor

3.4 ANÁLISE DE FALHA CONSEQUENTE DA OBSOLESCÊNCIA

A etapa 4 da metodologia começa quando ocorre o evento de falha no produto. Em um momento inicial, esta falha ocorre em um dos componentes, mesmo que desencadeie falhas em outros módulos dependentes daquele. A partir desse momento é necessário ativar os procedimentos de absorção, adaptação e recuperação possíveis para levar o produto ao estado mais próximo do estado anterior à ocorrência da falha (automaticamente ou de forma manual pelo usuário).

A transição do estado de pane ao de funcionamento requer um investimento de energia, que se mostra em forma de peças, transporte, consumo elétrico, trabalho etc. A avaliação da metodologia precisa da valoração quantitativa que confirme que a decisão de retornar o produto ao estado de “tão bom quanto novo” seja a melhor alternativa. A opção de retornar o produto ao estado de funcionamento anterior à falha parece ser a mais sustentável intuitivamente, mas pode não ser sempre correta do ponto de vista do impacto ambiental analisado.

3.4.1 Delimitação da falha

Como explicado no capítulo 2, enquanto o produto estiver desempenhando suas funções de um modo aceitável, nas condições esperadas e durante o tempo tolerável pelo usuário, o produto encontra-se dentro da projeção de confiabilidade para o qual foi projetado. Uma vez que as cargas às quais o produto está submetido durante a sua utilização superam as especificações de resistência para as quais foi fabricado, acontecerá um evento de falha no elemento que possui o tempo de vida mais curto, o qual será chamado elemento $M(i)C_j$.

A falha ocorrida no elemento gatilho ocasiona a perda de valor do produto para o usuário, uma vez que o produto não consegue mais satisfazer os requisitos esperados pelo usuário. Um exemplo disso é uma embalagem que, quando aberta, perde o valor para o usuário (instantaneamente ou paulatinamente).

Do ponto de vista tecnológico, todo componente eletrônico que não consegue mais entregar o desempenho esperado será submetido a exigências superiores para as quais foi projetado. Pode-se até considerar que, para um produto está sendo avaliado constantemente pelo usuário em termos de gosto ou moda, em um momento determinado o produto não irá mais satisfazer os padrões da avaliação, sendo descartado ou caindo fora do ciclo de uso.

Considera-se nesta tese que uma falha corresponde ao evento de irrupção da entrega da função e, posteriormente, a entrada no estado de pane do produto. Esse estado não descreve exclusivamente a quebra de uma peça (o que excluiria limitações tecnológicas, de embalagens, de moda, de legislação), mas o evento irruptivo em si. Ele descreve a transição entre o estado de equilíbrio do produto e a sua perda de valor.

3.4.2 Ocorrência da falha

Chegado o momento, o evento irruptivo acontecerá no componente cuja capacidade de resistência foi ultrapassada. A partir daí o produto perde o valor devido à parada na entrega da função, como explicado anteriormente. Considera-se que a falha aconteceu no componente $M(i)C_j$ apenas por convenção, uma vez que pode acontecer em qualquer um, dependendo das especificações de cada elemento.

A metodologia pode ser aplicada a inúmeras combinações granulares com diferentes valores de caracterização de produto. Porém, para ser explicada, deve-se declarar uma das variáveis: o tipo de fixação para cada interação entre partes.

Para simular uma falha, são gerados números randômicos utilizando uma ferramenta computacional, de forma a fornecer as informações sobre o tipo de fixação (que pode ser do tipo um, dois ou três, seguindo a classificação mostrada na etapa dois da metodologia). Foram gerados dois grupos de números randômicos, cada um composto de 8 valores entre 1 e 3 representando as 8 fixações presentes no produto analisado. Os grupos foram definidos como (FIXADORES A) e (FIXADORES B). Isto foi feito com o intuito de comparar os resultados da metodologia para o mesmo produto quando composto por diferentes fixações. A partir deste ponto a metodologia estará sendo aplicada a dois elementos: um mesmo produto, porém constituído por fixações tipo A ou fixações tipo B.

A energia embutida na exemplificação da ferramenta é discreta, sendo a mesma granulação utilizada na fase quatro. No entanto, no capítulo 4 essa energia será avaliada em valores reais para uma família de produtos. Utilizando-se a caracterização do produto descrita anteriormente, tem-se doze elementos no SP, cada um com a sua própria energia embutida e tempo de vida útil (ou *lifespan*), segundo seus KIM e KLP.

A Figura 35 mostra a energia embutida para cada elemento, assim como o resultado do gerador randômico de valores que definiu o tipo de fixação.

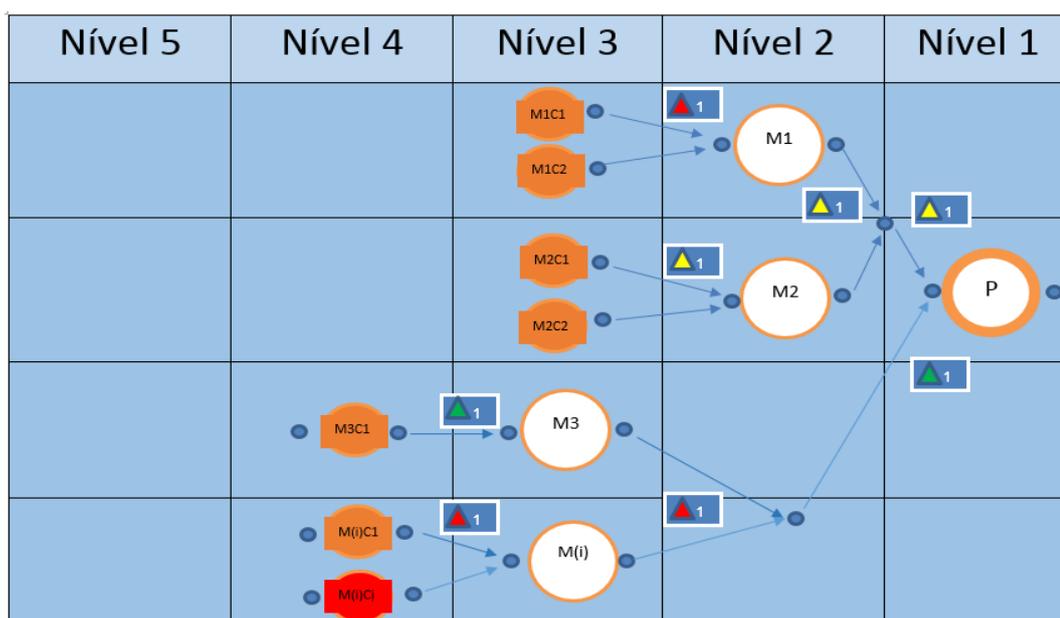
Figura 35 – Informações de caracterização de produto no momento da falha

| NC | KLP | Elemento | Energia embutida no elemento | Fixação | FIXADORES A | FIXADORES B |
|----|------|-------------|--|---------|-------------|-------------|
| 1 | X1 | $M(i)C_j =$ | EE $M(i)C_j$ | 1 | △ 2 | ▲ 3 |
| 2 | X2 | $M(i)C_1 =$ | EE $M(i)C_1$ | 2 | ▲ 1 | ▲ 3 |
| 3 | X3 | $M_3C_1 =$ | EE M_3C_1 | 3 | △ 2 | ▲ 1 |
| 4 | X4 | $M_2C_1 =$ | EE M_2C_1 | 4 | ▲ 3 | △ 2 |
| 5 | X5 | $M_2C_1 =$ | EE M_2C_2 | 5 | △ 2 | ▲ 1 |
| 6 | X6 | $M_1C_1 =$ | EE M_1C_1 | 6 | ▲ 1 | ▲ 1 |
| 7 | X7 | $M_1C_1 =$ | EE M_1C_1 | 7 | △ 2 | ▲ 3 |
| 8 | X8 | $M(i) =$ | EE $M(i)C_j +$ EE $M(i)C_1$ | 8 | ▲ 3 | △ 2 |
| 9 | X9 | $M_3 =$ | EE $M_3 + M_3C_1$ | | | |
| 10 | X1- | $M_2 =$ | EE $M_2C_1 +$ EE M_2C_2 | | | |
| 11 | X11 | $M_1 =$ | EE $M_1C_1 +$ EE M_1C_1 | | | |
| 12 | LLM* | $P =$ | EE $M(i) +$ EE $M_3 +$ EE $M_2 +$ EE M_1 | | | |

Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 36 mostra o mapa de precedências no momento da falha. No mapa foram agregados os tipos de fixações entre elementos obedecendo as relações existentes de acordo com os resultados entregues pelo gerador randômico FIXADORES A (valores entre 1 e 3). No momento inicial considera-se que só o elemento $M(i)C_j$ perdeu valor, dada a sua entrada no estado de falha.

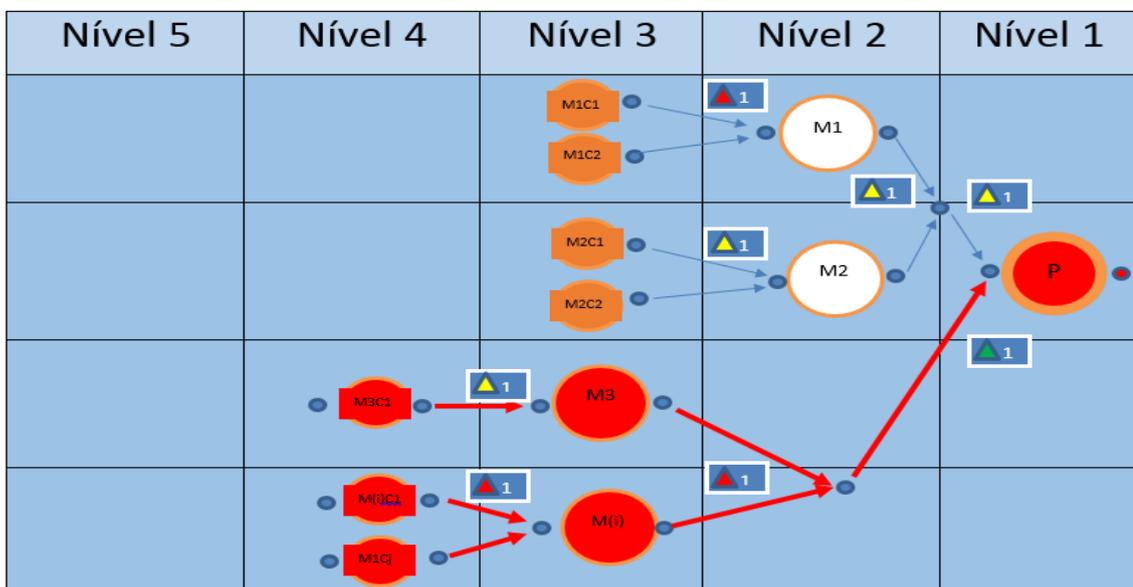
Figura 36 - Mapa de precedências no momento da falha com resultados FIXADORES A



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 37 observa-se como, depois de analisar a estrutura do SP de acordo as relações entre elementos, a falha que ocasiona a perda de valor inicial ocorrida em $M(i)C_j$ se expande para comprometer outros quatro elementos do SP. Para ter acesso ao elemento que apresentou a falha, será necessário quebrar aqueles elementos do SP que se encontram unidos mediante os fixadores do tipo 3, ocasionando uma separação irreversível.

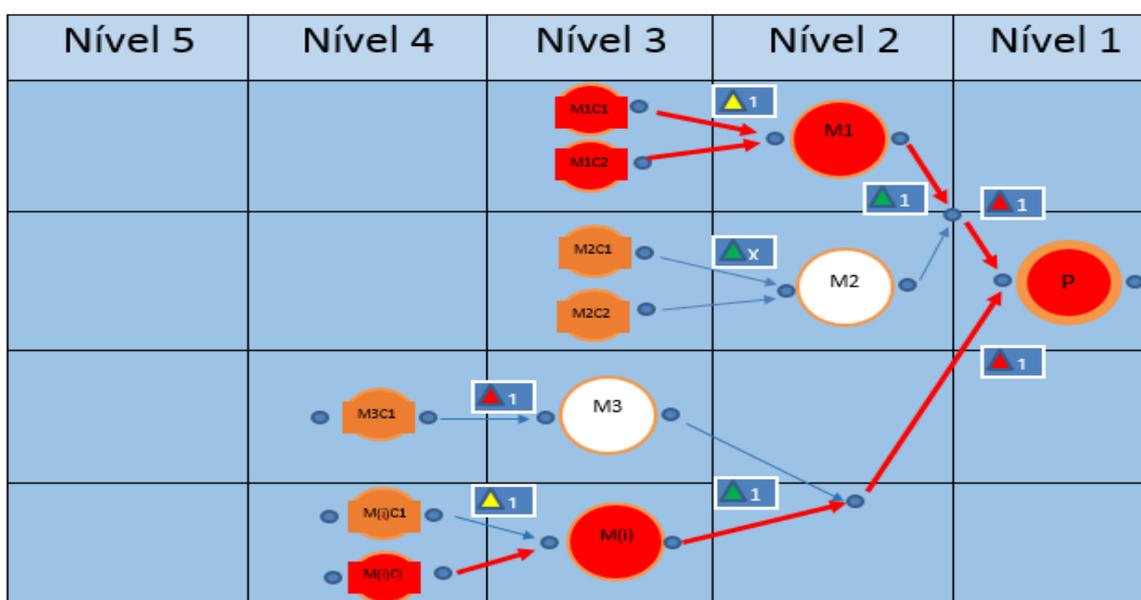
Figura 37 - Mapa de elementos comprometidos causados pela falha no elemento $M(i)C_j$ com FIXADORES A



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 38 observam-se os resultados do segundo exemplo randômico do tipo FIXADORES B entre os elementos. Comparativamente com a Figura 37, observa-se como a quantidade de elementos comprometidos varia significativamente, gerando resultados completamente diferentes no final da análise de capacidade de recuperação de recursos para o fim da vida útil do produto.

Figura 38 - Mapa de elementos comprometidos causados pela falha no elemento M(i)Cj com FIXADORES B



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que a entrada do sistema no estado de falha, ocasionado pela falha de um dos seus elementos, não afeta exclusivamente aquele componente. Conforme o tipo de fixações que une os outros elementos precedentes, essa entrada causa o descarte desnecessário daqueles itens que ainda se encontram em fase de uso, uma vez que não atingiram seu tempo próprio de vida útil.

A taxonomia bayesiana define a leitura da falha no modelo com fixadores A:

$$\text{Falha (A)} = [M(i)Cj|M(i)Cj, M(i)C1|M(i)Cj, M(i)|M(i)Cj, M3|M(i), M3C1|M3, P|M(i)]$$

A energia descartada desnecessariamente devido ao tipo de fixação entre elementos recebe o nome de “energia embutida descartada” (EED). Contudo, esse descarte não é igual à energia embutida no começo da vida útil do elemento, como explicado a seguir.

3.4.3 Energia embutida relativa e energia recuperada

A energia embutida para cada módulo que ainda se encontra em fase de vida útil não pode ser considerada a mesma que no início da sua vida útil, uma vez que transcorreu um tempo igual ao servido pelo módulo que apresentou a falha. Considerando-se a energia

embutida como uma distribuição, o conceito utilizado é o da densidade energética visto no capítulo de revisão bibliográfica (DURAN, 2015) (SMIL, 2010). O cálculo da “energia embutida relativa” (EER) no elemento é apresentado na Equação (3).

$$EER_{Modulo} = \frac{EEM}{LM} (LM - LLM) \quad (3)$$

Na Equação (3) EERM é a energia relativa para um módulo recuperado, no momento da falha do elemento M(i)Cj, EEM é a energia embutida no módulo no momento inicial da sua vida útil, LLM é o *Lower Lifespan Module* explicado anteriormente, e LM é a vida útil do módulo analisado.

Os valores da EERM são utilizados para quantificar a energia que pode ser recuperada dos elementos que ainda se encontram dentro da vida útil, uma vez chegado o momento de decidir qual será o tratamento dado ao SP.

No caso do elemento M1C1 a EERM é determinada usando-se a Equação (4).

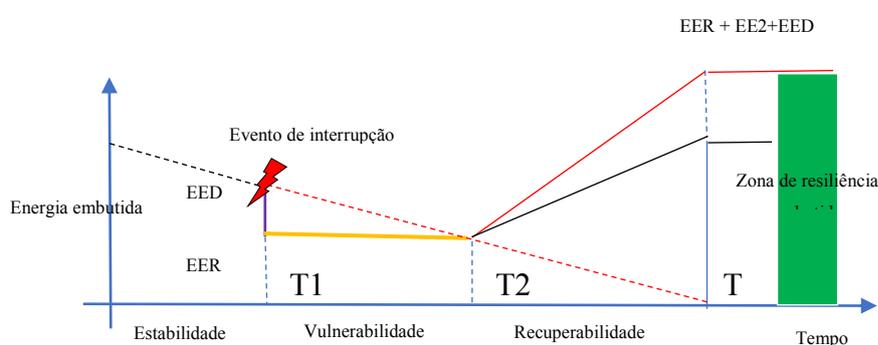
$$EER_{Modulo} = \frac{EEM1C1}{X7} (X7 - LLM) \quad (4)$$

Considera-se que uma das alternativas para destino dos elementos do SP é o descarte e a recuperação dos materiais. Segundo visto na seção sobre ecoauditoria, a quantidade de energia que pode ser recuperada mediante o reprocessamento e preparação dos materiais é menor do que a sua energia embutida inicial, devido à necessidade de efetuar processos que variam na quantidade de recursos necessários para tal fim. A “energia recuperada” (ER) é obtida de bases de dados disponíveis como (SINGH *et al*, 2012) (ASHBY *et al*, 2009), a qual será considerada em análises posteriores.

3.5 DETERMINAÇÃO ÍNDICE DE DESCARTE E RESILIÊNCIA EMBUTIDA DO PRODUTO

Utilizando o modelo proposto por (HENRY, 2012) para calcular a resiliência de um sistema em função do tempo, pode ser calculada também a resiliência do sistema em função da energia, porém, com significativas modificações, como mostrado na Figura 39.

Figura 39 - Resiliência embutida no produto



Fonte: Elaborado pelo autor

A energia embutida inicial no produto está projetada para se distribuir durante um tempo de vida que considera todos os elementos como sendo iguais no seu tempo de vida útil (T), isso durante a fase chamada “estabilidade”. Quando ocorre o evento de falha (T_1), a energia embutida no elemento que apresentou a falha é considerada esgotada, e a energia embutida restante no produto se divide em EED e EER. Então o produto entra na fase de “vulnerabilidade”, em que se avalia, com relação à entrega da função, o caminho a ser escolhido para retornar o sistema para o estado de funcionamento, tendo-se como opções os 5 cenários vistos na subseção anterior.

O pior cenário corresponde a substituir o produto por um novo (EE2) e descartar aquele que apresentou a falha. Pode-se observar que a nova energia embutida não corresponde somente àquela embutida no novo produto, mas também à energia que ainda encontrava-se em fase de uso do produto.

3.5.1 Índice de descarte

O índice de descarte (ID) é calculado em função da relação entre a soma do recurso relativo no produto no momento do descarte com a energia descartada e a quantidade de recurso investido na sua fabricação, conforme o indicador de categoria definido no escopo. Para o exemplo considerado, o índice de descarte será função da energia embutida relativa, da energia embutida descartada e da energia embutida total no produto.

O indicador proposto (índice de descarte) expressa o número de ciclos de vida após os quais o produto terá descartado desnecessariamente a energia embutida equivalente a um produto completo, o que permitirá conhecer a parcela de produtos fabricados desnecessariamente para uma faixa de tempo requerida (Equação (5)).

$$ID = \frac{EERP + EED}{EEP} PM \quad (5)$$

Sendo ID o índice de descarte e PM a produção mundial para aquele produto. O valor do indicador ID permite quantificar o descarte anual para uma terceira variável de interesse como, por exemplo, o valor de mercado (Equação (6)).

$$ID \text{ Valor de mercado} = ID(\text{USD por produto}) \quad (6)$$

Sendo USD o valor em dólares norte-americanos para produto, resultando na quantidade (do ponto de vista econômico) descartada anualmente para esse tipo de produto, causado pela configuração no projeto decorrente da obsolescência atribuída ao produto. No contexto da formulação do indicador ID, deve-se mencionar que não foi encontrada, ao longo da revisão bibliográfica, nenhuma referência à quantidade de recursos descartados decorrentes do projeto em função das categorias de impacto para o LCA.

3.5.2 Cálculo da REP

Transcorridas as quatro fases preparatórias para analisar o caminho a ser seguido após ter-se atingido o final da vida útil do produto, de acordo com o mapa de resiliência o produto se encontra na fase de vulnerabilidade. Já foram calculados os valores das variáveis que dão suporte à construção do índice de descarte, e da avaliação da metodologia proposta na tese.

O cálculo da REP finalmente é realizado na zona de resiliência embutida definida anteriormente.

A comparação entre possíveis soluções é calculada com base nas informações preenchidas na ficha de “estado de possíveis cenários no final da vida útil”, que agrupa cinco cenários depois da ocorrência da interrupção da entrega da função. São eles: 1. Substituir o elemento; 2. Substituir o módulo ao qual pertence; 3. Manter em uso (sempre que as outras funções do produto que ainda estão sendo entregues ao usuário compensem seu uso após a falha do elemento falido); 4. Reuso dos componentes que não foram afetados e, finalmente, 5. Recuperação dos materiais de todo o SP.

Conhecidos os valores da energia embutida que está dentro do sistema (EER, EED, ER) distribuídos em cada módulo, a capacidade de retorno do sistema ao estado de funcionamento depende da escolha feita para o tratamento do produto.

Lembrando a taxonomia a ser utilizada posteriormente

- EE (energia embutida total no produto/módulo)
- EER (energia embutida relativa no Produto/Módulo)
- EED (energia embutida descartada)
- ER (energia recuperada na reciclagem de materiais)
- REP (resiliência embutida no produto)

A ficha de “estado de possíveis cenários é apresentada na Tabela 16, entende-se que o retorno ao estado de funcionamento requer o investimento energético correspondente para cada opção a ser analisada.

O cálculo da REP do produto fundamenta-se na comparação dos cinco REP individuais para cada cenário quando determinada a quantidade de recurso (energia no caso estudado) necessária para que o sistema retorne ao estado de funcionamento.

Para retorná-lo é necessário adicionar energia ao sistema, e a quantidade será relativa à opção escolhida para o tratamento do produto. A “energia embutida na substituição” (EESub) representa a quantidade de energia embutida nos elementos novos inseridos no sistema para retorná-lo ao estado de funcionamento.

- EESub (energia embutida na substituição)

Quando o produto é substituído por outro, considera-se que a energia necessária para a substituição inclui o valor de um equipamento novo completo somado à energia descartada desnecessariamente naquele que será substituído.

Tabela 16 - Estado de possíveis resultados no final da vida útil do produto

| Retornar o sistema a entrega da função | Elementos substituídos | Elementos desmontados | Energia embutida na substituição MJ | Próxima falha e energia requerida |
|--|---|---|--|-----------------------------------|
| 1. Substituição da peça | $M^{(i)}C_j$, $M^{(i)}C1$, $M3$ | P , $M^{(i)}$, $M3$, $M^{(i)}j$, $M^{(i)}C1$, $M3C1$ | $EERM M^{(i)}C_j +$ $EERM M^{(i)}C1 +$ $EERM M3$ | LLM2-LLM1 |
| 2. Substituição do módulo | $M^{(i)}j$, $M^{(i)}C1$, $M3$, $M3C1$ | P | $EERM^{(i)}C_j + EER$ $M^{(i)}C1 + EERM3 +$ $EERM3C1$ | LLM2*-LLM1 |
| 3. Manter funcionamento | 0 | 0 | $EERM2C1 + EER$ $M2C2 + ERRM1C1 +$ $ERRM1C1 +$ $ERRM3C1$ | LLM2*-LLM1 |
| Reuso/Descarte | Componentes descartados | Componentes resgatados | Energia resgatada MJ | |
| 4. De componentes | $M^{(i)}j$, $M^{(i)}C1$, $M3$ | $M1$, $M2$, $M3C1$ | $EERM2C1 + EER$ $M2C2 + ERRM1C1 +$ $ERRM1C1 +$ $ERRM3C1$ | 0 |
| 5. De materias | 0 | $M1C1$, $M1C2$, $M2C1$, $M2C2$, $M3C1$, $M^{(i)}j$, $M^{(i)}C1$, $M3$ | $ER M1C1$, $ER M1C2$, $ER M2C1$, $ER M2C2$, $ERM3C1$, $ER M^{(i)}j$, $ER M^{(i)}C1$, $ER M3$ | 0 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A continuação com base nas informações da Tabela 16, são discriminados os cinco cenários analisados com o intuito de chegar numa comparação numérica do impacto de cada escolha.

A. REP da escolha A: Retorno do sistema ao estado de “tão bom quanto novo”:

Tabela 17 Energia necessária para retornar o produto ao estado A

| EE Total | EED | EER | EESub | Novo LLS |
|------------|---|--|--------------------------------------|----------|
| EE produto | $(EER M(i)C_j + EER M(i)C_1 + EER M_3)$ | $(EERM1C_1 + EERM1C_2 + EERM2C_1 + EERM2C_2 + EERM3C_1)$ | $(EE M(i)C_j + EE M(i)C_1 + EE M_3)$ | LLS2 |

Fonte: Elaborado pelo autor

- A falha ocasiona a interrupção da função do produto, e é preciso substituir o elemento responsável pelo estado de pane. A tarefa de substituição requer a realização de operações de desmontagem. As fixações destrutivas implicam na substituição de fixadores, ou de outras peças danificadas na desmontagem. A peça nova possui também uma quantidade de energia embutida e são requeridos processos de montagem novamente. Nesse caso, a eficiência do funcionamento será o mesmo que antes da falha.
- A REP é calculada somando-se EED e EESub.

B. Descartar o módulo que falhou e substituí-lo:

Tabela 18 Energia necessária para retornar o produto ao estado B

| EE Total | EED | EER | EESub | Novo LLS |
|------------|--|---|--|----------|
| EE produto | $(EER M(i)C_j + EER M(i)C_1 + EER M_3 + EER M_3C_1)$ | $(EER M1C_1 + EER M1C_2 + EER M2C_1 + EER M2C_2)$ | $(EE M(i)C_j + EE M(i)C_1 + EE M_3 + EE M_3C_1)$ | LLS2 |

Fonte: Elaborado pelo autor

- A complexidade na desmontagem dos elementos componentes impede a substituição do componente específico que apresentou a falha, ou a energia embutida na substituição do componente é igual ou superior a substituição do módulo, optando-se por substituir o módulo completo, descartando alguns outros elementos do módulo.
- A REP é calculada somando-se EED e EESub

C. Manter em funcionamento:

Tabela 19 Energia necessária para retornar o produto ao estado C

| EE Total | EED | EER | EESub | Novo LLS |
|------------|-----|---|-------|----------|
| EE produto | 0 | $EERM2C1 + EER M2C2 + ERRM1C1 +$ $ERRM1C1 + ERRM3C1$ | 0 | LLS2 |

Fonte: Elaborado pelo autor

- A falha ocorrida não resulta na interrupção da função, tendo ocorrido em um módulo secundário, podendo-se esperar uma manutenção posterior do produto sem precisar interromper o funcionamento do sistema. É considerada como a menos traumática das transições, uma vez que pode-se manter o planejamento original. Então, o sistema absorve a ocorrência do evento, minimizando o impacto à estabilidade do sistema.
- A REP é igual ao EER se o equipamento continuar em funcionamento, ou a soma de EER, EED e EESub caso a falha do equipamento for crítica, não permitindo a entrega de nenhuma função.

D. Descartar o módulo que falhou e reutilizar os componentes:

Tabela 20 Energia necessária para retornar o produto ao estado D

| EE Total | EED | EER | EESub | Novo LLS |
|------------|--|--|-------|----------|
| EE produto | $(EER M(i)C_j + EER$ $M(i)C_1 + EER M_3)$ | $EERM2C1 + EER M2C2 +$ $ERRM1C1 + ERRM1C1 +$ $ERRM3C1$ | 0 | 0 |

Fonte: Elaborado pelo autor

- A energia necessária para levar o produto ao estado de “tão bom quanto novo” é tão elevada que não justifica a troca. Neste caso, o melhor aproveitamento consiste na reutilização dos componentes que ainda se encontram em fase de uso, como a peça para substituição, levando em conta o tempo de vida útil restante de cada módulo.

- A REP é calculada somando-se a energia embutida na aquisição do novo equipamento EE2 e a EED, e subtraindo o valor da EER dado o aproveitamento dos elementos no acondicionamento de outros produtos.

E. Reuso de materiais:

Tabela 21 Energia necessária para retornar o produto ao estado E

| EE Total | EED | ER | EESub | Novo LLS |
|------------|------|--|-------|----------|
| EE produto | EERP | ER M1C1, ER M1C2, ER M2C1, ER M2C2, ERM3C1, ER M(i)j, ER M(i)C1, ER M3 | 0 | 0 |

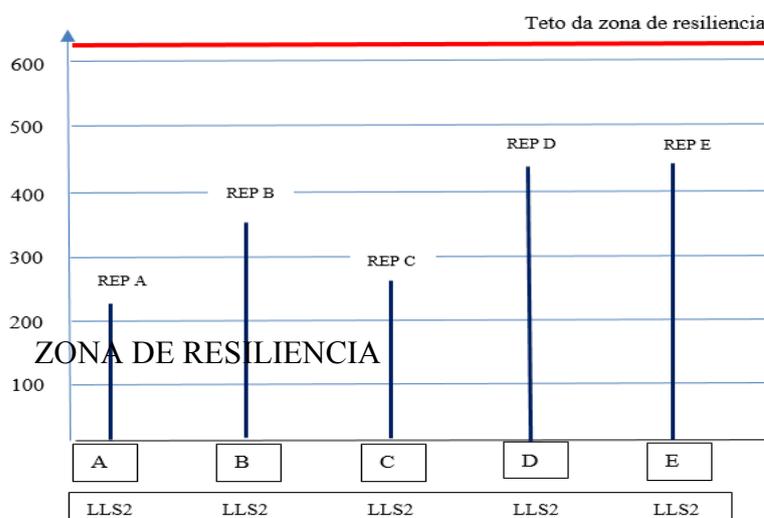
Fonte: Elaborado pelo autor

- As condições do produto, na ocorrência da falha devido ao seu uso ou decorrente da energia necessária para ser desmontado, faz com que seja inviável recuperar algo do produto sem gastar mais energia daquela que será recuperada.
- O REP é calculado subtraindo-se a quantidade energética recuperada nos materiais do valor do equipamento novo adquirido EE2.

Como mencionado na definição do índice de descarte, o pior cenário consiste em descartar o produto e substituí-lo por um novo, desconsiderando-se a energia relativa, a energia descartada e, ainda, a energia resgatável, pela qual se define como teto da zona de resiliência a soma da energia embutida de um segundo produto adquirido EE2, e os valores da EED e EER. Qualquer opção a seguir deverá estar abaixo desse valor.

É na zona de resiliência que são comparados os resultados das REP individuais, considerando-se que qualquer valor de REP superior ao teto da zona de resiliência, ele será descartado imediatamente. Na Figura 40 se observa a comparação das REP para os cinco cenários dentro da zona de obsolescência.

Figura 40. Comparação das REP individuais



Fonte: Elaborado pelo autor

No exemplo da metodologia são utilizados valores discretos, mas, graficamente, poder-se-ia considerar que REP A é a de menor valor. Define-se retornar o equipamento ao estado de tão bom quanto novo mediante a substituição do elemento que entrou em estado de falha. Caso a análise do novo tempo de vida não satisfizer os requerimentos do usuário, a segunda opção seria definida pelo valor da REP C.

Assim, a resiliência embutida no produto é a classificação ordenada das opções a seguir depois do final da vida útil do equipamento com base na quantidade de energia requerida para retorná-lo ao sistema de ciclo de vida. Isto poderá ser feito como parte do mesmo sistema de produto inicial, ou como parte da repotenciação ou recuperação dos materiais que o compõem.

Acompanhando cada cenário é mostrada a nova expectativa de vida do produto (ou LLS2) com o intuito de auxiliar na decisão sobre a confirmação da sugestão, ou passar para o cenário seguinte na lista.

A sequência para avaliar as opções a serem consideradas é **A LLS2, C LLS2, B LLS2, D LLS2, E LLS2**, e irá depender de uma análise individual considerando-se o novo tempo de vida do produto.

3.5.3 Saída da proposta metodológica

Para a metodologia explicada em função de valores discretos aleatórios, com elemento $M(i)C_j$ como aquele que possui o LLS, a saída é:

O produto pesquisado após apresentar uma falha localizada no elemento $M(i)C_j$ foi analisado para o cálculo da sua resiliência embutida com escopo de impacto definido para energia embutida, encontrando-se que o cenário de substituição do elemento específico é a opção que minimiza a energia necessária para retorná-lo ao estado de funcionamento.

A sequência em que as opções devem ser consideradas para fim de vida útil é:

- Substituição do elemento;
- Continuar seu uso sem substituições;
- Substituir o módulo ao qual pertence o elemento $M(i)C_j$;
- Descartar o elemento $M(i)C_j$ e utilizar os elementos restantes para repotenciar outros equipamentos
- Descartar o produto completo para recuperar energia por meio da reciclagem dos materiais

Uma vez apresentada a saída da metodologia, a qual forneceu as informações esperadas, sendo formulado o indicador de resiliência embutida no produto, considera-se finalizada a construção metodológica. Há a necessidade da avaliação da metodologia com dados primários não discretos e, nesse contexto, será descrito no próximo capítulo o processo de avaliação com o intuito de contrastar os resultados obtidos com o objetivo projetado.

4 APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA

Concluída a proposta da metodologia para produtos que apresentam uma falha no elemento com tempo de vida mais curto, e definida a sua capacidade de retorno ao estado de funcionamento, o passo seguinte é a avaliação da metodologia para um caso específico com o intuito de avaliar os resultados obtidos.

A família de produtos analisada foi escolhida com base nos critérios numerados na primeira fase da proposta, além de considerar um viés social de interesse e a acessibilidade prévia aos dados necessários para atingir resultados que permitam a geração de conclusões de interesse a esta pesquisa.

Considera-se que, segundo informações de (BALDÉ *et al*, 2017), no ano 2016 geraram-se 44 milhões de toneladas de resíduos sólidos eletrônicos com potencial de recuperação de materiais com valor de 55.000 milhões de euros. Materiais como o tântalo, obtido da mineração do mineral coltan, conhecido no Brasil como Columbita-tantalita, são questionados pela falta de controle social nas regiões de exploração.

Para 2017 a quantidade de smartphones fabricados no mundo supera os 5.000 milhões e, aproximadamente 4 de cada 5 pessoas no mundo já teve ou tem um aparelho desse tipo. Com uma rotatividade de 2 anos de média, a tendência da produção não parece diminuir.

Tendo em vista os argumentos anteriores, decidiu-se utilizar equipamentos eletrônicos do tipo smartphone como exemplo para analisar a metodologia proposta, sendo considerados modelos com tela tátil, funções de conectividade web e menos de 5 anos de fabricação. Utilizaram-se 10 equipamentos de diferentes marcas e modelos com o intuito de calcular valores médios que abrangeram diferentes especificações, processos e quantidade de energia embutida na fabricação. Aqueles dados que, devido ao sigilo das empresas produtoras, não estiverem disponíveis, foram tratados como fonte secundária, adquiridos por meio de bases de dados disponíveis.

4.1 SELEÇÃO DE IMPACTOS, INDICADORES DE CATEGORIA E MODELOS DE CARACTERIZAÇÃO

Como explicado no capítulo 3, a avaliação da metodologia pode ser feita para diversos tipos de categorias como água, ozônio, eutrofização etc. Para o presente caso, o

enfoque estará na energia como variável de impacto dentro do escopo da LCA, de forma a determinar a quantidade de energia embutida descartada e o impacto que isso gera no entorno ambiental ao longo do ciclo de vida

Na Tabela 22 se observa a delimitação do escopo do estudo de caso de acordo a variável escolhida. Com isso, as informações obtidas por meio dos passos da metodologia serão filtradas de modo a atingir o objetivo da pesquisa.

Tabela 22- Delimitação do escopo para o estudo de caso

| Termo | Definição |
|-------------------------|---|
| Categoria do impacto | Energia descartada |
| Indicador de categoria | Energia embutida, Tempo |
| Fator de caracterização | Capacidade de retorno do sistema ao estado de funcionamento |

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 ESCOLHA DO PRODUTO E IDENTIFICAÇÃO DOS MÓDULOS

Como mencionado anteriormente, foram escolhidos dez produtos do tipo smartphone correspondentes às marcas Apple, LG, Motorola e Nokia, com as limitações de serem modelos dos últimos 10 anos que possuam tela com tecnologia *touch* e conectividades por internet. Além disso, é importante o estado do equipamento, estando completo, ainda que em estado de pane, devido a alguma fonte de falha.

- Motorola G1, ano de lançamento 2014. (1*)
- LG GX 500. Fabricante LG, ano de lançamento 2012. (2*)
- Iphone 5. Fabricante Apple, ano de lançamento 2012. (3*)
- Iphone 4. Fabricante Apple, ano de lançamento 2011.
- Galaxy S4. Fabricante Samsung, ano de lançamento 2012.
- Galaxy S7. Fabricante Samsung, ano de lançamento 2014.

Na Figura 41 são apresentados três dos modelos analisados no estudo de caso, possuindo diferentes módulos, distribuição e tipos de uniões e estados.

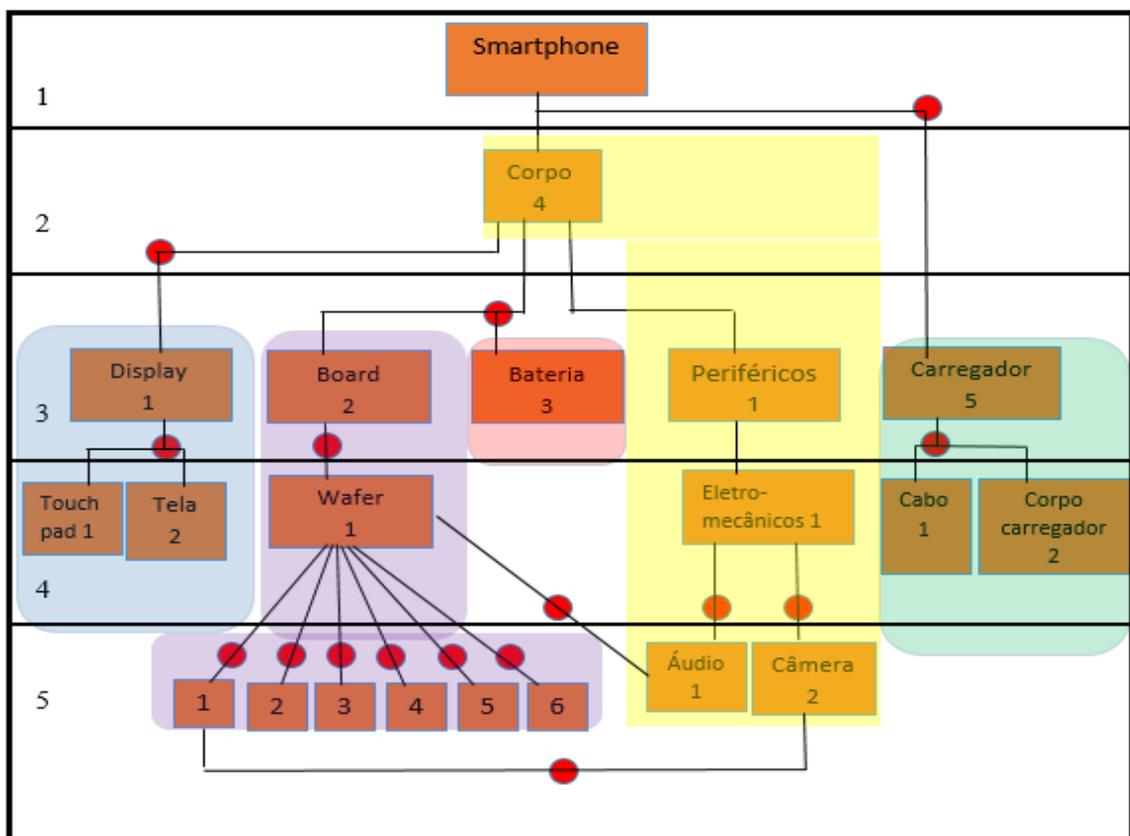
Figura 41 - Exemplo dos modelos utilizados no estudo de caso



Fonte: Elaborado pelo autor

De posse dos equipamentos a serem analisados, realizou-se o mapeamento granular da estrutura dos mesmos. Encontrou-se que, mesmo possuindo mínimas diferenças na distribuição dos componentes, todos obedecem a uma modularização similar, a qual pode ser observada na Figura 42.

Figura 42 - Mapeamento granular dos produtos analisados



Fonte: Elaborado pelo autor

Os elementos presentes no módulo 2, nível 5, correspondem aos elementos funcionais microeletrônicos do produto, e são compostos cada um por um *chip* de diferentes dimensões e capacidade particular:

1. Processador;
2. Administração de energia;
3. Memória;
4. Sensores;
5. Conectividade;
6. *Chipset* de voz.

O passo seguinte da metodologia consiste na elaboração do KIM com base nos dados obtidos no mapeamento, classificando os módulos segundo a sua distribuição (Figura 43). Uma vez identificados e classificados os módulos, será preenchido o *Kanban* de Informação Modular, assim como serão determinados os tipos de fixações internas e externas.

Figura 43 - KIM básico do módulo 1 da análise

| | |
|--------------------------|-----------------------|
| Módulo | M(1) Display |
| Componentes | MI, MIC1, MIC2 |
| <i>Fixações internas</i> | 1 |
| <i>Fixações externas</i> | 1 |

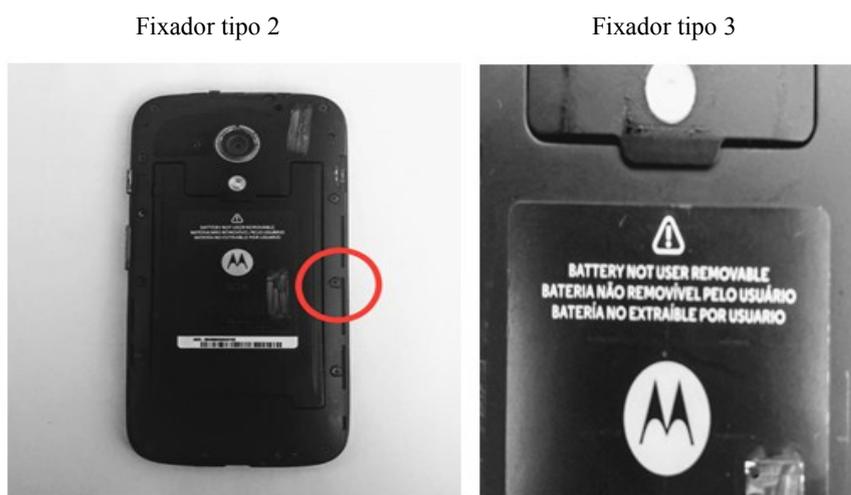
Fonte: Elaborado pelo autor

Foram encontrados 16 pontos de fixação entre os elementos. Porém, alguns desses pontos são compostos por até dez fixadores (Figura 44). Destacou-se também que entre os dez equipamentos analisados encontraram-se três variações importantes que requereram explicações:

- Modelos Motorola e Apple possuem uma bateria não substituível sem ajuda do serviço técnico, ou não substituível sem afetar o equipamento e perder a garantia do produto.
- Uma parcela dos modelos apresentou um PWB composto por dois *Wafers*.
- Um dos modelos possui um carregador sem cabo, mas, por ser apenas um dos produtos, essa característica será desconsiderada.

Diante do exposto, foram utilizados na avaliação da metodologia dois tipos de produtos, os quais são definidos como modelo 1 (que possui as três *features* mencionadas), e modelo 2 (aquele que não possui as referidas *features*).

Figura 44 - Exemplo de fixadores tipo 2 e 3



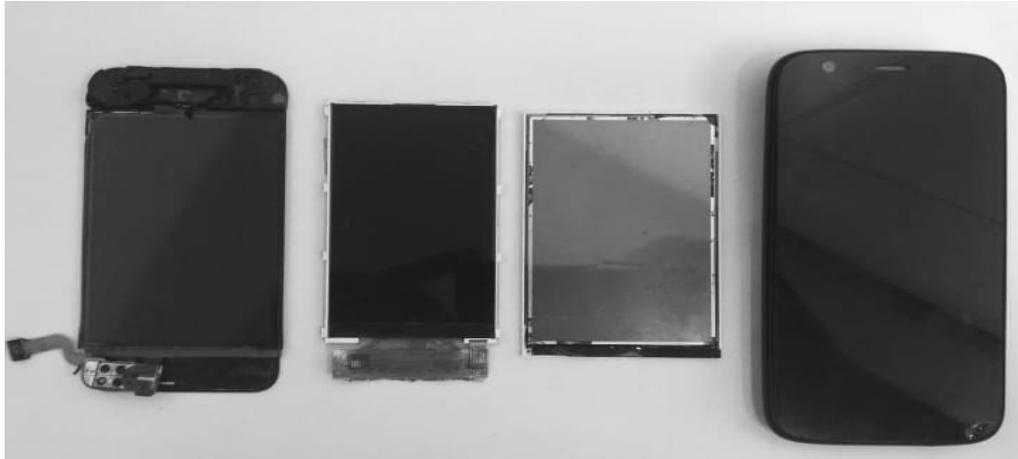
Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, definido o escopo da seleção de impacto, é necessário quantificar a energia embutida nos módulos dos produtos. Levando-se em conta os valores médios encontrados em cada equipamento e utilizando as bases de dados disponíveis e a ferramenta computacional SEDOP - GRIMA (DURAN, 2014) para calcular valores de energia embutida para diferentes produtos durante as fases de LCA, foram obtidos os resultados descritos a seguir.

4.2.1 Energia embutida por módulo

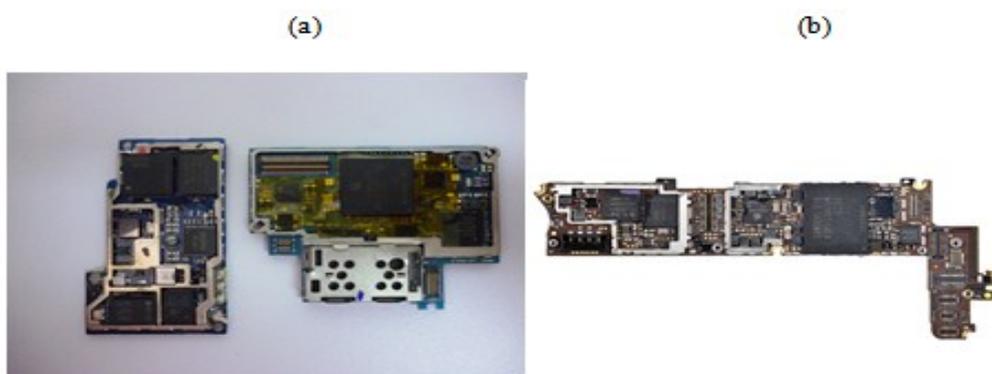
Definidos os cinco módulos (1 *display*, 2 *board*, 3 bateria, 4 corpo, 5 Carregador), a energia embutida em cada módulo foi calculada assim:

- Módulo 1 (*Display*): O módulo display é composto pelos elementos tela e sistema *Touch Screen*, como pode ser visto na figura 46. Esses valores foram calculados segundo o fator mostrado no capítulo 2 (3.573 MJ/m²). O módulo possui duas fixações, sendo uma interna tipo 3 e uma externa tipo 2. A energia embutida no módulo 1 corresponde a um valor de 15 MJ e um *lifespan* de 9 anos.

Figura 45 - Módulo *display* para diferentes modelos de produto

Fonte: Elaborado pelo autor

- Módulo 2 (*Board*): O módulo 2 concentra as funções de software do produto, sendo responsável pela maior contribuição energética no produto. Utilizando as bases de dados fornecidas por (GUTOWSKI *et al*, 2013), o programa computacional considera os *chips*, capacitores e *wafers* necessários para a fabricação do produto no cálculo da sua energia embutida no caso analisado. Na Figura 46 são observados os dois casos encontrados: (a) um *Board* dividido, e (b) um *Board* único. A energia calculada para a quantidade de elementos fixados no *Wafer* que compõem o módulo possui um valor de 364 MJ e um *lifespan* de 3 anos.

Figura 46 - Exemplos de *Board* encontrados nos produtos

Fonte: Elaborado pelo autor

A energia calculada para a quantidade de elementos fixados no *Wafer* que compõe o módulo baseia-se na quantidade de elementos inseridos no módulo, considerando que, segundo a lista de materiais (BOM - *Bill of Materials*), conta-se com seis *chips* responsáveis pelos processos funcionais mostrados na granulação: 1. Processador, 2. Administração de energia, 3. Memória, 4. Sensores, 5. Conectividade, 6. *Chipset* de voz

A soma da energia embutida nos *chips* integrados no *Wafer* (WILLIAMS, 2002) possui um valor de 364 MJ e um *lifespan* de 3 anos.

- Módulo 3 (Bateria): Como mencionado anteriormente, foram encontrados dois tipos de casos: (a) um módulo de bateria removível e substituível sem comprometer a integridade do produto, e (b) um exemplo mostrado na Figura 44, que requer que o produto seja enviado para um serviço técnico especializado para ser removido, e algum tipo de destruição ou fixação tipo 3. A energia foi quantificada utilizando-se o programa SEDOP, que utiliza uma base de cálculo de 48,76 MJ por quilograma de peso para baterias de 3,7 V.

Na Figura 47 são mostrados vários tipos de baterias encontrados nos produtos analisados. O valor obtido para a bateria média é de 1,71 MJ, possuindo um *lifespan* de 2 anos no estado ótimo de performance.

Figura 47 - Exemplos de baterias encontradas nos produtos analisados



Fonte: Elaborada pelo autor

- Módulo 4 (Periféricos): Todos os produtos utilizados para a avaliação desta tese contam com uma série de acessórios comuns como câmeras, vibradores e componentes estruturais de corpo e proteção do equipamento. As câmeras são

consideradas um empacotamento de *chips* formado por lentes, sensor de imagens e processador de imagens. O motor é elétrico, e os componentes estruturais são uma composição de metais e polímeros variados como poliestireno, com uma preponderância do ponto de vista energético do uso do alumínio. O módulo de periféricos é especialmente importante por ser aquele sobre o qual estão montados todos os outros módulos, compondo a proteção estrutural do produto, e sendo o último a ser montado antes de ser encaminhado para o usuário. Na Figura 48 se observam diversos elementos, componentes do módulo de periféricos encontrados nos produtos. A energia embutida calculada para o módulo 4 (periféricos) corresponde a um valor de 22,4 MJ e um *lifespan* de 9 anos.

Figura 48 - Elementos periféricos e componentes do corpo do produto



Fonte: Elaborado pelo autor

- Módulo 5 (Carregador): Este módulo é definido em todas as listas de materiais fornecidas pela literatura. Antes de 2012 não havia uma unificação de entrada de energia para cada modelo de telefone. Sendo assim, uma grande quantidade de materiais era necessária para substituir o carregador, uma vez quebrado ou

perdido, pois este era imediatamente descartado com o produto assim que ocorresse a quebra. A partir do acordo da (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2009), os modelos foram unificados para *plug* USB composto por duas partes: o cabo e a entrada da tomada.

Esta possui um pequeno *Wafer*, conforme mostrado na Figura 49. A energia embutida calculada para esse módulo é de 8,6 MJ, com um *lifespan* de 3 anos.

Figura 49 - Elementos componentes do módulo carregador



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, os valores de energia ao longo do ciclo de vida são considerados nas etapas de montagem, transporte e uso do produto, as quais são mostradas a seguir.

- Montagem

Toda vez que o fabricante tenha manufaturado e adquirido os componentes do smartphone, realiza-se o processo de montagem. O valor acumulado da energia embutida nos componentes até o momento é de 411,74 MJ. Segundo os fabricantes, o custo energético da operação é de 11 MJ, e é somado ao valor da energia embutida, resultando na energia embutida acumulada de 422,74 MJ.

- Transporte

Como explicado por (DURAN, 2014) (DURAN, 2015), no caso do transporte de componentes e materiais, é difícil calcular a quantidade total dos mesmos. Um exemplo disso pode ser visto nas informações da Nokia apresentado para a União Europeia em 2005: “Como empresa globalizada, a Nokia possui parceiros em todo o mundo, pelo que um componente pode advir de múltiplos fornecedores”.

Porém, empresas como Nokia e Siemens (NOKIA, 2005) também disponibilizam informações sobre o investimento energético em transporte, considerando que o transporte primário consome um valor de 5% da energia total, e o transporte secundário 6%. Isso resulta em um total de 11% que, para o caso estudado, sobre o valor total calculado de 422,74 MJ, resulta em 46,5 MJ correspondente ao transporte, o que eleva a energia embutida no produto para 469,24 MJ.

- Uso

Equipamentos de comunicação são casos especiais quando analisados em relação ao consumo na fase de uso. O produto requer alimentação elétrica via recargas da bateria, advertindo-se que a energia necessária para a fabricação do produto é várias vezes maior do que a energia consumida pelo produto durante a sua vida útil.

Uma bateria de 3,7 V consumirá cada dia 9,8 kWh, pelo que por dia serão usados 0,035MJ. Isto significa que, durante a sua vida útil, a bateria consumirá aproximadamente 25 MJ, quantidade reduzida quando comparada com a energia embutida na fabricação (469,24 MJ). Porém, isto só se for desconsiderada a energia necessária para o funcionamento da rede de comunicações, tanto de voz como de dados. Segundo (MILLS, 2016), a energia média consumida anualmente pelo smartphone será de aproximadamente 1321 MJ, e isso significa que, anualmente, manter o estado de funcionamento do produto custa duas vezes a energia investida na sua fabricação.

A Figura 50 apresenta o consumo associado ao funcionamento e utilização das funções dos equipamentos analisados para um *mix* energético nos Estados Unidos. Pode-se salientar que, para cada Megajoule (MJ) utilizado pelo equipamento, foi necessário gerar dez vezes mais energia na fonte.

Figura 50 - Energia consumida durante a fase de uso dos produtos analisados.

| Aparelho | kW.h | | Tempo M uso dia | Dias | Tempo de uso | Energia cons. | OE Equiv. | OE Equiv. WO/SB |
|----------|--------|----------|--------------------|------|-----------------|------------------|--------------|--------------------|
| | Ativo | Stand by | Horas/dia | | Anos | Mj | USA | |
| Produto | 9,80 | 0,00 | 24 | 365 | 2 | 25 | 250 | 0,00 |
| | 517,83 | 0,00 | 24 | 365 | 2 | 1321 | 13210 | 0,00 |
| | | | | | | 1346 | 1346 | |

Fonte: Elaborado pelo autor

Trabalhos anteriores consideram dois cenários para análise: (a) o estudo do LCA do produto como sistema isolado, que considera somente a energia necessária para a utilização, ou (b) como sistema integrado que considera a energia necessária para o desempenho das suas funções, significando a adição da energia utilizada nas redes associadas.

- Recuperação

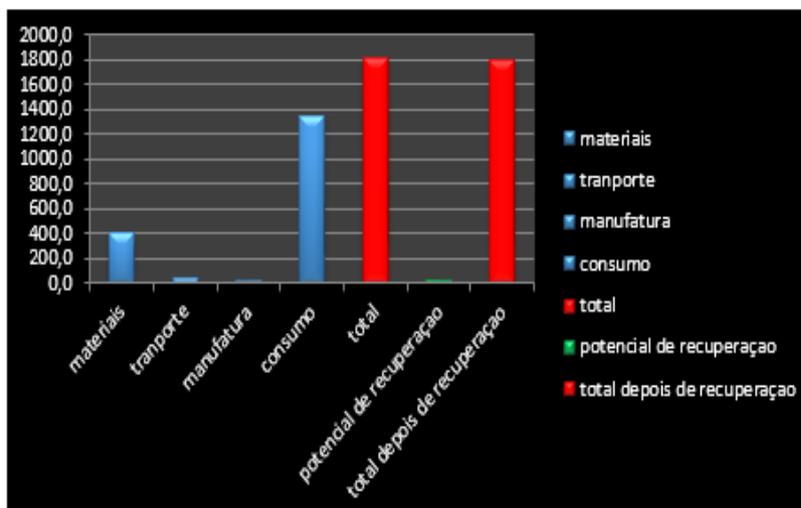
Utilizando-se as bases de dados fornecidas por trabalhos acadêmicos como (ASHBY, 2012) (DURAN, 2014) e (SINGH *et al*, 2012), obtém-se a quantidade de materiais de valor contidos no produto. Por meio do programa SEDOP-GRIMA quantificou-se a energia recuperável como sendo igual a 10,22 MJ.

4.2.2 Ecoauditoria

A ecoauditoria já contém todos os elementos para ser formulada, sendo mostrada na Figura 51(a) considerando-se a energia necessária para funcionamento e uso, enquanto na Figura 52(b) desconsidera-se a energia embutida no uso.

Figura 51 – Resultados de ecoauditoria incluindo a fase de uso

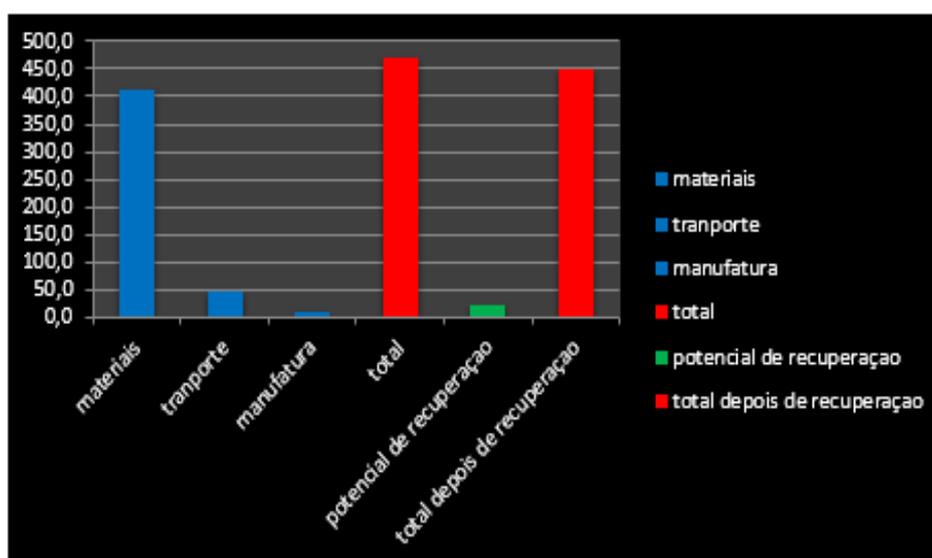
| | |
|---------------------------|---------|
| Materiais | 411,74 |
| Transporte | 47,29 |
| Manufatura | 11 |
| Uso | 1321 |
| Total | 1790,29 |
| Potencial de recuperação | 10,22 |
| Total após de recuperação | 1780,29 |



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 52 – Resultados de ecoauditoria desconsiderando a fase de uso

| | |
|---------------------------|-----------|
| Materiais | 411,74 |
| Transporte | 47,29 |
| Manufatura | 11 |
| Total | 469,29,29 |
| Potencial de recuperação | 10,22 |
| Total após de recuperação | 459,29 |



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 CARATERIZAÇÃO DO PRODUTO

Completada a elaboração da ecoauditoria, finaliza-se a segunda etapa metodologia, tendo como saídas até o momento o mapeamento de granulação do produto, a limitação do escopo de impacto, e a quantificação da energia embutida nas etapas do LCA do produto.

Seguindo com a metodologia, requer-se a concatenação das informações obtidas até o momento como saídas das primeiras duas fases para construir o *kanban* KIM e KLP. Deve-se lembrar que nos módulos 2 e 3 se apresentam as *features* que diferenciam os modelos 1 e 2, pelo que são mostrados na Figura 53 como diferenciados no tipo de fixações e separação do *Wafer* em duas partes.

Figura 53 - Elaboração dos KIM completos para cada módulo

| | | | |
|--|---|--|---|
| (a) Módulo 1 | | (b) Módulo 2 | |
| Módulo | M(1) Display | Módulo | M(2) Board |
| Componentes | M1C1, M1C11, M1C12 | Componentes No modelo 1 os seis elementos estão agrupados. No modelo 2 estão divididos em 2 Wafer | M1C1, M1C11, M2C21, (M2C31, M2C32, M2C33, M2C34, M2C34, M2C36) |
| Energia Embutida | 15 Mj | Energia Embutida | 364 Mj |
| <i>Lifespan</i> | 9 anos | <i>Lifespan</i> | 3 anos |
| Fixações externas | 0  1  0  | Fixações externas no modelo 1 apresenta 2 fixações tipo 3, no modelo 2, apenas 1 tipo 3 | 1  0  1/2  |
| Fixações internas | 0  0  1  | Fixações internas No modelo 2 existe duas fixações internas tipo 3 | 0  1  0  |
| Nível de montagem | 3 | Nível de montagem | 3 |
| (c) Módulo 3 | | (d) Módulo 4 | |
| Módulo | M(3) Bateria | Módulo | M(4) Corpo |
| Componentes | M3C1 | Componentes | M4C1, M4C11, M4C12 |
| Energia Embutida | 1,74 Mj | Energia Embutida | 22,4 Mj |
| <i>Lifespan</i> | 2 anos | <i>Lifespan</i> | 9 anos |
| Fixações externas no modelos 1 será 1 tipo 3 e no modelo 2, 1 tipo 2 | 0  1  1  | Fixações externas | 0  1  0  |
| Fixações internas | 0  0  0  | Fixações internas | 0  0  1  |
| Nível de montagem | 3 | Nível de montagem | 2 |
| (e) Módulo 5 | | | |
| Módulo | M(5) Carregador | | |
| Componentes | M5, M5C1, M5C2 | | |
| Energia Embutida | 8,6 Mj | | |
| <i>Lifespan</i> | 3 anos | | |
| Fixações externas | 0  | 1  | 0  |
| Fixações internas | 0  | 0  | 1  |
| Nível de montagem | 3 | | |

Fonte: Elaborado pelo autor

Utilizando-se a informação dos tempos de vida (*lifespan*) para cada módulo, é elaborado o KLP requerido para continuar com a elaboração da metodologia. O KLP é apresentado na Figura 54.

Figura 54 - KLP e os índices de fixadores do produto (modelos 1 e 2)

Modelo 1

| Módulo | <i>Lifespan</i> do módulo | <i>Lifespan</i> do produto | Diferença |
|-----------|---------------------------|----------------------------|---------------|
| M1 | 9 anos | 3 anos | 7 anos |
| M2 | 3 anos | 1 ano | 1 anos |
| M3 | 2 anos | LLS* | 0 anos |
| M4 | 9 anos | 3 anos | 7 anos |
| M5 | 3 anos | 3 anos | 1 anos |

Modelo 2

| Módulo | <i>Lifespan</i> do módulo | <i>Lifespan</i> do produto | Diferença |
|-----------|---------------------------|----------------------------|---------------|
| M1 | 9 anos | 2 anos | 7 anos |
| M2 | 3 anos | 2 anos | 1 anos |
| M3 | 2 anos | LLS* | 0 anos |
| M4 | 9 anos | 2 anos | 7 anos |
| M5 | 3 anos | 2 anos | 1 anos |

Fonte: Elaborado pelo autor

Uma das informações mais importantes obtidas no KLP é a identificação do LLS* que, no modelo 1, será o módulo 3 (bateria) e no modelo 2 será o módulo 2 (*Board*).

Para a elaboração do mapa de precedências, passa-se a construir as matrizes de nível e precedências levando-se em consideração as três premissas de construção aplicadas ao conjunto sistema de produto (SP) composto por todos os elementos do produto:

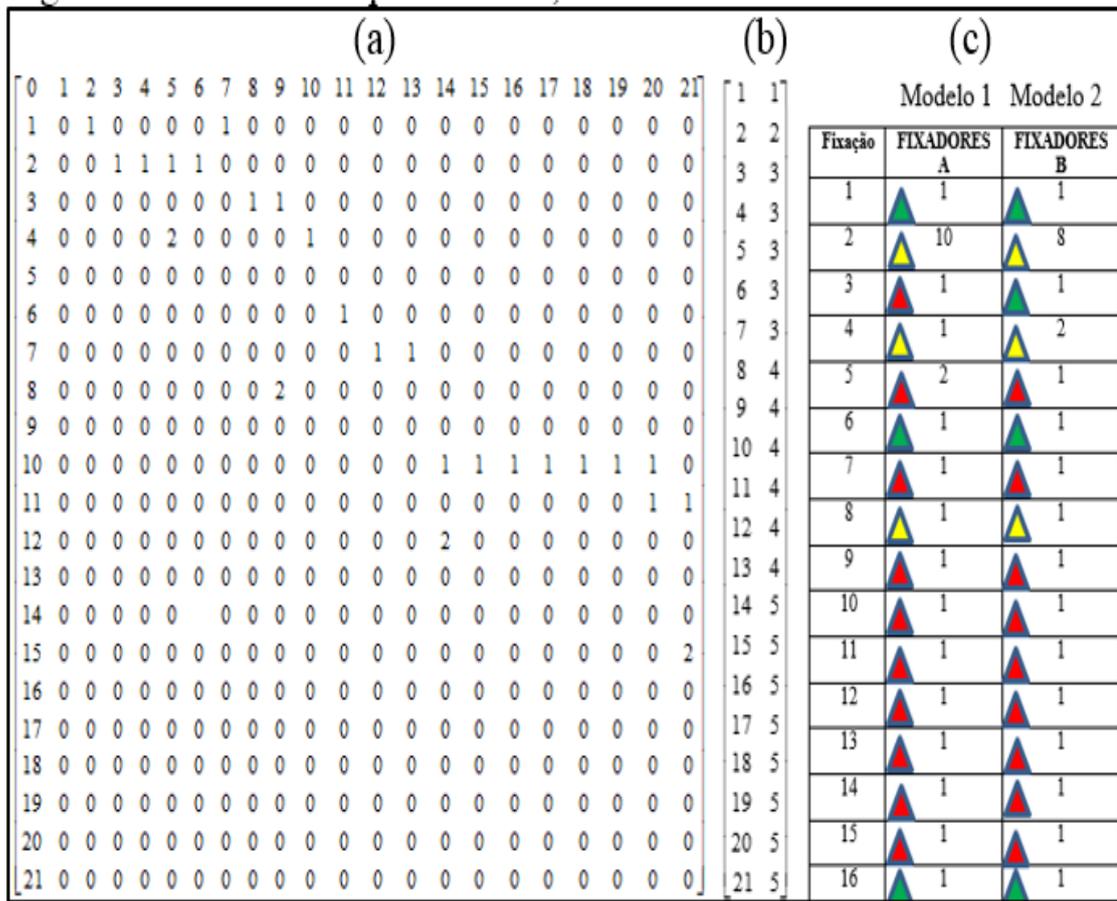
SP: (P, M1, M2, M3, M4, M5, M1C1, M1C2, M2C1, M4C1, M5C1, M5C2, M4C11, M2C11, M2C12, M2C13, M2C14, M2C15, M2C16, M4C111, M4C112).

As duas matrizes mostradas na formulação da metodologia são integradas em uma única que permite observar as duas condições, sendo (0) para dependência negativa, (1) para positiva e (2) para dependência no mesmo nível de granulação.

Na Figura 55 se observa o resultado das matrizes de precedência (a), e de nível (b) para o sistema SP. Também da lista de fixadores segundo o tipo (c) para os dois grupos de

modelos analizados.

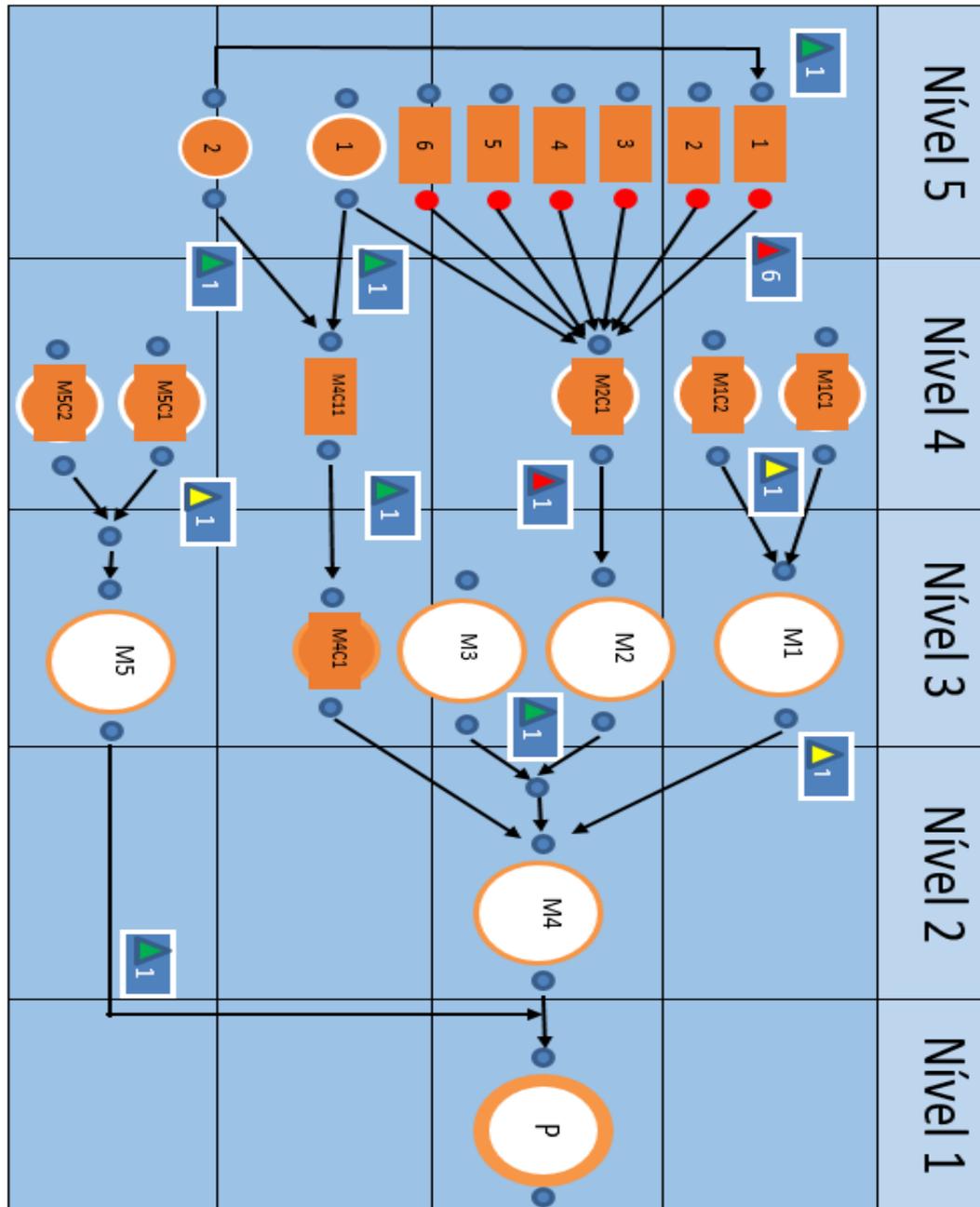
Figura 55 - Matriz de precedência, matriz de nível e lista de fixadores



Fonte: Elaborado pelo autor

Mediante o uso das informações obtidas pode-se construir o mapa de precedências. Durante a formulação da metodologia a inclusão das fixações no mapa foi adiada até o momento da análise de falha por não ter-se informações *in situ* referentes ao produto. Porém, uma vez que a avaliação é realizada com produtos que fornecem dados primários, pode-se preencher aquelas informações no mapa. Na Figura 56 se observa o resultado da última saída da caracterização do produto para o modelo 1.

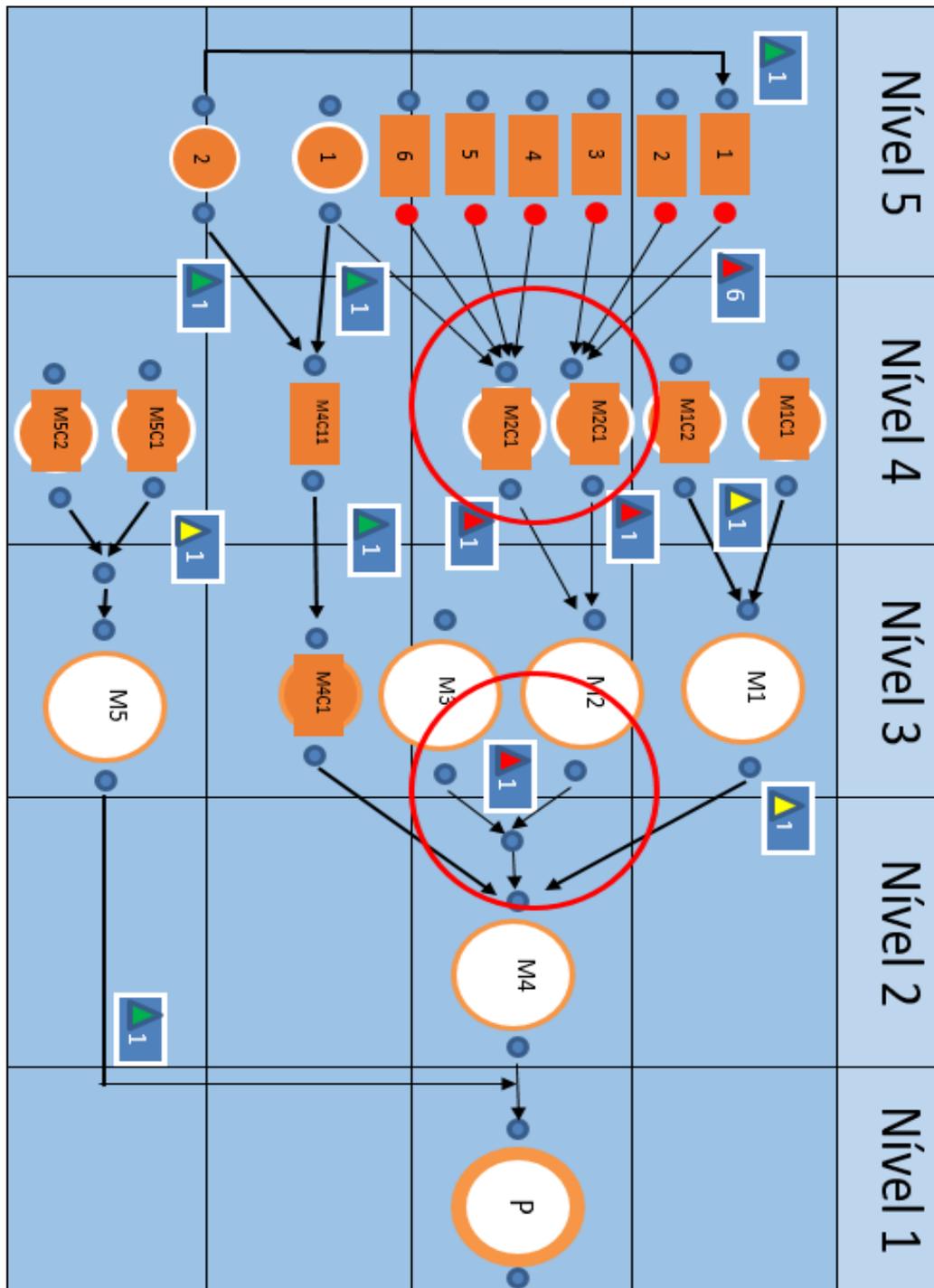
Figura 56 - Mapa de precedências do produto modelo 1



Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir observa-se a Figura 57, na qual são destacados os círculos vermelhos, que representam as diferenças nas configurações dos dois tipos de modelos: o modelo 2 possui dois elementos precedentes ao módulo M2, separando em dois *Wafers* os elementos funcionais microeletrônicos, mesmo havendo uma fixação tipo 3 entre os módulos M2 e M3, que impede a sua separação sem danificá-los. Essas diferenças modificaram os cálculos da energia descartada, e isto será observado posteriormente.

Figura 57 - Mapa de precedências do produto modelo 2



Fonte: Elaborado pelo autor

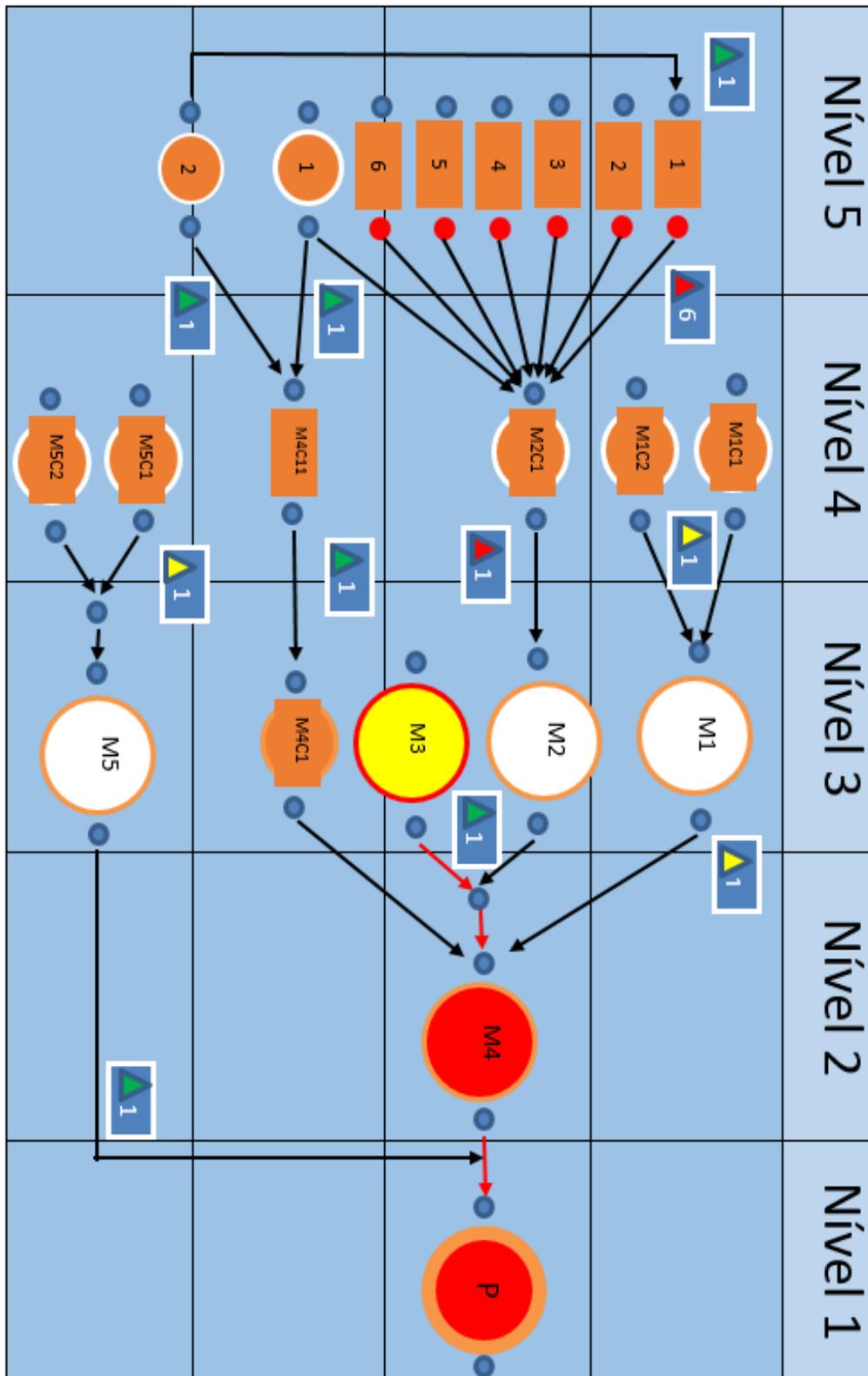
4.4 ANÁLISE DE FALHA CONSEQUENTE DA OBSOLESCÊNCIA

Segundo o KLP, o *Lower lifespan* para o modelo 1 é o módulo 3 (bateria) com um tempo de vida útil de 2 anos em funcionamento desejado. Isto significa que ele será o responsável pela entrada no estado de falha no produto quando transcorridos os 24 meses para os quais foi projetado.

Quando analisado, se observa que esse tipo de fixação permite a substituição do elemento, fazendo que, ainda sendo o módulo com o menor tempo de vida do produto, a sua falha não será crítica para a energia descartada. Na Figura 58 observa-se o mapa de precedências para o momento de falha do modelo 1 e, como o módulo 3 (em amarelo) possui uma fixação tipo 1, o novo LLS deve ser considerado como o elemento seguinte que atingirá o final da vida útil sendo não substituível.

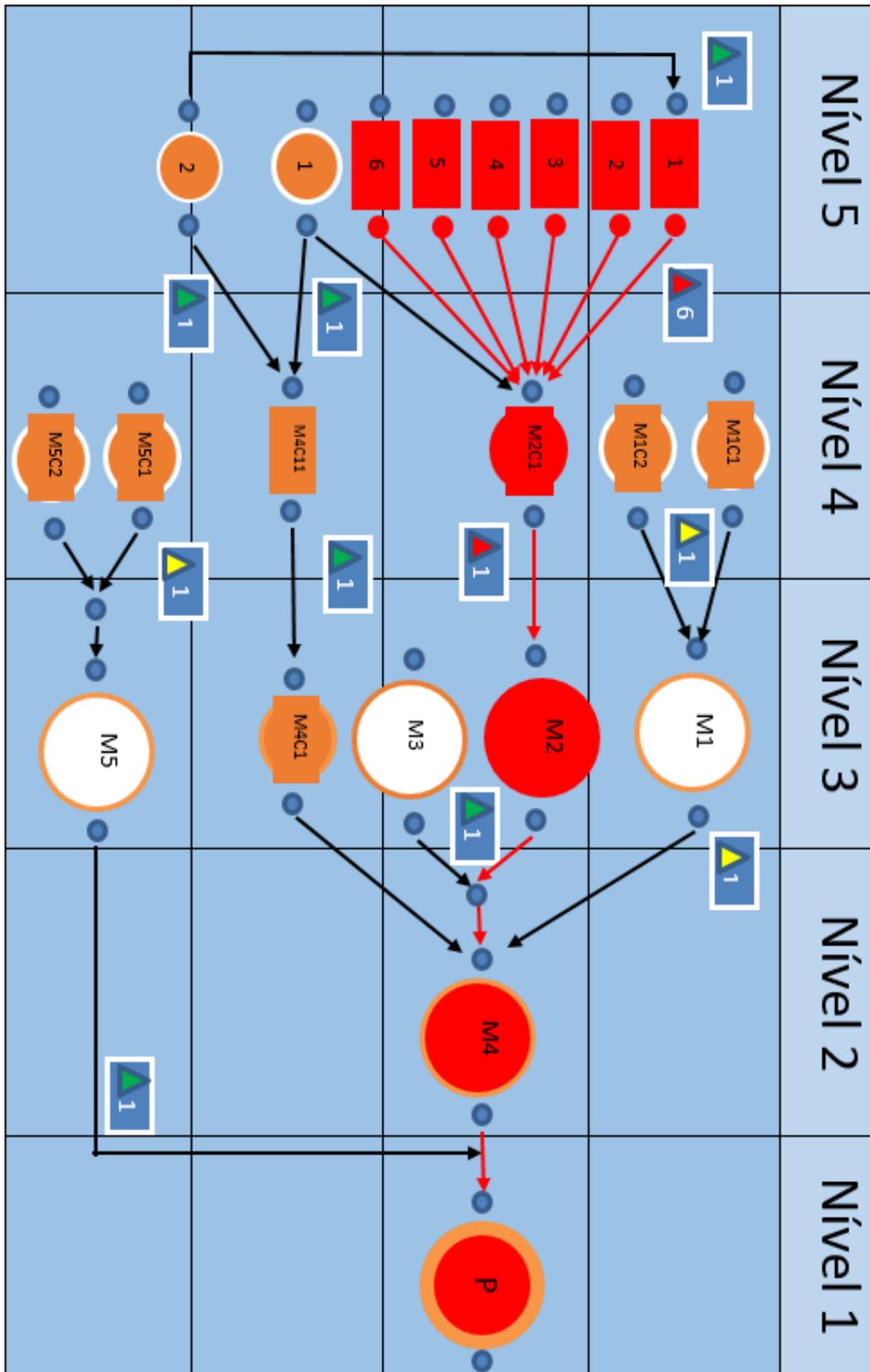
De acordo com o KLP, o próximo elemento a atingir o final da vida útil é o módulo 2 (*Board*), o qual é considerado o real LLS do produto para o modelo 1. Na Figura 59 se observa a mudança nos elementos atingidos pela falha quando recalculado o LLS do produto para o modelo 1.

Figura 58 - Momento de falha segundo o lifespan para o modelo 1



Fonte: Elaborado pelo Autor

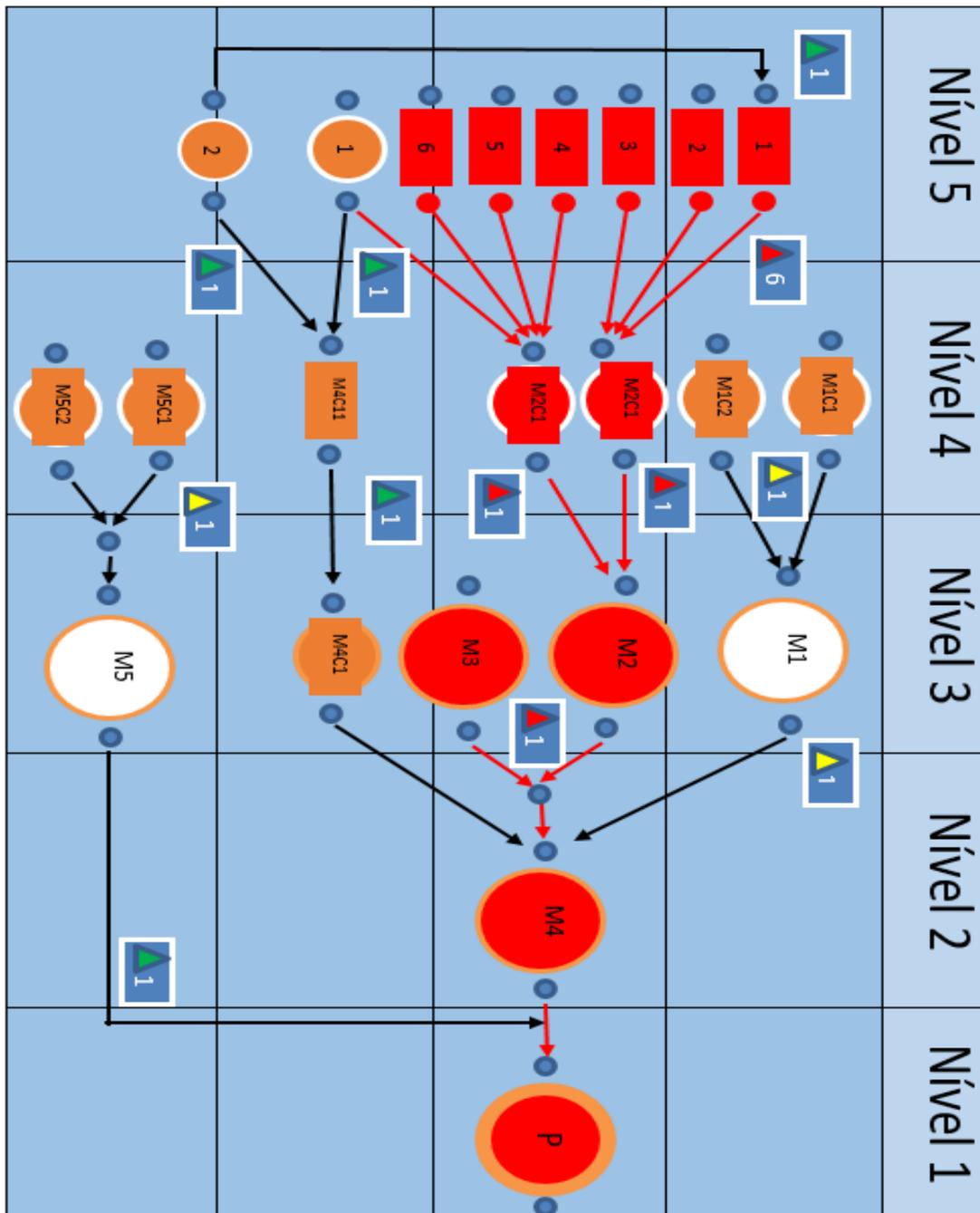
Figura 59 Elementos atingidos pela falha *segundo* o LLS no módulo 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o modelo 2 o LLS é M3 novamente mas, pelo tipo de fixação tipo 3, a entrada no estado de falha causado pela chegada ao final da vida útil da bateria afetará imediatamente o módulo 2 e todos os elementos que o compõem. Na Figura 60 se observa o grupo de peças ou elementos que irão requerer substituição devido a esta falha.

Figura 60 - Elementos comprometidos pela falha no elemento M3



Fonte: Elaborado pelo autor

Seguindo a nomenclatura bayesiana, as falhas apresentadas nos dois modelos obedecem a:

$$\text{Falha modelo 1} = [(1,2,3,4,5,6)|M2C1, M2C1|M2, M2C2|M2, M2|M2, M4|M2, P|M4]$$

$$\text{Falha modelo 2} = [(1,2,3) |M2C1, (4,5,6) |M2C2, M2C1|M2, M2C2|M2, \mathbf{M2|M3, M3}, M4, P]$$

Observa-se que a diferença entre os dois modelos encontra-se ressaltada em negrito, onde pode-se notar que a falha no módulo 2 é M2 dado M3. Isto significa que ele ainda não atingiu o seu tempo de vida útil, sendo desnecessária a sua substituição.

4.5 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA EMBUTIDA RELATIVA E ENERGIA RECUPERADA E ENERGIA DESCARTADA

Como explicado na formulação da metodologia, o passo seguinte é quantificar os valores para as três variáveis requeridas. A energia relativa por módulo no momento da falha é calculada na Tabela 23 para os dois tipos de modelos analisados:

| Modelo 1 | Modelo 2 |
|--|---|
| $EERM1 = \frac{15}{9}(9 - 3) = 10 \text{ MJ}$ | $EERM1 = \frac{15}{9}(9 - 2) = 11,6$ |
| $EERM2 = \frac{364}{3}(3 - 3) = 0$ | $EERM2 = \frac{364}{3}(3 - 2) = 121,3$ |
| $EERM3 = \frac{1,74}{2}(2 - 1) = 0,87 \text{ MJ}$ | $EERM3 = \frac{1,74}{2}(2 - 2) = 0$ |
| $EERM4 = \frac{22,4}{9}(9 - 3) = 14,93 \text{ MJ}$ | $EERM4 = \frac{22,4}{9}(9 - 2) = 17,42$ |
| $EERM5 = \frac{8,6}{3}(3 - 3) = 0$ | $EERM5 = \frac{8,6}{3}(3 - 2) = 2,87$ |
| EER Total= 25,8 MJ | EER Total= 153,19 |

Tabela 23 - Cálculo da EER para os modelos 1 e 2

Fonte. Elaborada pelo autor

4.5.1 Energia descartada

No modelo 1 a energia descartada desnecessariamente é igual a 0 (zero) MJ, uma vez que, no momento da entrada no estado de falha, o módulo não resulta na substituição de nenhum outro módulo que esteja ainda em fase de vida útil (Figura 60). No entanto, no módulo 2 a energia descartada é de 121,3 MJ, dado que a entrada em estado de pane do módulo 3 compromete a integridade do módulo 2, tendo em vista o tipo de fixação mostrado no mapa de precedências da Figura 60.

4.5.2 **Energia relativa**

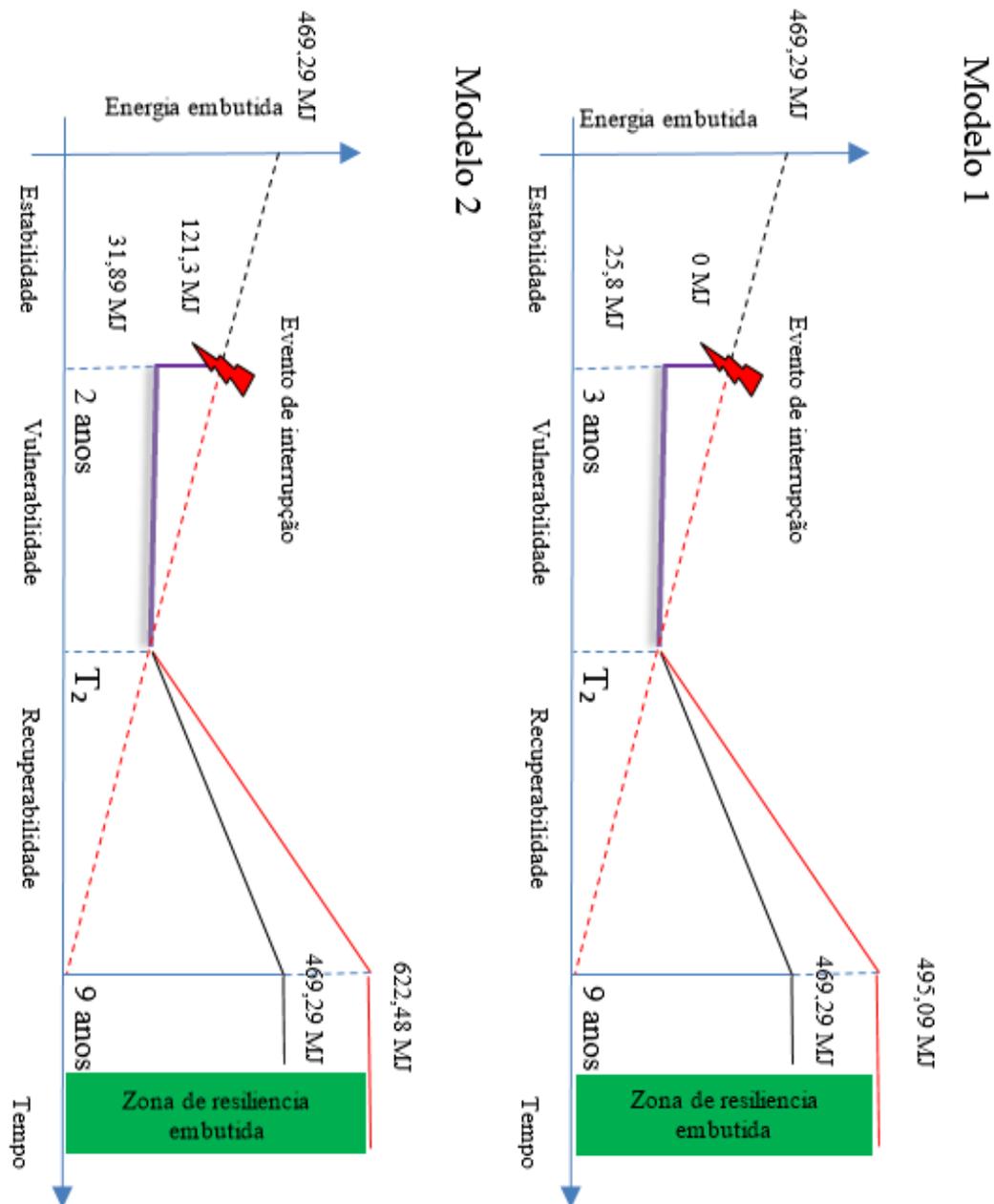
Observando-se os cálculos feitos para o modelo 1, se observa que a EER total é de 25,8 MJ, dado que, no momento da falha, o módulo 2 possui a maior quantidade de energia embutida, permitindo que apenas 16,84% do total de energia relativa esteja disponível no momento de atingir o final da vida útil causado pela falha do LLS. Comparando com o modelo 2, a EER possui um valor de 121,3 MJ, correspondente ao M2.

4.5.3 **Energia armazenada**

Finalmente, com os dados obtidos na ecoauditoria, determina-se o valor da energia que pode ser recuperada nos materiais, que corresponde a 10,22 MJ.

Obtidos os valores da EER, EED e ER, a etapa seguinte é a construção dos mapas de resiliência embutida no produto para os dois modelos de produto analisados. Na Figura 61 pode-se observar a definição do teto da zona de resiliência para cada um.

Figura 61 Resiliência embutida no produto



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.4 Cálculo do índice de descarte (ID)

Explicada na formulação da metodologia, a proposta do ID visa quantificar os recursos descartados desnecessariamente por meio da relação entre o tempo de vida ainda presente em alguns elementos do produto e as escolhas de projeto. O resultado é um quociente que expressa a quantidade de ciclos de vida completos um fabricante terá manufaturado um produto completo a mais do requerido pelo cliente.

As equações para a quantificação do indicador ID requerem dados sobre a produção média anual mundial de smartphones, os quais foram obtidos de (ELLIOTT, 2017) para o período 2012-2016. Os cálculos são mostrados a seguir.

Modelo 1:

$$ID = \frac{25,8 + 0}{469,29} 1,5 * 10^9 \quad (7)$$

No caso do modelo 1, o valor para o indicador ID será de 0,05 vezes 1,5 bilhões. Isto significa 82.465.000 produtos descartados desnecessariamente, o que corresponde a um valor de energia embutida de 38.700 Terajoules.

Para o modelo 2 os valores do ID são mostrados na Equação (8).

Modelo 2:

$$ID = \frac{121,3 + 31,89}{469,29} 1,5 * 10^9 \quad (8)$$

No caso do modelo 2, o valor para o indicador ID será igual a 0,32 vezes 1,5 bilhões de produtos fabricados, o que representa um valor de 489.643.930 produtos descartados desnecessariamente. Isto corresponde a um valor de energia embutida de 225.422 Terajoules.

Para dimensionar os valores, segundo (RAMESH, 2010), a energia embutida por metro quadrado na construção de um prédio mediano corresponde a 1800 MJ. Considerando que o prédio mais alto do mundo, o Burj Khalifah (localizado em Dubai, Emirados Árabes), conta com uma área construída de 334.000 m², significa que a energia embutida na construção do prédio foi de 601 Terajoules. O índice de descarte do produto do modelo 2 equivale a descartar aproximadamente 70 prédios Burj Khalifah ao ano (considerando a área construída, não os acabamentos ou dificuldade da construção).

Como exemplificado na formulação da metodologia, o índice de descarte permite realizar aproximações econômicas dos impactos do descarte. Considerando-se o valor médio de um smartphone no ano 2018 como 300 dólares, o índice de descarte econômico é calculado da seguinte maneira:

$$ID \text{ Valor de mercado} = 489.643.930 \text{ (300USD/unidade)}$$

$$ID \text{ Valor de mercado} = 146 \text{ bilhões de dolares}$$

O descarte desnecessário ocasionado pelas escolhas de projeto no desenvolvimento do modelo 2 analisado nesta tese, resultaria no gasto extremamente elevado de 146 bilhões de dólares por ano.

4.5.5 Cálculo da REP

O cálculo da resiliência é realizado levando-se à zona de resiliência os custos das opções a seguir, e que são analisadas durante a fase de vulnerabilidade. Os valores da EER, EED e são obtidos da Tabela 22 (cálculo da EER para os modelos 1 e 2).

A resiliência do produto para cada cenário é obtida adicionando-se o valor da EESub à EED e subtraindo a EER caso tenha sido aproveitada na repotenciação de outro equipamento.

Caso A. Retorno do sistema ao estado de “tão bom quanto novo”

Tabela 24 Custos energéticos caso A. modelo 1

| EE Total | EED | EER | EESub | Novo LLS |
|----------|-----|------|----------|----------|
| 469,29 | 0 | 25,8 | 372,63+X | 3 |

Fonte. Elaborada pelo autor

Retornar o sistema ao estado de tão bom quanto novo para o modelo 1 requer a desmontagem dos elementos do *Wafer*. Segundo (YAMANE *et al*, 2011), a separação dos *chips* pode incluir as operações de moagem, separação magnética, separação por tamanho, classificação por ar, separação por densidade e separação eletrostática. Nesse contexto, considera-se que os custos energéticos da substituição (referidos como “X” na tabela) serão muito elevados.

(XIANG *et al*, 2007) explica que o custo dos processos irá depender da capacidade do centro de reciclagem e da logística reversa instalada para transportar os materiais recuperados até os novos pontos de fabricação. Também poder-se-á requerer a substituição do módulo 5, caso ele atinja o seu tempo de vida útil no mesmo tempo que o módulo 2. Para o seu retorno

ao sistema ele também deverá ser substituído, adicionando-se 8,6 MJ ao valor da EESub, daí o valor da energia embutida na substituição. Assim, a REP do cenário A é igual a $372,63+X$ MJ

Tabela 25 Custos energéticos caso A. modelo 2

| EE Total | EED | EER | EESub | Novo LLS |
|----------|-------|-------|--------|----------|
| 469,29 | 121,3 | 31,89 | 365,74 | 1 |

Fonte. Elaborada pelo autor

Para o retorno do modelo 2 “tão bom quanto novo”, é necessária a substituição do módulo 3 (1,74 MJ), que ocasiona a falha também do módulo 2 (364 MJ), pois ele está fixado a ele. O novo LLS será de 1 ano até entrar de novo no estado de falha. O valor da REP será 487 MJ.

Caso B. Descartar o módulo que falhou e substituí-lo

Tabela 26 Custos energéticos caso B. modelo 1

| EE Total | | EED | EER | EESub | Novo LLS |
|----------|--|-----|------|--------|----------|
| 469,29 | | 0 | 25,8 | 372,63 | 3 |

Fonte. Elaborada pelo autor

Dado que o elemento que falha é o módulo integral (caixa preta), não podendo contemplar a substituição de uma peça, a substituição desse módulo requer a mesma energia que continha quando novo (364 MJ), mesmo ocorrendo a substituição do módulo 5 por atingir a sua vida útil. O valor da REP será igual a 377,6 MJ.

Tabela 27 Custos energéticos caso B. modelo 2

| EE Total | EED | EER | EESub | Novo LLS |
|----------|-------|-------|--------|----------|
| 469,29 | 121,3 | 31,89 | 365,74 | 1 |

Fonte. Elaborada pelo autor

A substituição do módulo 3 (1,74 MJ) devido ao tipo de fixação, requer também a substituição do módulo 2 (364 MJ), ocasionando um descarte de energia por encontrar-se ainda em fase de vida útil (121,3 MJ). O novo *lifespan* do produto será de 1 ano,

correspondente ao novo LLS fornecido pelo módulo 5. O valor da REP será igual a 487,04 MJ.

C. Manter em funcionamento

Tabela 28 Custos energéticos caso C. modelo 1

| EE Total | EED | EER | EESub | Novo LLS |
|----------|-----|---------|-------|----------|
| 469,29 | 0 | 25,8 MJ | 0 | 7 anos |

Fonte. Elaborada pelo autor

Manter o produto em funcionamento é a opção quando as funções prestadas pelo equipamento ainda satisfazem as exigências do usuário. Para esse caso se considera uma reavaliação quando o produto entrar de novo no estado de falha. A REP é igual a 25,8 MJ.

Tabela 29 Custos energéticos caso C. modelo 2

| EE Total | EED | EER | EESub | Novo LLS |
|----------|-------|-------|--------|----------|
| 469,29 | 121,3 | 31,89 | 469,29 | 0 |

Fonte. Elaborada pelo autor

Considerando-se que o módulo 3 que causa a falha é a bateria, o produto encontra-se incapacitado para prestar função alguma. Nesse caso, considera-se um cenário igual ao descarte do produto. A REP gerada é igual a $EED+EER+EE2 = 622,0$ MJ

D. Descartar o módulo que falhou e reutilizar os componentes

Tabela 30 Custos energéticos caso D. modelo 1

| EE Total | EED | EER | EESub | Novo LLS |
|----------|-----|------|--------|----------|
| 469,29 | 0 | 25,8 | 469,29 | 1 |

Fonte. Elaborada pelo autor

A reutilização dos elementos ainda úteis irá salvar a EER para repotenciar outros equipamentos, pelo que será negativa na hora de quantificar a REP. Porém, a substituição do

equipamento por um novo resultará em um valor de EE2 igual a 469,29 MJ. Subtraindo-se o valor da EER se calcula um valor de REP igual a 443,5 MJ.

Tabela 31 Custos energéticos caso D. modelo 2

| EE Total | EED | EER | EESub | Novo LLS |
|----------|-------|-------|--------|----------|
| 469,29 | 121,3 | 31,89 | 469,29 | 3 |

Fonte. Elaborada pelo autor

Substituir o equipamento completo agrega 469,29 MJ ao valor da EESub, e o descarte do módulo 2 representa 121,3 MJ. A energia relativa correspondente aos elementos na repotenciação de outros equipamentos será subtraída, sendo negativa nos cálculos da REP, com um valor de 31,89 MJ. Porém, diferentemente do modelo 1, o novo LLS será de 3 anos tanto para os equipamentos repotenciados quanto para o novo produto adquirido. O valor da REP é igual a 558,7 MJ.

E. Reuso de materiais

Tabela 32 Custos energéticos caso E. modelos 1 e 2

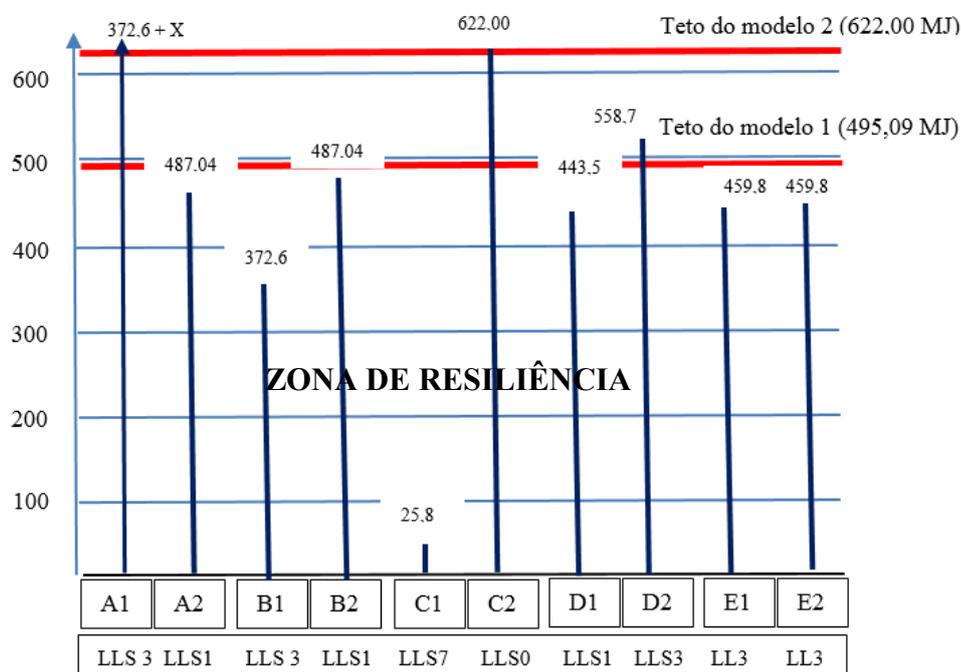
| EE Total | EED | ER | EESub | Novo LLS |
|----------|-----|-------|--------|----------|
| 469,29 | 0 | 10,22 | 469,29 | 3 |

Fonte. Elaborada pelo autor

Recuperar os materiais contidos no equipamento evitará que sejam minerados novamente, pelo que a energia recuperada ER há de ser subtraída do valor da aquisição do novo equipamento para substituição com valor 469,29 MJ. O resultado da REP é igual a 459,8 MJ

Obtidos os valores da REP para cada caso, são comparadas na zona de resiliência com o intuito de identificar qual seria a melhor escolha a seguir e, assim, finalizar o estado de vulnerabilidade. O teto da zona de resiliência é igual a 495,09 MJ para o modelo 1, e 622 MJ para o modelo 2. Na Figura 62 se observa a comparação das REP para cada um dos cenários de ação para o produto no final da sua vida útil.

Figura 62 - Recuperabilidade v.s. Tempo



Fonte: Elaborado pelo autor

A ordem da capacidade para retornar os modelos 1 e 2 ao sistema de ciclo de vida é mostrado abaixo, e uma análise deles será feita na próxima subseção.

REP Modelo 1= [C1 LLS7, B1 LLS3, D1 LLS1, E1 LLS3, A1 LLS3]

REP Modelo 2= [A2 LLS1, B2 LLS1, E2 LLS3, D2 LLS3, C2 LLS0]

4.6 ANÁLISES DE RESULTADOS DA AVALIAÇÃO

Os resultados obtidos para a avaliação da REP dos dois modelos analisados são apresentados a seguir:

Modelo 1 Produto: Smartphone

Categoria de impacto: Energia descartada

Fator de caracterização: Capacidade de retorno do sistema ao estado de funcionamento

Resiliência embutida no produto: REP= [C1 LLS7, B1 LLS3, D1 LLS1, E1 LLS3, A1 LLS3].

Classificação das ações a serem tomadas:

- Manter o produto sem substituições;
- Substituir o módulo ao qual pertence o elemento que apresentou a falha;
- Descartar o módulo que apresentou a falha e utilizar os elementos restantes na repotenciação de outros produtos;
- Resgatar a energia embutida nos materiais do equipamento mediante reciclagem, e substituí-lo;
- Substituir o elemento que entrou em estado de falha e retornar o equipamento ao estado de tão bom quanto novo.

Novo *Lower lifespan*: 7 anos

Recomendação: Dado que a primeira recomendação é a não substituição de elementos, recomenda-se verificar se o equipamento encontra-se na capacidade de entregar a função para o usuário. Caso contrário, sugere-se passar a seguinte recomendação na lista, substituindo-se o módulo ao qual pertence o elemento que apresentou a falha.

Índice de descarte (ID): 5% por produto.

Modelo 2 Produto: Smartphone

Categoria de impacto: Energia descartada

Fator de caracterização: Capacidade de retorno do sistema ao estado de funcionamento

Resiliência embutida no produto: [A2 LLS1, B2 LLS1, E2 LLS3, D2 LLS3, C2 LLS0]

Classificação das ações a serem tomadas:

- Substituir o elemento que entrou em estado de falha e retornar o equipamento ao estado de tão bom quanto novo;
- Substituir o módulo ao qual pertence o elemento que apresentou a falha;
- Resgatar a energia embutida nos materiais do equipamento mediante reciclagem, e substituí-lo;
- Descartar o módulo que apresentou a falha e utilizar os elementos restantes na repotenciação de outros produtos;
- Manter o produto sem substituições.

Novo *Lower lifespan*: 1 ano

Recomendação: Pelo visto durante a análise do produto, o tipo de fixação que afeta o elemento que possui o LLS, a quantidade de energia embutida descartada em cada ciclo de vida torna o produto pouco sustentável quando comparado com o modelo 1.

Índice de descarte (ID): 32% por produto.

4.7 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A avaliação do método mostra que é necessário analisar equipamentos que não tenha sofrido deformação dos fixadores no processo de falha, o que permite a desmontagem projetada pelo fabricante, caso contrário as consequências do processo que leva ao estado de interrupção da função requeria de ferramentas e atividades específicas para cada caso.

Dos resultados obtidos na avaliação da metodologia, o objetivo geral da tese é respondido desta forma: pode-se calcular a capacidade de um produto para ser retornado ao ciclo de vida com base na utilização de indicadores de impacto. Verifica-se que a variação no planejamento e execução do projeto para o desenvolvimento de um produto irá afetar a quantidade de energia requerida na desmontagem, manutenção e reparação do produto.

Os resultados conseguidos evidenciam a ordem em que devem ser considerados os tipos de descarte para o produto desde o viés da energia requerida para tal fim.

Evidenciou-se que, ainda que considerando-se uma mesma família de produtos (smartphones), pequenas variações mudam significativamente a decisão que minimiza a energia requerida.

A resposta à pergunta “é sempre a reciclagem a melhor opção para o descarte de um produto?” pode ser respondida em parte sabendo-se que, dependendo da estrutura, distribuição e processos utilizados na fabricação de um produto, a reciclagem poderá não ser adequada.

Um resultado adjacente conseguido através da formulação metodológica é a definição do índice de descarte, o qual permitiu o cálculo do potencial descarte desnecessário de um recurso desde o momento mesmo da sua conceitualização.

Através dos resultados conseguidos, é possível ver como o pior cenário é definido pelo descarte da energia embutida em peças que ainda se encontra em fase de uso, tanto causado pela errada distribuição dos componentes e fixadores quanto daqueles descartados pela dificuldade para reparar o equipamento e levá-lo ao estado de tão bom quanto novo.

O chamado teto de obsolescência varia em função da pior decisão possível a ser tomada

Finalmente, é necessário entender que a categoria de impacto analisada precisa ser escolhida em função do interesse pelo recurso a ser avaliado, pelo que a criticidade nos resultados obedece a importância daquele recurso no entorno.

4.8 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS POR OUTROS AUTORES

Trabalhos acadêmicos como o desenvolvido por (GRIMAUD, 2018) concluíram que, atualmente, mesmo havendo vários tipos de processos de recuperação de materiais (por exemplo, reciclagem), os interesses econômicos se impõem na escolha da destinação dos produtos após o descarte. Diante desse cenário, sugere-se a criação de uma base de dados comum que permita integrar informações a respeito dos diferentes tipos de impacto gerados pelos produtos durante a sua vida útil.

Como resposta à proposta de (GRIMAUD, 2018), a presente tese propõe uma metodologia que permite expressar o impacto de diferentes tipos de indicadores de LCA, padronizando a resposta da análise considerando-se o conceito de capacidade do produto para retornar ao sistema de ciclo de vida (REP), a qual pode ser utilizada para tal fim.

Por outro lado, (CAMOCHO, 2018) apresenta soluções para a necessidade da criação de processos controlados na fase de projeto de produto com o intuito de favorecer uma transição entre a economia tradicional e a economia circular por meio da recuperação otimizada de materiais. O presente trabalho conclui que, além da reciclagem, existem diversos cenários de destino para um produto quando atinge-se o final da vida útil, os quais podem ser mais sustentáveis que a reciclagem.

Considerando a necessidade de reduzir os recursos utilizados na desmontagem de equipamentos eletrônicos, (PEETERS et al, 2016) propõe ferramentas para otimizar o tempo nos processos de recuperação de lixo eletrônico, concluindo que para alguns modelos um processo de desmontagem padronizado pode ser inútil de acordo as especificações técnicas do mesmo. Mediante a avaliação desta tese, o autor conclui que a ineficiência dos processos de tratamento de produtos descartados pode ser determinada usando-se valores quantitativos, permitindo decidir a melhor destinação para o produto em função do impacto gerado no processo de retorno do produto ao ciclo de vida.

Por meio da revisão bibliográfica realizada, não foram encontrados trabalhos que integrassem LCA, obsolescência, indicadores de recurso descartado e indicadores para a escolha de destino de produtos descartados após o final da primeira vida útil dos produtos.

5 CONCLUSÕES

No presente capítulo são apresentadas as conclusões obtidas, discriminadas ao respeito de cada área de foco e trabalhos futuros

5.1 CONCLUSÕES DA TESE

A seguir o autor relata as conclusões a respeito do presente trabalho.

5.1.1 A respeito do escopo da tese

A presente tese propôs o conceito de resiliência embutida no produto, de forma a entender que a obsolescência não corresponde a um estado total de um produto, mas, sim, a um estado parcial para algumas das suas funções. Além disso, a obsolescência não é um estado permanente, podendo-se reverter o estado de perda de valor, sendo avaliada para cada caso. Considera-se que essas questões devem ser analisadas antes de decidir-se sobre o tratamento do produto no fim de sua vida útil.

Os resultados obtidos nesta tese podem ser utilizados como informações nas fases de: projeto de produtos, medição de energia na fase de uso, planejamento de processos de desmontagem, e recuperação de materiais.

O trabalho apresentado nesta tese alinha-se com a formulação dos 17 indicadores de desenvolvimento sustentável da ONU, contribuindo para aportar conhecimento, por exemplo, em possíveis soluções nos seguintes itens: (9) “Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação”, e (12) “Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis”.

5.1.2 A respeito da metodologia formulada

A criação de diferentes ferramentas permitiu a visualização das informações relevantes para serem utilizadas como saída das fases iniciais da metodologia, bem como seu uso na integração de fontes de informações primárias e secundárias para análises subsequentes.

Verificou-se que o domínio dos sistemas técnicos favorece a implementação de limitações desnecessárias aos produtos, na procura por encurtar o seu ciclo de vida em prol de

aumentar o giro de vendas. Estas políticas comerciais não favorecem as metas dos delineamentos mundiais referentes à sustentabilidade. Cabe ao profissional responsável pelo processo tentar equilibrar a procura por lucro econômico, objetivo da empresa, com práticas de tomada de decisão na projeção de novos produtos. Uma alternativa desejável é a minimização do uso de recursos naturais e humanos.

A utilização de redes bayesianas forneceu ferramentas diferenciadas que permitiram a análise de codependência entre os elementos do produto. Considerou-se que a utilização de redes de produção tradicionais não fornece informações suficientes do ponto de vista da hierarquização e entrega das funções do produto. Isso pela contribuição das redes bayesianas na área probabilística, aplicada às falhas.

No âmbito da metodologia proposta nesta pesquisa, verificou-se uma técnica que contribui para uma redução significativa do consumo energético em fase de uso do produto analisado. A metodologia aplicada requer ser avaliada utilizando-se o resultado de ecoauditoria, que considera a energia embutida durante a utilização do produto.

5.1.3 A respeito dos objetivos da tese

Considera-se que o objetivo geral desta tese foi atingido, uma vez que a metodologia desenvolvida conseguiu formular o indicador de resiliência embutida, permitindo quantificar a capacidade do produto para retornar ao estado de funcionamento, seja no mesmo produto, ou mediante o reaproveitamento dos materiais e peças disponíveis ainda em fase de uso. Isso pode ser observado tanto do ponto de vista da energia embutida necessária quanto de outros indicadores de impacto como, por exemplo, o CO₂ gerado, ou qualquer um dos indicadores pertencentes à LCA, sempre que se contar com as informações requeridas para tal fim.

O primeiro objetivo específico foi atingido no capítulo 2, por meio da realização da revisão bibliográfica, permitindo-se visualizar o problema dentro dos limites do conhecimento científico atual com o rigor necessário para conseguir o ineditismo da tese.

O segundo objetivo específico foi atingido no capítulo 3, mediante a criação da metodologia visando fornecer ao pesquisador as ferramentas acadêmicas necessárias para analisar o problema considerado, com o intuito de apresentar respostas válidas para o objetivo proposto.

O terceiro objetivo específico foi atingido no final do capítulo quatro, toda vez que o indicador proposto estabeleceu um valor inerente ao produto, que descreve a sua capacidade de retorno ao sistema em função da sua conformação e vida útil.

O quarto objetivo específico visava a formulação de dois *Kanban* de informação do produto, que permitissem sistematizar informações relativas à caracterização do produto, permitindo aprimorar o tratamento da informação entre os *stakeholders*.

O quinto objetivo específico foi atingido ao final do capítulo 4, após a avaliação dos indicadores formulados quando aplicados a uma família de produtos, permitindo a análise de resultados.

Quando analisados os resultados, observou-se que a utilização de valores específicos para um produto possibilita a tomada de decisões mais rigorosas dos pontos de vista energético-econômico, tanto na fase do projeto conceitual para a criação de produtos, quanto na seleção de processos de recuperação de materiais e peças em empresas dedicadas para tal finalidade.

5.1.4 A respeito do conceito de sustentabilidade

Finalmente, conclui-se que a falta de unificação de critérios a respeito da criticidade do que seria mais sustentável entre elementos de estudo (produtos) obedece a análise situacional do sistema estudado. Isso significa que o mesmo fenômeno estudado em lugares e condições diferentes requerem análises de impacto diferenciadas de acordo com os recursos que estão sendo utilizados. Por exemplo, a realização de um estudo de impacto da quantidade de água utilizada durante a fabricação de uma peça usinada é significativamente menos crítica no Brasil que na África (por exemplo, na Nigéria).

5.2 TRABALHOS FUTUROS

A presente tese abre um leque de possibilidades para utilizar a metodologia na quantificação de recursos necessários para o retorno dos produtos a um segundo ciclo de vida. Nesse contexto, propõe-se a criação de um ambiente *on-line* que permita a sistematização da metodologia com o intuito de facilitar o acesso de pessoas localizadas em qualquer lugar do mundo mediante o servidor do laboratório GRIMA. O mesmo poderia ser alimentado

mediante bases de dados gratuitas disponíveis, podendo vir a ser utilizado para diversos fatores de impacto.

A validação necessária para completar a aplicação do método tipo DRS, requer da aplicação de questionários ou outro tipo de validação por parte do usuário potencial com o intuito de ponderar os critérios de usabilidade, operacionalidade e outros a serem definidos com ajuda do relator.

Propõe-se também a criação de um banco de dados alimentado pelas empresas encarregadas de resgatar materiais e produtos descartados, de forma a manter atualizados os dados da energia necessária na recuperação das matérias-primas e, assim, possibilitar a comparação com a quantidade de recursos não utilizados na exploração de materiais virgens.

Este trabalho abre a possibilidade de integrar a metodologia proposta com trabalhos acadêmicos e industriais no âmbito da logística reversa, de modo a otimizar as redes de recuperação de produtos, ajudando a direcionar aqueles componentes que podem ser reaproveitados e, ainda, propondo descartes necessários, caso o requisito energético não compense o tratamento dos componentes e materiais.

A utilização das redes bayesianas permite propor o uso da lógica *fuzzy*, substituindo a lógica booleana para propor soluções na utilização parcial dos elementos, na medida em que o produto deixa de entregar a sua função particular.

6 REFERÊNCIAS

- AITSI-SELMI, Amina *et al.* The Sendai framework for disaster risk reduction: Renewing the global commitment to people's resilience, health, and well-being. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 6, n. 2, p. 164-176, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade: apresentação. Rio de Janeiro, 1994.
- AGRAWAL, Vishal V.; KAVADIAS, Stylianos; TOKTAY, L. Beril; The Limits of Planned Obsolescence for Conspicuous Durable Goods. **Manufacturing & Service Operations Management**, v. 18, n. 2, p. 216-226, 2015.
- ALADEOJEBI, Taiwo. K. Planned obsolescence. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 4, n. 6, p. 1504-1508, 2013.
- ALHADDI, Hanan. Triple bottom line and sustainability: A literature review. **Business and Management Studies**, v. 1, n. 2, p. 6-10, 2015.
- ALLEN, Robert. C. Class structure and inequality during the industrial revolution: lessons from England's social tables. **The Economic History Review**, v. 72, n. 1, p. 88-125, 2019.
- ANDRIGHETTO, Luca; BALDISSARRI, Cristina; VOLPATO, Chiara. (Still) Modern Times: Objectification at work. **European Journal of Social Psychology**, 2016.
- ASHBY, Mike. *et al.* **The CES Edu Pack Eco Audit Tool**. A White Paper. Cambridge. 2009.
- ASHBY, Mike. **Materials and the environment: eco-informed material choice**. Canada: Elsevier, 2012.
- AUER, Gunther *et al.* **How much energy is needed to run a wireless network?** In: Green Radio Communication Networks. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- BALDÉ, C. *et al.* **Observatorio Mundial de los Residuos Electrónicos**. www.itu.int, 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Documents/GEM%202017/GEM%202017-S.pdf>, Genebra. Acesso em: 04 08 2019.
- BARKEMEYER, Ralf *et al.* What happened to the 'development' in sustainable development? Business guidelines two decades after Brundtland. **Sustainable development**, v. 22, n. 1, p. 15-32, 2014.
- BERENGUER, Jaime. The effect of empathy in environmental moral reasoning. **Environment and Behavior**, v. 42, n. 1, p. 110-134, 2010.
- BLS, Bureau of labor statistics. **India's Organized Manufacturing Sector**. www.bls.gov 2013. Disponível em: <<http://www.bls.gov/fls/india.htm>>. Acesso em: 17 abr 2017.

BOCKEN, Nancy. M. *et al.* Product design and business model strategies for a circular economy. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 33, n. 5, p. 308-320, 2016.

BONAHOM, Cecil. Economic recovery, lessons from post- world war II period. **Mercatus on policy- Mercatus center**, p. 1-4 2012.

BRAUNGART, Michael; MCDONOUGH, William; BOLLINGER, A. Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. **Journal of Cleaner Production**, p. 1337–1348, 2007.

BRUNDTLAND, H. **Report of the World Commission on Environment and development: our common future**. Oslo. United Nations. 1987.

BURNS, Brian. **Re-evaluating Obsolescence and Planning for It." Longer Lasting Products: Alternatives to The Throwaway Society**. New York. Routledge, P 65-86, 2016.

CAMOCHO, David. FERREIRA, Ana. VICENTE, Jose. **Transition to circular and sustainable economy through design**. Organizing committee 01 honor and scientific committees 03 keynote speakers 05 selected papers, p 201831. Lisboa. 2018.

CHASTAS, Panagiotis; THEODOSIOU, Theodoros; BIKAS, Dimitrios Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review. **Building and environment**, v. 105, p. 267-282, 2016.

CICERI, N. Duque; GUTOWSKI, Timothy; GARETTI, Marco A tool to estimate materials and manufacturing energy for a product. **Proceedings of the 2010 IEEE international symposium on sustainable systems and technology**. IEEE, 2010. p. 1-6. 2010.

CONSOLI, Frank. Guidelines for Life-cycle Assessment: A Code of Practice from the SETAC Workshop Held at Sesimbra, Portugal, 31 March-3 April 1993: **Society of Environmental Toxicology and Chemistry**, 1993.

CRAWFORD, Robert *et al.* Hybrid life cycle inventory methods a review. **Journal of Cleaner Production**, p. 1273-1288, 2018.

DAIM, Tugml U.; RUEDA, Guillermo R.; MARTIN, Hilary T. Emerging technologies: Use of bibliometrics and patent analysis Management. **Technological Forecasting and Social Change**: v.78, n. 8, p. 981-1012. 2006

DANIEL, Clauss. Materials and processing for lithium-ion batteries. **Journal of minerals, metals and materials**, v 60, n9, p 43-48 2008.

DE CARVALHO, Hugo Marcelo. **Metodologia de avaliação e aumento da eficiência energética em manufatura de elementos discretos: aplicação em usinagem**. São Jose dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica ITA, 2015.

DESPEISSE, Melanie *et al.* Industrial ecology at factory level—a conceptual model. **Journal of cleaner production**, v. 31, p. 30-39, 2012.

DESPEISSE, Melanie; OATES, Michael R.; BALL, Peter D Sustainable manufacturing tactics and cross-functional factory modelling. **Journal of Cleaner Production**, v. 42, p. 31-41, 2013.

DIXON, John A.; FALLON, Louise A. The concept of sustainability: origins, extensions, and usefulness for policy. **Society & Natural Resources**, v. 2, n. 1, p. 73-84, 1989.

DREXHAGE, John. MORPHY Deborah. **Sustainable development: from Brundtland to Rio 2012**. Background paper prepared for consideration by the High-Level Sustainable development: Panel on Global Sustainability at its first meeting 19 September 2010. New York. 2010.

DUHOVNIK, Jozse. TAVČAR Jože. Product design test using the matrix of functions and functionality. **AEDS Workshop**. Pilsen. 2005.

DURAN, Julian Fernando. **Método para determinar a energia descartada por tratamento inadequado de uma família de produtos dada a obsolescência programada e seu impacto na fabricação**. Florianopolis: UFSC, 2014.

DURAN, Julian Fernando. FERREIRA, Joao Carlos. Method to Determine the Discarded Energy Resulting from Inadequate Management of a Family of Products Due to Planned Obsolescence. **25th FAIM-International Conference Flexible Automation and Intelligent Manufacturing FAIM**. Wolverhampton: 2015.

DUTRA, Ines. **Redes Bayesianas: o que são, para que servem, algoritmos e exemplos de aplicações**. Coppe Sistemas–Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2002.

EICHENGREEN, Barry. **Lessons from the Marshall Plan**. Berkeley: University of California, 2010.

ELKINGTON, John. Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business. **Environmental quality management**, v. 8, n. 1, p. 37-51, 17 ago. 1998.

ELLIOTT, John. KOR, Ah. OMOTOSHO, Ollowafemi. Energy consumption in smartphones: an investigation of battery and energy consumption of media related applications on android smartphones. **International SEEDS Conference: Leeds Beckett Repository**. Leeds, 2017.

ENDERTON, Herbert, B. **Second order and Higher-order Logic**. In: **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**. www.seop.illc.uva.nl, 2009. Disponível em: <https://seop.illc.uva.nl/entries/logic-higher-order/> Acesso em: 12 jul. 2016.

EPA. U.S. **Environmental Protection Agency**. www3.epa.gov, 2016. Disponível em: <https://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/global.html>. Acesso em: 05 set 2016.

FERNANDES, Rodrigo. **Otimização de periodicidade nos planos de manutenção preventiva: uma modelagem matemática**. Florianopolis: UFSC, 2015.

FERREIRA, Joice. ARAGÃO L.. Brazil's environmental leadership at risk. **Science**, v.364, n. 6210, p. 706-707, 2014.

FERRER, Jesus. **La metodología y planteamiento del problema.** www.metodologia02.blogspot.com. 2010. Disponível em: <<http://metodologia02.blogspot.com.br/p/operacionalizacion-de-variables.html>>. Acesso em 15 jun 2018

FIELD, Alexander. US economic growth in the gilded age. **Journal of Macroeconomics**, p. 173-190, 2009.

FINNVEDEN, Goran. *Et al.* Recent developments in life cycle assessment. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 1, p. 1-21, 2009.

FLEISCHMANN, Moritz *et al.* Quantitative models for reverse logistics: A review. **European journal of operational research**, v. 103, n. 1, p. 1-17, 1997

FORCELLINI, Fernando. **Projeto para manufatura. Material de aula UFSC.** Florianopolis, Santa Catarina, Brasil. 2012.

GARVEY, Myles; CARNOVALE, Steven; YENIYURT, Sengun. An analytical framework for supply network risk propagation: A Bayesian network approach. **European Journal of Operational Research**, v. 243, n. 2, p. 618-627, 2015.

GIRVAN, Norman. **Corporate imperialism: Conflict and expropriation.** New York: Routledge, 2017.

GOLDEMBERG, Jose. Energia e sustentabilidade. **Revista Cultura e Extensão USP**, p 33-43, 2015.

GRAY, Rob. Is accounting for sustainability actually accounting for sustainability... and how would we know? An exploration of narratives of organisations and the planet. **Accounting, organizations and society**, p. 47-62, 2010.

GRIMAUD, Guilhem; PERRY, Nicolas; LARATTE, Bertrand. Sustainability Performance Evaluation for Selecting the Best Recycling Pathway During Its Design Phase. **Designing Sustainable Technologies, Products and Policies**, p. 11-19, 2018.

GRUPO SANTA CATARINA, L. **www.gruposantacatarina.com**, Disponível em: <<http://www.gruposantacatarina.com/pt/sustentabilidade/>>. Acesso em 04 07 2016.

GU, Xi. Manufacturing System Design for Resilience. **CIRP 25th Design Conference Innovative Product Creation**. Ann arbor: p. 135 – 140. 2015

GUINEE, Jeroen, *et al.* Life cycle assessment: past, present, and future. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 1, p. 90-96, 2011.

GUTOWSKI, Timothy; COOPER, Daniel; SAHNI, Sahil. Why we use more materials. **Philosophical transactions of the royal society a: mathematical, physical and engineering sciences**, v 375, n2095, p 20160368, 2017.

GUTOWSKI, Timothy G. *et al.* The energy required to produce materials: constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand. **Philosophical Transactions of the**

Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 371, n. 1986, p. 2001003 2013.

HENRY, Devanandham; RAMIREZ-MARQUEZ, Jose Emmanuel. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 99, p. 114-122, 2012.

HERNANDEZ, Patxi; KENNY, Paul. From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). **Energy and buildings**, v. 42, n. 6, p. 815-821, 2010.

HERRMANN, Ivan T.; MOLTESEN, Andreas. Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? – a comparative assessment of SimaPro and GaBi. **Journal of Cleaner Production**, v. 86, p. 163-169, 2015.

HOLLING, Crawford Stanley. Engineering resilience versus ecological resilience. **Engineering within ecological constraints**, v. 31, n. 1, p. 32, 1996.

HOLLNAGEL, Erik; WOODS, David D. Epilogue: Resilience engineering precepts. **Resilience Engineering CRC Press**, p. 347-358. 2018.

HOSSEINI, Seyedmohsen; BARKER, Kash. A Bayesian network model for resilience-based supplier selection. **International Journal of Production Economics**, v. 180, p. 68-87, 2016a.

HOSSEINI, Seyedmohsen; BARKER, Kash. Modeling infrastructure resilience using Bayesian networks: A case study of inland waterway ports. **Computers & Industrial Engineering**, p.252–266.2016b..

HUMAR, Iztok, *et al* Rethinking energy efficiency models of cellular networks with embodied energy. **IEEE Network**, v. 25, n. 2, p. 40-49, 2011.

HUNT, Robert G.; FRANKLIN, William E. LCA- How it Came About. Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA. **International journal of life cycle assessment**, v 1, n 1, 1996. P. 4-7.

ICONTEC. **NTC-ISO COLOMBIANA 14043 GESTIÓN AMBIENTAL**. Evaluacion del ciclo de vida interpretación del ciclo de vida. Bogota. 2000.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, **A universal charger for mobile phones**. www.itu.int 2009, Disponible em: <<https://www.itu.int/net/itunews/issues/2009/07/32.aspx>>. Acesso em: 28 mar, Genebra 2019.

JAHAN, Ali. *et al*. Material screening and choosing methods a review. **Materials & Design**. V 31, n 2 p. 696-705, 2010.

JOSIAS, Craig. **Hedging future uncertainty. Massachusetts: Framework for Obsolescence Prediction, Proactive Mitigation and Management**. Amherst, 2009.

KEARY, Michael. The new prometheans: Technological optimism in climate change mitigation modelling. **Environmental Values**, v 25, n 1, p. 7-28, 2016.

KLOPFER, Walter. Life Cycle Assessment- From the Beginning to the Current State. **Environmental Science and Pollution Research**, v 4. N 4. P. 223-228, 1997.

KNIGHT, Frank. H. Profit and entrepreneurial functions. **The Journal of Economic History**, v 2, n S1, p. 126-132, 1942.

KRISHNAN, Nikhil *et al.* A hybrid life cycle inventory of nano-scale semiconductor manufacturing. **Environmental science & technology**, v. 42, n. 8, p. 3069-3075, 2008

KUZNETS, Simon. Economic growth and income inequality. **The American economic review**, v. 45, n. 1, p. 1-28, 1955.

LABRA, J. E. **Logica de predicados**. www.edv.uniovi.es. Disponível em: <<http://di002.edv.uniovi.es/~labra/FTP/LPRED.pdf>>, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica em Informática de Oviedo. Oviedo 2010. Acesso em: 14 fev 2019

LAFRAIA, João Ricardo. **Manual de confiabilidade, manteneabilidade E DISPONIBILIDADE**. Rio de Janeiro: Qualitymark editora Ltda, 2001.

LAICH, G. **Aceleración Compensatoria II**, www.guillermolaich.com. 26 jul. 2012. Disponível em: <<http://www.guillermolaich.com/w/54/biografia>>. Acesso em: 10 fev 2018.

LEE, David Joonwhan *et al.* Sustainable and non-sustainable consumer behavior in young adults. **Young Consumers**, v. 17, n. 1, p. 78-93, 2016.

LIN, David. *et al.* Ecological Footprint Accounting for Countries: Updates and Results of the National Footprint Accounts, 2012–2018. **Resources**, v. 7, n. 3, p. 58, 2018.

LONDON, Bernard. Ending the Depression through planned obsolescence. **Retrieved March**. V 25 p. 2016. 1932.

LOVETT, Richard. Worries over electronic waste from the developing world. **Nature**, 22 abr. 2010.

MORALES Miguel, CHIMENOS, Josep. FERNANDEZ. SEGARRA, Merce. Materials Selection for Superheater Tubes in Municipal Solid Waste Incineration Plants. **Journal of materials engineering and performance**, v. 23, n. 9, p. 3207-3214, 2014.

MAROCCO, Gustavo. **A importância da manutenção produtiva total na melhoria contínua do processo produtivo; Um estudo de caso**. www.uuff.br. Disponível em: http://www.uuff.br/engenhariadeproducao/files/2014/09/2013_1_1_Gustavo.pdf Juiz de Fora: Universidade Juiz de Fora, 2013. Acesso em 20 dez 2017.

MAUCO, Virginia. **Logica proposicional**, www.exa.unicen.edu.ar, 2009. Disponível em: <<http://www.exa.unicen.edu.ar/catedras/ccomp2/ClaseIntroLogicaProposicional.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

MAXWELL, Dorothy; VAN DER VORST, Rita. Developing sustainable products and services. **Journal of Cleaner Production**, v. 11, n. 8, p. 883-895, 2003.

MCDONOUGH, William; BRAUNGART, Michael. **Cradle to cradle, Remaking the way we make things**. New York: North point press, 2010.

MEADOWS, Donella H. *et al.* **Limits of growth a report to the club of Rome (1972)**: Universe books, 1972.

MEADOWS, Dennis; RANDERS, Jorgan. **Limits to Growth, the 30- year Update**. Londres: Routledge, 2012.

MEGGINSON, Leon. C. Key to Competition is Management. **Petróleo Management**, v 36. n 1, p. 91-95, 1964.

MELCHER, Frank. *et al.* Fingerprinting of conflict minerals: columbite-tantalite (“coltan”) ores. **SGA News**, v. 23, n. 1, p. 7-14, 2008.

MENTZER, John. *et al.* Defining supply chain management. **journal of business logistics**. v. 22, n. 2, p. 1-25. 2001.

MILLS, M. P. Exposed: **How America’s Electric Grids Are Becoming Greener, Smarter and More Vulnerable**. www.manhattan-institute.org, 2016. Disponível em: <https://www.manhattan-institute.org/html/exposed-how-americas-electric-grids-are-becoming-greener-smarter-more-vulnerable-9038>. Manhattan institute, Acesso em: 12 abr 2018.

MILNE, Markus J.; GRAY, Rob. W (h) ither ecology? The triple bottom line, the global reporting initiative, and corporate sustainability reporting. **Journal of business ethics**, v. 118, n. 1, p. 13-29, 2013.

MORAL, serafin. **Una introduccion a las redes bayesianas; Departamento de Ciencias de la computacion**. Granada. 2014

MORRIS, Richard. **Fundamentos de design de produto**. Porto Alegre: Bookman Editora, 2011.

NETWORK GLOBAL FOOTPRINT. Ecological footprint. The Share Guide: **The Holistic Health Magazine and Resource**. Disponível em: < <http://www.shareguide.com/Ecological.html>> Oakland. 2008. Acesso em: 03 set 2018.

NOKIA, **Integrated product policy pilot**. www.ec.europa.eu. Disponível em: https://ec.europa.eu/environment/ipp/pdf/nokia_mobile_05_04.pdf. Espoo, 2005. Acesso em: 22 set 2017.

NOLTY, Anne. *et al.* The Headington Institute Resilience Inventory (HIRI): Development and validation for humanitarian aid workers. **International Perspectives in Psychology: Research, Practice, Consultation**, v. 7, n. 1, p. 35, 2018.

NORTON, Robert. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. Porto Alegre, Prentice Hall 2000.

OHRING, Milton. **Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices**. Hoboken: Elsevier, 1998.

ONU. **United Nations Environment Programme, 2018**. Disponível em: <<https://www.unenvironment.org/explore-topics/climate-change/what-we-do/adaptation-and-resilience>>. Acesso em: 05 fev. 2019.

PADGETT, Paul A comparison of carbon calculators. **Environmental impact assessment review**, v. 28, n. 2-3, p. 106-115, 2008.

PECHT Michael, *et al* . Life Cycle Forecasting, Mitigation Assessment and Obsolescence Strategies.: **CALCE EPSC**, 2002.

PEETERS, Jef R. *et al* Tool design for electronic product dismantling. **Procedia CIRP**, v.48, p. 466-471, 2016.

POPE, Jenny; ANNANDALE, David; MORRISON-SAUNDERS, Angus. Conceptualizing sustainability assessment. **Environmental impact assessment review**, v. 24, n. 6, p. 595-616, 2004.

POSTHUMA, Leo. *et al*. Beyond safe operating space: finding chemical foot printing feasible. **Environmental science and technology**, 2014. 6057-6059.

RACHURI, Sudarsan; SRIRAM, Ram D.; SARKAR, Prabir. Metrics, standards and industry best practices for sustainable manufacturing systems. **2009 IEEE international conference on automation science and engineering**. Bangalore: 2009.

RAMESH, T.; PRAKASH, Ravi; SHUKLA, K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and buildings**, v. 42, n. 10, p. 1592-1600, 2010.

REAP, John. *et al*. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. **The international journal of life cycle assessment**, v. 13, n. 5, p. 374, 2008.

SHERIF, Yosef S.; RICE, Ellen. the search for quality: the case of planned obsolescence. **Microelectronics Reliability**: California institute of technology, 1986.

RUSINKO, Cathy. Green manufacturing: an evaluation of environmentally sustainable manufacturing practices and their impact on competitive outcomes. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 54, n. 3, p. 445-454, 2007.

SARTORI, Igor; NAPOLITANO, Assunta; VOSS, Karsten. Net zero energy buildings: A consistent definition framework. **Energy and buildings**, v. 48, p. 220-232, 2012.

SAVITZ, Andrew. **The triple bottom line: how today's best-run companies are achieving economic, social and environmental success-and how you can too**. San Francisco: John Wiley & Sons, 2013.

SCHLICKMANN, Marcelo. **Metodo para avaliação da obsolescencia de um equipamento do processo de manufatura com base no tripé da sustentabilidade**. Florianópolis: UFSC, 2015.

SEOW, Yingying; RAHIMIFARD, Shahin. A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems. **Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 4, n.3, p. 258-264, 2011.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. Florianópolis: UFSC, 2001.

SMIL, Vaclav. Power Density Primer: Understanding the Spatial Dimension of the Unfolding Transition to Renewable Electricity Generation (Part I–Definitions) **Master Resource, A Free Market Energy Blog**. 2010.

SMIL, Vaclav. Embodied energy: Mobile devices and cars. [Numbers Don't Lie]. **Spectrum IEEE**, 2016.

SINGH, Narendra *et al.* Characterizing the materials composition and recovery potential from waste mobile phones: A comparative evaluation of cellular and smart phones. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 6, n. 10, p. 13016-13024, 2018.

SINGH, Rajesh Kumar *et al.* An overview of sustainability assessment methodologies. **Ecological indicators**, v. 15, n. 1, p. 281-299, 2012.

SLADE. Giles. **Made to break, Technology and obsolescence in America**. Cambridge: Harvard university press, 2009.

SLAPER, Timothy F.; HALL, Tanya J. The triple bottom line: What is it and how does it work. *Indiana business review*, v. 86, n. 1, p. 4-8., 2011.

SOARES, Sebastião Roberto; PEREIRA, Sibeli. Inventário da produção de pisos e tijolos cerâmicos no contexto da análise do ciclo de vida. **Ambiente Construído**, v. 4, n. 2, p. 83-94, 2004.

SONDALINI, Mike. **Industrial and Manufacturing Wellness: The Complete Guide to Successful Enterprise Asset Management**. Connecticut: Industrial Press, www.lifetime-reliability.com. 2016. Disponível em: <http://www.lifetime-reliability.com/tutorials/plant-and-equipment-wellness/Plant_and_Equipment_Wellness_Tutorial.pdf>. Acesso em: 20 nov 2017

SRIVASTAVA, Samir. K. Network design for reverse logistics. **Omega**, v. 36, n. 4, p. 535-548, 2008.

TAKAHASHI, Yoshikazu. **Manutenção Produtiva Total**. São Paulo: Instituto Iman, reedição 2010.

TEUNTER, Ruud H.; VAN DER LAAN, Erwin; INDERFURTH, Karl. How to set the holding cost rates in average cost inventory models with reverse logistics? **Omega**, v. 28, n. 4, p. 409-415, 2000.

THEOTOKIS, Aristeidis; MANGANARI, Emmanouela. The impact of choice architecture on sustainable consumer behavior: The role of guilt. **Journal of Business Ethics**, v. 131, n. 2, p. 423-437, 2015.

TOTH, Gergely; SZIGETI, Cecília. The historical ecological footprint: From over-population to over-consumption. **Ecological Indicators**, v. 60, p. 283-291, 2016.

UNFCCC. **Technical guidelines for the national adaptation plan process**. www.unfccc.int Disponível em: <https://unfccc.int/topics/adaptation-and-resilience/workstreams/national-adaptation-plans-naps/guidelines-for-national-adaptation-plans-naps>. Bonn. 2012. Acesso em: 08 set 2017

UNCED United Nations Conference on Environment and Development. **Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento**. Rio de Janeiro. 1992.

URIBE, Diana. **Segunda guerra mundial**, www.ivoox.com. Disponível em: <https://www.ivoox.com/diana-uribe-segunda-guerra-mundial>. Bogota 2018. Acesso em 25 de set 2018

VELEVA, Vesela; ELLENBECKER, Michael. Indicators of sustainable production: framework and methodology. **Journal of Cleaner Production**, v. 9, n. 6, p. 519-549, 2001.

VON ALAN, R. Hevner, *et al.* Design science in information systems research. **MIS quarterly**, vol. 28, no 1, p. 75-105. 2004

WANG, Nengmin; HE, Qidong; JIANG, Bin. Hybrid closed-loop supply chains with competition in recycling and product markets. **International Journal of Production Economics**, p. 1-13, 2018.

WIERINGA, Roel. Design science as nested problem solving. **Proceedings of the 4th international conference on design science research in information systems and technology**. ACM, 2009. p. 8

WILLIAMS, Eric D.; AYRES, Robert U.; HELLER, Miriam. The 1.7 Kilogram Microchip: Energy and Material Use in the Production of Semiconductor Devices. **Environmental Science & Technology**, v. 36, n. 24, p. 5504-5510. 2002.

WOO, JongRoul; CHOI, Hyunhong; AHN, Joongha. A. Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions for electric vehicles based on electricity generation mix: A global perspective. Transportation Research Part D: **Transport and Environment**, v. 51, p. 340-350, 2017.

WORLD BANK. **World Development Indicators**. World Bank Group, www.datacatalog.worldbank.org. Disponível em: <https://datacatalog.worldbank.org/dataset/world-development-indicators>. 2018 Acesso em: 24 nov 2018

XIANG, Dong *et al.* Printed circuit board recycling process and its environmental impact assessment. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 34, n. 9, p. 1030-1036, 2007.

YAMANE, Luciana Harue *et al.* Recycling of WEEE: characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. **Waste Management**, v. 31, n. 21, p. 2553-2558, 2011.

YOSHIDA, Nelson Daishiro. Um estudo aplicado á previsão tecnologica. **Future Studies Research Journal**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 52-84, 2010.

ZHANG, W. J.; VAN LUTTERVELT, C. A. Toward a resilient manufacturing system. **CIRP annals**, v. 60, n. 1, p. 469-472, 2011.

ZHOU, Chenyi; CAO, Qilin. Design and implementation of intelligent manufacturing project management system based on bill of material. **Cluster Computing**, p. 1-9, 2018.

ZU, Chen-Xi; LI, Hong. Thermodynamic analysis on energy densities of batteries. **Energy & Environmental Science**, v. 8, n. 4, p. 2614-2624, 2011.

Apêndice 1

Como parte da construção do texto foi criada uma ferramenta de seguimento da revisão bibliográfica chamada métricas bibliográficas. Contém a informação referente ao tipo de fonte segundo a procedência. As categorias são: revista ou jornal, anais de congresso, informe ou livro e site web.

Também foi registrado o ano da publicação e classificado em três faixas etárias: publicações entre 1900 e 1999, 2000-2009 e 2009-2019. O intuito da criação dessa ferramenta é propender pela qualidade, atualidade e relevância do texto apresentado.

Métricas da bibliografia

Número de referências: **145**

De acordo a origem da referência

| | | |
|------------------------|------------|--------|
| Revista o jornal | 83 | 56,0 % |
| Informe técnico/ livro | 41 | 28,7 % |
| Site Web | 12 | 8,4 % |
| Anais de Congresso | 10 | 6,3 % |
| Total | 146 | |

De acordo a idade do texto

| | | |
|-------------------|------------|--------|
| Ano da publicação | | |
| 1900-1999 | 16 | 11,2 % |
| 2000-2009 | 38 | 24,1 % |
| 2009-2019 | 92 | 65,7 % |
| Total | 146 | |