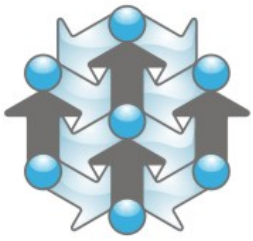


Engenharia de Produção
Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo

JULIANO BEZERRA DE ARAUJO

Desenvolvimento de método de avaliação de desempenho de processos de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade

São Carlos
Janeiro de 2010

JULIANO BEZERRA DE ARAUJO

Desenvolvimento de método de avaliação de desempenho de processos de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Processos e Gestão de Operações
Orientador: Professor Titular João Fernando Gomes de Oliveira

São Carlos
Janeiro de 2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A663a

Araujo, Juliano Bezerra de
Avaliação de processos de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade / Juliano Bezerra de Araujo; orientador João Fernando Gomes de Oliveira. -- São Carlos, 2010.

Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Área de Concentração em Processos e Gestão de Operações) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Avaliação de desempenho em sustentabilidade. 2. Indicadores de sustentabilidade. 3. Produção sustentável. 4. Processos de usinagem. 5. Retificação. 6. Torneamento. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro **JULIANO BEZERRA DE ARAÚJO.**

Tese defendida e julgada em 15/01/2010 perante a Comissão Julgadora:

Aprovado

Prof. Titular **JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **ALDO ROBERTO OMETTO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **ROBERTO ANTONIO MARTINS**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Dr.ª **ALEXANDRA AUGUSTA PEREIRA KLEN**
(Ad Hoc Tec. de Negócio Digital)

APROVADO

Dr. **CARLOS FREDERICO BREMER**
(AXIA CONSULTING)

Prof. Associado **AQUILES ELIE GUIMARÃES KALATZIS**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Aos meus pais, Genésio e Laurie, meu irmão,
Humberto, e meu amor, Melina

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder saúde e paz para a condução da pesquisa.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor João Fernando Gomes de Oliveira, pela amizade, ensinamentos e orientação precisa em muitos momentos.

Ao Professor Günther Seliger e amigos da Universidade Técnica de Berlim (TU-Berlin) que me receberam e me ajudaram na pesquisa. Agradeço em especial as amigas Monica Vanegas, pesquisadora, e Roswitha Paul-Walz, funcionária da TU-Berlin.

Aos amigos do Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação (OPF) do NUMA (EESC/USP) pela amizade e companheirismo.

Aos Professores Roberto Martins e Aldo Ometto pelas discussões técnicas que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pela concessão da bolsa de doutorado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de doutorado sanduíche.

A todos aqueles que também contribuíram diretamente ou indiretamente para a condução da pesquisa de doutorado.

Minha eterna gratidão a minha família, Genésio, Laurie e Humberto, pedra fundamental da minha formação e caráter. Meu ponto de apoio durante toda a vida.

Ao meu grande amor, Melina, fonte de inspiração e de alegrias.

"A natureza pode suprir todas as necessidades do homem, menos a sua ganância"

Mahatma Gandhi

Resumo

ARAUJO, J.B. Desenvolvimento de método de avaliação de desempenho de processos de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

As empresas não mais podem pensar em desenvolvimento econômico sem a paralela preservação do meio-ambiente e do benefício mútuo da sociedade. É importante que as condições econômicas e sociais sejam melhoradas ao longo do tempo, sem exceder a capacidade de suporte do planeta. As indústrias podem contribuir para melhorar esse cenário aplicando uma gestão sustentável de manufatura, uma vez que estes são um dos principais agentes causadores de impactos. No entanto, para que consigam aprimorar a sustentabilidade de seus processos, é indispensável, antes de tudo, conhecer o seu real desempenho. O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver um método estruturado e simples para a avaliação de desempenho em sustentabilidade de processos de manufatura, permitindo a construção de relatórios de sustentabilidade mais precisos, periódicos e que venham a apoiar o processo de tomada de decisão gerencial. Embora modelos para a avaliação de desempenho em sustentabilidade tenham sido apresentados nos últimos anos, como o guia GRI, estes ainda carecem de critérios e regras para realizar análises mais precisas e integradas. O método proposto pode ser aplicado em dois processos de manufatura distintos, comprovando a sua eficácia e robustez. Ele é usado para analisar e comparar o desempenho em sustentabilidade de dois processos de usinagem, Retificação e Torneamento de Metais Endurecidos. Esses processos concorrem entre si em algumas faixas de atuação, tornando difícil a decisão sobre qual dos dois processos é o ideal para a produção de determinadas peças. Por meio do trabalho, foi possível comprovar a superioridade do processo de retificação em termos de ganhos econômicos, com a contrapartida de pior desempenho ambiental.

Palavras-chaves: Avaliação de desempenho, sustentabilidade, manufatura sustentável, usinagem de metais, retificação, torneamento.

Abstract

ARAUJO, J.B. Development of a method for manufacturing processes assessment considering sustainability parameters. PhD Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

Companies can no longer consider economical development without the parallel preservation of the environment and mutual benefit of the society. It is important that the economic and social conditions are improved over time, without exceeding the planet carrying capacity. Industries can contribute to improve this scenario by using cleaner and more efficient technologies, since they are one of the main sources of impacts. However, for them to improve their processes sustainability, it is essential to use an assessment tool which is able to evaluate their performance properly. The main goal of this work is to provide a structured and simple method for assessing sustainability performance of manufacturing processes, allowing the construction of more accurate and frequent sustainability reports, that may support the managerial decision making process. Although sustainability performance assessment models have been presented in recent years, as the GRI, there are still a lack of criteria and rules for carrying out more accurate and integrated assessments. The proposed method was able to be applied in two different manufacturing processes assessments, proving its effectiveness and robustness. It was used to analyze and compare the sustainability performance of two machining processes, grinding and hard turning. These processes compete with each other on some applications, making it difficult to decide which of the two processes is ideal for the production of certain parts. Through the study, it is demonstrated the grinding process superiority in terms of economic gains, at the cost of a higher environmental burden.

Keywords: Performance measurement, sustainability, sustainable manufacturing, machining processes, grinding, hard turning.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Sustentabilidade e objetivos para um modelo econômico mais eficiente. 8
Figura 2.2 – Evolução dos sistemas de produção rumo a modelos sustentáveis. 9
Figura 2.3 – Desdobramentos positivos do programa de produção mais limpa. 13
Figura 2.4 – Ações visando a eco-eficiência. 16
Figura 2.5 – Guia para a introdução de práticas sustentáveis nos sistemas de produção. 18
Figura 2.6 – Ganhos para processos e produtos advindo de práticas sustentáveis. 20
Figura 3.1 – Dimensões da sustentabilidade e tipos de indicadores de desempenho. 23
Figura 3.2 – Direcionadores de resultado e indicadores de resultado. 26
Figura 3.3 – Termos usados para a medição de desempenho em sustentabilidade. 27
Figura 3.4 – Principais usos gerenciais dos indicadores de sustentabilidade. 28
Figura 3.5 – Fases que integram a medição de desempenho em sustentabilidade. 31
Figura 3.6 – Processo contínuo em *loop* para mensurar a sustentabilidade das organizações. 32
Figura 3.7 – Modelo Fiksel, McDaniel e Mendenhall. 35
Figura 3.8 – Modelo Thoresen. 37
Figura 3.9 – Modelo Olsthoorn, Tyteca, Wehrmeyer e Wagner. 38
Figura 3.10 – Modelo Schwarz, Beloff e Beaver. 39
Figura 3.11 – Modelo EPA US. 41
Figura 3.12 – Processo de avaliação de processos de manufatura. 42
Figura 3.13 – Modelo Hay e Noonan 43
Figura 3.14 – Procedimento para a avaliação de desempenho "*plan-do-check-act*" 44
Figura 3.15 – Modelo ISO 14031 para a avaliação do desempenho ambiental. 45
Figura 3.16 – Modelo Labuschagne, Brent e Erck. 49
Figura 3.17 – Modelo Labuschagne, Brent e Erck para a dimensão social 51
Figura 3.18 – Modelo da Associação dos Engenheiros Alemães 53
Figura 3.19 – Modelo *Global Reporting Initiative.* 55
Figura 3.20 – Modelo IChemE 63
Figura 3.21 – Modelo do Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável 65
Figura 3.22 – Modelo de Veleva e Ellenbecker. 67
Figura 3.23 – Modelo Azapagic. 68
Figura 4.1 – Operações de retificação segundo norma DIN 8589. 77
Figura 4.2 – Ciclo de retificação cilíndrica de mergulho. 79
Figura 4.3 – Retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho e parâmetros. 80
Figura 4.4 – Exemplo de processo de torneamento retilíneo cilíndrico externo e suas forças. 81
Figura 4.5 – Avaliação qualitativa do potencial dos processos de retificação e *hard turning.* 85
Figura 5.1 – Seqüência de passos para a tomada de decisão de forma organizada. 90
Figura 5.2 – Etapas do desenvolvimento da pesquisa. 92
Figura 6.1 – Método proposto para a avaliação de desempenho em sustentabilidade. 96
Figura 6.2 – Diagrama de Pareto para os aspectos de desempenho ambientais. 103
Figura 6.3 – Diagrama de Pareto para os aspectos sociais. 105
Figura 6.4 – Diagrama de Pareto para os aspectos econômicos.. 106
Figura 6.5 –Freqüência de uso dos indicadores ambientais e Diagrama de Pareto. 108
Figura 6.6 –Freqüência de uso dos indicadores sociais e Diagrama de Pareto. 109
Figura 6.7 –Principais aspectos de desempenho em sustentabilidade para manufatura. 111
Figura 6.8 – Fases do processo de seleção de indicadores de sustentabilidade. 113
Figura 6.9 – Matriz de correlação para a escolha dos indicadores de desempenho. 113
Figura 6.10 –Tipos de medidas de desempenho em sustentabilidade. 116
Figura 6.11 – Estrutura de cálculo do índice agregado de sustentabilidade 119
Figura 7.1 – Torno modelo CNC INDEX. 124
Figura 7.2 – Corpo de prova utilizada nos ensaios. 125

Figura 7.3 – Diagrama de fluxo de produção para o processo de retificação.....128
Figura 7.4 – Subsistemas do processo de retificação. 129
Figura 7.5 – Diagrama de fluxo de produção para o processo de torneamento. 131
Figura 7.6 – Representação gráfica para os indicadores de consumo de energia.....142
Figura 7.7 – Representação gráfica para os indicadores de consumo de materiais.....143
Figura 7.8 – Representação gráfica de emissões, efluentes e resíduos.....143
Figura 7.9 – Representação gráfica da remuneração por hora. 144
Figura 7.10 – Representação gráfica de indicadores de saúde e segurança do operador. 145
Figura 7.11 – Matriz de risco para o operador. 146
Figura 7.12 – Representação gráfica do indicador de treinamento e educação.....148
Figura 7.13 – Representação gráfica dos custos associados a garantias e obrigações. 149
Figura 7.14 – Representação gráfica dos custos de produção. 150
Figura 7.15 – Representação gráfica do retorno sobre investimentos. 152
Figura 7.16 – Representação gráfica dos custos de fim de vida. 153
Figura 7.17 – Seqüência de cálculo do indicador agregado de sustentabilidade.....153
Figura 7.18 – Hierarquia de critérios para a avaliação de sustentabilidade. 156
Figura 7.19 – Valor dos subíndices em sustentabilidade para o cenário 1,2 e 3. 158
Figura 7.20 – Gráfico radar de sustentabilidade para o cenário 1. 161
Figura 7.21 – Gráfico radar de sustentabilidade para o cenário 2. 162
Figura 7.22 – Gráfico radar de sustentabilidade para o cenário 3. 162

Lista de Quadros

Quadro 2.1 – Principais componentes da eco-eficiência. 15
Quadro 2.2 – Princípios da Produção Sustentável. 17
Quadro 2.3 – Benefícios da gestão sustentável. 21
Quadro 3.1 – Características desejadas para os indicadores em sustentabilidade. 24
Quadro 3.2 – Fases que integram a medição de desempenho em sustentabilidade. 29
Quadro 3.3 – Exemplos de aspectos ambientais e seus respectivos impactos. 30
Quadro 3.4 – Lista de modelos de medição de desempenho selecionados. 34
Quadro 3.5 – Exemplos de indicadores ambientais. 46
Quadro 3.6 – Indicadores econômicos de desempenho, segundo o modelo. 56
Quadro 3.7 – Indicadores principais para o desempenho ambiental. 57
Quadro 3.8 – Indicadores adicionais para desempenho ambiental. 58
Quadro 3.9 – Indicadores sociais para a categoria Produtos e Serviços. 59
Quadro 3.10 – Indicadores sociais para a categoria Sociedade. 59
Quadro 3.11 – Indicadores sociais para a categoria Práticas Trabalhistas. 60
Quadro 3.12 – Indicadores sociais para a categoria Direitos Humanos. 61
Quadro 3.13 – Quadro comparativo dos diferentes modelos para a dimensão ambiental. 71
Quadro 3.14 – Quadro comparativo dos diferentes modelos para a dimensão econômica. 73
Quadro 3.15 – Quadro comparativo dos diferentes modelos para a dimensão social. 75
Quadro 4.1 – Tipos de abrasivos e aplicações. 78
Quadro 4.2 – Classificação dos processos de torneamento quanto a trajetória da ferramenta. 82
Quadro 5.1 – A escala fundamental de números absolutos. 91
Quadro 6.1 – Principais aspectos de desempenho para manufatura sustentável. 97
Quadro 6.2 – Escopo de avaliação para os aspectos ambientais. 98
Quadro 6.3 – Escopo de avaliação para os aspectos sociais. 99
Quadro 6.4 – Escopo de avaliação para os aspectos econômicos. 100
Quadro 6.5 – Freqüência de uso dos aspectos de desempenho ambientais. 102
Quadro 6.6 – Freqüência de uso dos aspectos de desempenho sociais. 104
Quadro 6.7 – Freqüência de uso de aspectos de desempenho econômicos. 105
Quadro 6.8 – Lista de empresas-modelo. 107
Quadro 6.9 – Freqüência de uso de indicadores ambientais por empresas-modelo. 108
Quadro 6.10 – Freqüência de uso de indicadores ambientais por empresas-modelo. 109
Quadro 6.11 – Lista de aspectos de desempenho principais. 110
Quadro 6.12 – Algumas categorias de impacto ambiental. 117
Quadro 7.1 – Banco de ensaios utilizados nos experimentos. 124
Quadro 7.2 – Condições de usinagem para o processo de retificação. 125
Quadro 7.3 – Condições de usinagem para o processo de torneamento. 126
Quadro 7.4 – Trocas ambientais para o processo de retificação. 129
Quadro 7.5 – Matriz de correlação com os indicadores ambientais de retificação. 130
Quadro 7.6 – Matriz de correlação com os indicadores sociais de retificação. 130
Quadro 7.7 – Matriz de correlação com os indicadores econômicos de retificação. 131
Quadro 7.8 – Trocas ambientais para o processo de torneamento. 132
Quadro 7.9 – Matriz de correlação com os indicadores ambientais de torneamento. 132
Quadro 7.10 – Matriz de correlação com os indicadores sociais de torneamento. 132
Quadro 7.11 – Matriz de correlação com os indicadores econômicos de torneamento. 133
Quadro 7.12 – Indicadores ambientais de retificação e fontes para obtenção de dados. 134
Quadro 7.13 – Valores de desempenho para os indicadores ambientais de retificação. 135
Quadro 7.14 – Indicadores sociais de retificação e fontes para obtenção de dados. 136
Quadro 7.15 – Valores de desempenho para os indicadores sociais de retificação. 136
Quadro 7.16 – Indicadores econômicos de retificação e fontes para obtenção de dados. 137

Quadro 7.17 – Valores de desempenho para os indicadores econômicos de retificação. 137
Quadro 7.18 – Indicadores ambientais de torneamento e fontes para obtenção de dados. 138
Quadro 7.19 – Valores de desempenho para os indicadores ambientais de torneamento. 138
Quadro 7.20 – Indicadores sociais de torneamento e fontes para obtenção de dados. 139
Quadro 7.21 – Valores de desempenho para os indicadores sociais de torneamento. 139
Quadro 7.22 – Indicadores econômicos de torneamento e fontes para obtenção de dados.... 140
Quadro 7.23 – Valores de desempenho para os indicadores econômicos de torneamento. ... 140
Quadro 7.24 – Indicadores de consumo de energia em kWh. 142
Quadro 7.25 – Nível de risco de acordo com os tipos de acidentes. 147
Quadro 7.26 – Indicadores de custos de produção por peça. 149
Quadro 7.27 – Fluxo de caixa futuro dos investimentos. 151
Quadro 7.28 – Efeitos do aumento dos indicadores sobre a sustentabilidade. 154
Quadro 7.29 – Valores normalizados dos indicadores de sustentabilidade. 155
Quadro 7.30 – Matriz de prioridade entre as dimensões do cenário 1. 157
Quadro 7.31 – Índice agregado de sustentabilidade para o cenário 1. 158
Quadro 7.32 – Matriz de prioridade entre as dimensões do cenário 2. 159
Quadro 7.33 – Índice agregado de sustentabilidade para o cenário 2. 159
Quadro 7.34 – Matriz de prioridade entre as dimensões do cenário 3. 160
Quadro 7.35 – Índice agregado de sustentabilidade para o cenário 3. 160

Lista de Símbolos e Abreviaturas

a_d	Profundidade da dressagem	[μm]
a_e	Sobremetal usinado	[mm]
a_p	Profundidade de corte	[μm]
b_d	Largura de atuação do diamante	[mm]
b_s	Largura de retificação	[mm]
b_w	Comprimento de corte	[mm]
d_s	Diâmetro do rebolo	[mm]
G	Relação G	
H	Número de horas trabalhadas por ano	[h]
i	Taxa de juros por ano	% a.a.
I_a	Índice de desempenho ambiental	
I_{agreg}	Indicador agregado de sustentabilidade	
I_e	Índice de desempenho econômico	
I_s	Índice de desempenho social	
K_{ft}	Custo da ferramenta	[R$]
K_{mc}	Custo anual de manutenção da máquina.	[R$]
K_p	Custo de produção por peça	[R$]
K_{uf}	Custo das ferramentas	[R$]
K_{um}	Custo da máquina	[R$]
K_{us}	Custo da mão-de-obra da usinagem	[R$]
m	Idade da máquina	[ano]
M	Vida prevista para a máquina	[ano]
NP(j)	Indicador de sustentabilidade normalizado	
$NP^-(j)$	Indicador de sustentabilidade normalizado com efeito negativo	
$NP^+(j)$	Indicador de sustentabilidade normalizado com efeito positivo	
n_s	Rotação do rebolo	[rpm]
n_w	Rotação da peça	[rpm]
P(j)	Indicador de sustentabilidade	
r	Raio do rebolo	[mm]
R(j)	Fator de normalização	
S_d	Passo de dressagem	[mm/volta]
S_h	Salário e encargos do operador	[R$]
t_{so}	Tempo de centelhamento ou *sparkout*	[s]
t_t	Tempo total de confecção por peça	[s]
U_d	Grau de recobrimento	
v_c	Velocidade de corte	[m/min]
v_d	Velocidade de dressagem	[m/s]
v_f	Velocidade de avanço	[mm/min]
V_{mi}	Valor inicial de aquisição da máquina	[R$]
v_s	Velocidade tangencial do rebolo ou velocidade de corte	[m/s]
v_w	Velocidade tangencial da peça	[m/s]
Z_t	Número de peças usinadas por vida T da ferramenta	

Abreviaturas

ACV	Avaliação do ciclo de vida
AHP	Método de análise hierárquica
CAS	Registro de composto químico

EDIP	Design ambiental de produtos
EPA	Agência de proteção ambiental dos Estados Unidos
GRI	Iniciativa de comunicação global ou *global reporting initiative*
ICHEME	Associação dos engenheiros químicos
ISO	Organização internacional para padronização
UNCED	Conferência das Nações Unidas para o desenvolvimento e meio-ambiente
UNEP	Programa das Nações Unidas para o meio-ambiente
VDI	Associação dos engenheiros alemães
VPL	Valor presente líquido
WBCSD	Conselho empresarial para o desenvolvimento sustentável

Sumário

1. Introdução 1
1.1. Apresentação do problema 1
1.2. Objetivos 4
1.2.1. Objetivo geral 4
1.2.2. Objetivos específicos 5
1.3. Justificativa 5
1.4. Estrutura do trabalho 6
2. Sustentabilidade em processos de manufatura 7
2.1. Controle ao final do processo, ou abordagem do tipo *end-of-pipe* 10
2.2. Produção mais limpa 11
2.3. Eco-eficiência 14
2.4. Produção sustentável 16
3. Medição de desempenho em sustentabilidade 22
3.1. Princípios e definições 22
3.2. Tipos de indicadores de sustentabilidade 25
3.3. Principais usos gerenciais dos indicadores de sustentabilidade 27
3.4. Processo de medição de desempenho em sustentabilidade 28
3.5. Modelos de medição de desempenho para avaliação da sustentabilidade 33
3.5.1. Modelo Fiksel, McDaniel e Mendenhall 34
3.5.2. Modelo Thoresen 35
3.5.3. Modelo Olsthoorn, Tyteca, Wehrmeyer e Wagner 38
3.5.4. Modelo Schwarz, Beloff e Beaver 39
3.5.5. Modelo EPA US 40
3.5.6. Modelo Hay e Noonan 42
3.5.7. Modelo ISO 14031 43
3.5.8. Modelo Labuschagne, Brent e Erck 47
3.5.9. Modelo da Associação dos Engenheiros Alemães 52
3.5.10. Modelo Global Reporting Initiative 54
3.5.11. Modelo do Instituto dos Engenheiros Químicos 61
3.5.12. Modelo do Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável 64
3.5.13. Modelo Veleva e Ellenbecker 66
3.5.14. Modelo Azapagic 68
3.6. Análise comparativa dos modelos de avaliação de desempenho 69
3.6.1. Análise comparativa para a dimensão ambiental 70
3.6.2. Análise comparativa para a dimensão econômica 72
3.6.3. Análise comparativa para a dimensão social 74
4. Características dos processos de retificação e torneamento 76
4.1. Retificação 76
4.1.1. Tipos de processo de retificação 77
4.1.2. Rebolo 78
4.1.3. Dressagem 78
4.1.4. Ciclo de retificação 79
4.1.5. Parâmetros de retificação 80
4.2. Torneamento 81
4.2.1. Tipos de processo de torneamento 82
4.2.2. Parâmetros de torneamento 82
4.3. Custos de produção 83
4.4. Comparação dos processos de retificação e de *hard turning* 84
5. Metodologia de Pesquisa 86

5.1. Método de pesquisa 86
5.2. Procedimentos metodológicos 88
5.2.1. Análise Hierárquica de Processos (AHP) 90
5.3. Etapas do desenvolvimento da pesquisa 91
6. Método proposto para a avaliação de desempenho em sustentabilidade 96
6.1. Definição do objetivo e escopo de avaliação 97
6.2. Seleção dos principais aspectos de desempenho em sustentabilidade 100
6.2.1. Análise comparativa dos modelos de medição de desempenho 101
6.2.2. Análise comparativa de relatórios de sustentabilidade de empresas-modelo 106
6.2.3. Lista de aspectos de desempenho principais obtidos das análises estatísticas 110
6.3. Identificação dos indicadores de sustentabilidade 112
6.4. Definição de metas de desempenho 114
6.5. Coleta de dados de desempenho 115
6.6. Avaliação do desempenho em sustentabilidade 116
6.7. Elaboração de relatórios de sustentabilidade 121
6.8. Ações visando à melhoria da sustentabilidade 121
7. Aplicação do método em análise experimental 123
7.1. Banco de ensaios e bases de referência 124
7.2. Condições de usinagem 124
7.3. Matriz de correlação para seleção dos indicadores de sustentabilidade 126
7.3.1. Processo de retificação 127
7.3.2. Processo de torneamento 131
7.4. Coleta de dados para os processos de retificação e torneamento 133
7.4.1. Processo de retificação 134
7.4.1.1. Dimensão ambiental 134
7.4.1.2. Dimensão social 135
7.4.1.3. Dimensão econômica 136
7.4.2. Processo de torneamento 137
7.4.2.1. Dimensão ambiental 138
7.4.2.2. Dimensão social 139
7.4.2.3. Dimensão econômica 139
7.5. Avaliação do desempenho em sustentabilidade 141
7.5.1. Análise dos indicadores de sustentabilidade 141
7.5.1.1. Energia 141
7.5.1.2. Materiais e substâncias auxiliares 142
7.5.1.3. Emissões, efluentes e resíduos 143
7.5.1.4. Relações trabalhistas 144
7.5.1.5. Saúde e segurança 144
7.5.1.6. Treinamento e educação 147
7.5.1.7. Garantias e obrigações 148
7.5.1.8. Custos de produção 149
7.5.1.9. Retorno sobre investimentos 151
7.5.1.10. Custos de fim de vida 152
7.5.2. Índice agregado de sustentabilidade 153
7.5.2.1. Cenário 1 – Retorno econômico e obediência a normas e leis ambientais 157
7.5.2.2. Cenário 2 – Produção mais limpa 159
7.5.2.3. Cenário 3 – Produção sustentável 160
7.6. Síntese dos resultados (Relatório de sustentabilidade) 161
8. Conclusão 163

1. Introdução

O presente trabalho foi elaborado visando contribuir para a integração do conceito de desenvolvimento sustentável ao processo de gestão de manufatura[1]. Essa área vem enfrentando o desafio de incorporar a visão do tripé da sustentabilidade, ou resultado triplo (parâmetros econômicos, ambientais e sociais), e seu escopo multidisciplinar ao processo de tomada de decisão, para atender a um novo conjunto de exigências que envolvem maior respeito ao meio-ambiente e a sociedade.

As atividades de manufatura desempenham papel fundamental na melhoria dos padrões de sustentabilidade da sociedade atual. Considerando somente a indústria brasileira, entre 1994 e 2007, as suas emissões de carbono cresceram 77%. De acordo com reportagem de jornal com grande circulação, "apesar do desmatamento ainda ser a principal fonte de CO_2 no Brasil, os combustíveis e a indústria passam e ter uma importância muito maior como poluidores do que há 13 anos" (PARAGUASSÚ, 2009).

Durante esse capítulo deverá ser apresentado o escopo da pesquisa de doutorado, trazendo inicialmente uma descrição do problema abordado. Em seguida, são apresentados os objetivos, assim como as justificativas. Por fim, é feita uma breve descrição da estrutura do trabalho.

1.1. Apresentação do problema

O termo desenvolvimento sustentável tornou-se difundido após a reunião da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento em 1987, por meio do relatório Brundtland, documento intitulado "Nosso Futuro Comum". Durante essa reunião, foi criada a definição mais conhecida e aceita sobre desenvolvimento sustentável: "aquele que permite as gerações atuais satisfazer suas necessidades sem comprometer a capacidade das futuras gerações" (WCED, 1987, p.46). Os detalhes desse documento foram ratificados cinco anos mais tarde por meio da Agenda 21, durante a Conferência das Nações Unidas para o Meio-Ambiente e Desenvolvimento, ou Eco 92 (*Earth Summit*), realizada na cidade do Rio de Janeiro.

[1] Manufatura é o uso de máquinas, ferramentas e mão-de-obra para a produção de produtos para uso ou venda. O termo pode se referir a uma ampla variedade de atividades humanas, do artesanato a alta tecnologia, mas é mais comumente aplicada a produção industrial, na qual recursos materiais são transformados em produtos acabados em larga escala (KALPAKJIAN, 2001).

Os processos de manufatura foram mencionados durante a Eco 92 como um fator chave para a sustentabilidade global (SITARZ, 1994). Um novo paradigma apareceu então, a necessidade de migrar dos meios tradicionais de produção para a chamada "manufatura verde". Enquanto os sistemas de produção tradicionais são desenvolvidos para proporcionar somente eficiência, precisão e custos baixos, os novos modelos também passaram a ser orientados para a sua sustentabilidade. Um novo cenário desafiador toma forma para as empresas de manufatura, no qual existe menor disponibilidade de recursos e maior pressão de diferentes *stakeholders*[2] e da sociedade por melhores padrões de conduta e ética nos negócios.

No ambiente de negócio, era comum a crença de que para se aprimorar a qualidade ambiental, as companhias deviam aumentar seus gastos com produtos e processos. Em outras palavras, existia a idéia de um *trade-off*[3] aplicado às empresas com responsabilidade ambiental: economia *versus* meio-ambiente. Porter e Lindle (1995), por sua vez, estavam entre os primeiros a se posicionar contra essa crença, afirmando que a poluição deveria ser tratada como uma fonte de perda econômica. Quando sucata, substâncias tóxicas ou fontes de energia são rejeitadas para o ambiente na forma de poluição, este é um sinal de que recursos estão sendo usados insuficientemente e de forma não efetiva. Comprovando esse ponto de vista, pesquisas recentes têm demonstrado que a adoção de padrões sustentáveis em diferentes atividades não traz apenas benefícios ambientais e sociais, mas também melhora o valor econômico da firma (FIKSEL *et al.*, 1999; RUSINKO, 2007).

Dentro desse novo cenário, voltado ao desenvolvimento das atividades das empresas rumo a "manufatura verde", um importante obstáculo vêm sendo a ausência de ferramentas gerenciais que auxiliem na gestão dos processos e seus recursos, seja no projeto de novas fábricas, ou mesmo, no gerenciamento do dia-a-dia das operações (SCHALTEGGER *et al.*, 2002). Dessa forma, algumas questões sobre o tipo e conteúdo dessa gestão para a "manufatura verde" podem ser abordadas:

- Pensando em modelos sustentáveis, qual seria a melhor configuração de recursos para o projeto de novos processos de manufatura, i.e., qual seria o seu real desempenho em sustentabilidade?

---

[2] O termo *stakeholder* pode ser definido como todo aquele passível de ser afetado pelas ações da empresa, incluindo o grupo interno (empregados, gerentes e proprietários) e externo (fornecedores, sociedade, governo, credores, acionistas e clientes) a organização.

[3] Essa idéia aparece da experiência de empresas que foram empenhadas a realizar grandes investimentos em equipamentos de controle e limpeza de poluentes para melhorar o desempenho ambiental de seus processos.

- Como integrar junto a área de gestão de manufatura, um sistema de suporte a decisão com novos aspectos de desempenho de áreas inteiramente distintas, i.e., parâmetros ambientais, parâmetros sociais e parâmetros econômicos?
- Como tornar compatível o resultado econômico e os desdobramentos ambientais e sociais dos processos de manufatura?

Schaltegger *et al.* (2002) apresentou um conjunto de instrumentos a serem aplicados na gestão de processos de manufatura. Entre os diferentes instrumentos, os indicadores de desempenho são aqueles que conseguem fornecer um amplo suporte ao desafio de integrar os objetivos econômicos, sociais e ambientais. Indicadores de desempenho correspondem a representações condensadas de fatos que podem ser armazenadas de forma qualitativa ou quantitativa, este podendo ser dividido em medidas absolutas ou relativas. Tais indicadores servem como importantes direcionadores de gestão, de acordo com a idéia "o que é medido, pode ser gerenciado".

Seguindo essa tendência, diferentes modelos de medição de desempenho têm sido usados para avaliar a sustentabilidade de empresas e seus processos de manufatura. Tais modelos vieram uniformizar o processo de desenvolvimento de indicadores e colaborar para a medição de desempenho em sustentabilidade, fornecendo informações confiáveis aos *stakeholders*, sem a contrapartida de elevados custos e tempo de análise. Alguns exemplos conhecidos internacionalmente de modelos de medição de desempenho são:

- Guia para elaboração de relatórios de sustentabilidade do *Global Reporting Initiative* (GRI, 2006);
- Indicadores de sustentabilidade elaborados pelo Instituto dos Engenheiros Químicos do Reino Unido (IChemE, 2002);
- Modelo para mensuração da sustentabilidade desenvolvido pela Associação dos Engenheiros Alemães (VDI, 2006);
- Modelo para mensuração da sustentabilidade desenvolvido pelo Conselho Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD, 2000).

Entretanto, os modelos estudados apresentam algumas limitações que prejudicam a avaliação adequada do desempenho em sustentabilidade. Normalmente estes modelos são concebidos com a função de auxiliar as empresas a reportar seus resultados à sociedade, por meio de Relatórios de Sustentabilidade, sem o objetivo paralelo bem definido de auxiliar na gestão de processos de manufatura. Entre as principais limitações é válido citar:

- Ausência de orientações no modo como identificar e avaliar os principais aspectos de desempenho em sustentabilidade. Muita atenção deve ser dedicada à seleção criteriosa dos indicadores e também a sua construção, visto que essa é uma limitação central dos processos de medição de desempenho. Como princípio básico, o quadro de indicadores deve estar associado de forma bem definida aos objetivos e atributos do processo de manufatura em questão;
- Não são detalhados procedimentos para a obtenção de indicadores agregados de sustentabilidade a partir de diferentes indicadores unidimensionais. Alguns modelos oferecem orientação de como se desenvolver indicadores bidimensionais, porém nenhuma orientação foi obtida para indicadores tridimensionais.

Em vista das limitações apresentadas, a pesquisa visou preencher o problema da falta de um método estruturado para a medição de desempenho em sustentabilidade de processos de manufatura. Ainda não existe um processo de medição de desempenho em sustentabilidade que seja capaz de integrar os indicadores de sustentabilidade ao processo de gestão de manufatura, um processo contínuo de análise, diagnóstico e melhoria.

As informações a serem geradas por um método estruturado de medição de desempenho em sustentabilidade forneceriam valioso auxílio ao processo de tomada de decisão em gestão de manufatura. Por meio de indicadores relevantes e robustos, compostos por métricas de diferentes tipos, p.ex. medidas tridimensionais, poderiam ser gerados gráficos ou quadros de indicadores para análises rápidas de desempenho.

1.2. Objetivos

Os objetivos foram desdobrados em dois grupos diferentes. Inicialmente é apresentado o objetivo geral do projeto de pesquisa e, em seguida, os objetivos específicos.

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo central do trabalho é desenvolver um método estruturado para a avaliação de desempenho em sustentabilidade, capaz de comparar e classificar os diferentes tipos de processos de manufatura. O método proposto deverá fornecer uma visão integrada dos aspectos que devem ser considerados na avaliação dos processos, tornando as empresas aptas a lidar com a maior complexidade de decisão no cenário atual. Destaca-se ainda, que as decisões resultantes do presente método deverão ser amparadas de acordo com o conceito do

resultado triplo, ou *triple bottom line*, que contempla os parâmetros econômicos, ambientais e sociais simultaneamente.

1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos têm por função explicitar os detalhes e os desdobramentos do objetivo geral (SILVA; MENEZES, 2005). Constituem objetivos específicos da pesquisa:

- Estudar e sintetizar os principais níveis de maturidade e aspectos de controle em sustentabilidade para sistemas de produção;
- Apresentar o processo de medição de desempenho em sustentabilidade e os seus tipos de indicadores;
- Identificar e estudar os principais modelos de medição de desempenho que foram concebidos para analisar a sustentabilidade de empresas em diferentes níveis;
- Elaborar lista de aspectos-chave de desempenho em sustentabilidade para processos de manufatura;
- Analisar e comparar o desempenho em sustentabilidade de dois processos de usinagem que concorrem entre si em faixas estreitas de operação;
- Calcular indicador agregado de sustentabilidade para os dois processos de usinagem

1.3. Justificativa

Mesmo atualmente, ainda não é conferida a devida importância em demonstrar racionalmente como se deve proceder durante o processo de decisão. Um dos desafios principais da gestão de sustentabilidade é justamente o desenvolvimento de métodos e ferramentas para avaliar adequadamente o desempenho de processos de manufatura, tanto em termos financeiros, quanto em termos não financeiros (HAY; NOONAN, 2005). A concepção de processos de manufatura que sejam "verdes" é uma demanda atual da sociedade e também, uma oportunidade competitiva para as empresas (SCHWARZ; BELOFF; BEAVER, 2002; VDI 4070, 2006).

De acordo com Schaltegger *et al.* (2002), um sistema de indicadores[4] deve apresentar uma estrutura elaborada para um propósito, com a intenção de evitar ambigüidade e facilitar a

[4] Um sistema de indicadores é constituído de vários indicadores suplementares interligados por uma conexão lógica (Schaltegger *et al.*, 2002).

interpretação das informações, fornecendo assim, uma visão integrada e conclusiva a partir dos diferentes indicadores individuais. Ainda de acordo com o autor, os indicadores ou sistemas de indicadores são ferramentas de gestão para a contabilidade e controle e podem ser usados efetivamente no direcionamento de processos de manufatura.

Logo, um método estruturado para a avaliação de desempenho em sustentabilidade será útil para viabilizar uma gestão mais atualizada e responsável dos processos de manufatura. Por meio de um conjunto robusto de indicadores de sustentabilidade, selecionados a partir de uma análise cuidadosa das entradas e saídas dos processos de manufatura, será possível fornecer subsídios aos processos de tomada de decisão.

Com relação à análise experimental, a investigação do desempenho em sustentabilidade dos processos de torneamento e retificação é fundamental para validar o modelo proposto e também para compreender o real desempenho dos processos de usinagem, visto que em outros trabalhos, estes foram mencionados como sistemas de produção com grande pegada ecológica[5] (BANISZEWSKI, 2005). Essa autora cita, como exemplo, que somente 57% da energia consumida pelas máquinas de retificação é devidamente usada para a remoção de material.

1.4. Estrutura do trabalho

O trabalho de pesquisa é composto por oito capítulos. No primeiro capítulo foi abordado o problema, os objetivos e a justificativa que estão associados ao tema de pesquisa. No capítulo seguinte, é tratado do tópico sustentabilidade em processos de manufatura. No terceiro capítulo é feita uma extensa revisão sobre o assunto medição de desempenho em sustentabilidade. O quarto capítulo apresenta as características principais dos processos de retificação e torneamento. No capítulo subseqüente, é tratada da metodologia de pesquisa e suas etapas de desenvolvimento. O capítulo seguinte apresenta o método proposto para a avaliação de sustentabilidade de processos de manufatura. O capítulo sete envolve a análise experimental da sustentabilidade em usinagem, importante para validar o modelo proposto anteriormente. Por fim, o capítulo oito apresenta as considerações finais e sugestões para trabalho futuros.

[5] "A pegada ecológica mensura a quantidade de terra biologicamente produtiva e o volume de água necessário para suportar as demandas de uma população ou atividade produtiva" (KITZES; WACKERNAGEL, 2009, p.812).

2. Sustentabilidade em processos de manufatura

Muitas empresas estão interessadas em investigar o desempenho de seus processos em relação aos aspectos de sustentabilidade, isto porque a sustentabilidade é capaz de fornecer um *framework*[6] para a integração dos interesses ambientais, sociais e econômicos às estratégias de negócio. A sustentabilidade de negócios pode ser definida como a "adoção de estratégias e ações que atendam às necessidades das empresas e dos diferentes *stakeholders*, enquanto protegem, mantém e melhoram os recursos humanos e naturais com vistas ao futuro" (DELOITTE; TOUCHE, 1992[7] *apud* LABUSCHAGNE; BERT; VAN ERCK, 2005, p.373).

As motivações das empresas em desenvolverem projetos com sustentabilidade não são totalmente altruístas. Pesquisas demonstraram que a sustentabilidade não se limita somente a benefícios ambientais e sociais, mas também melhora o valor econômico da firma (FIKSEL; MCDANIEL; MANDENHALL, 1999). Além disso, não é possível nos dias atuais pensar em desenvolvimento econômico sem a paralela preservação do meio-ambiente e no benefício mútuo da sociedade Segundo Schwarz, Beloff e Beaver (2002, p.58), "é uma premissa da sustentabilidade que o bem estar econômico esteja inexoravelmente ligado a preservação do meio-ambiente e ao bem estar da população".

Como está descrito no guia desenvolvido pelo Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD, 2001), a sustentabilidade oferece benefícios igualmente as empresas e a sociedade. O êxito econômico deve ser acompanhado por um meio mais justo e igualitário, onde o meio-ambiente seja protegido e aprimorado. Governos que criarem condições que recompensem a sustentabilidade e favoreçam a competitividade das empresas ditas "responsáveis", contribuirão para uma economia mais sustentável.

Porter e Linde (1995) afirmam que as empresas mais competitivas são aquelas que utilizam melhor os seus recursos. "As nações e companhias mais competitivas não são aquelas que utilizam os recursos de menor custo, mas aquelas que empregam as tecnologias mais avançadas e os melhores métodos no controle de seus recursos" (PORTER; LINDLE, p.133). Como as tecnologias estão constantemente mudando, o novo paradigma da

[6] A sustentabilidade permite integrar o conceito do resultado triplo nas ferramentas e rotinas existentes nas empresas, criando dessa forma, um escopo para integração deste tema nos processos de planejamento e tomada de decisão.

[7] DELOITTE, I; TOUCHE, W. Business strategy for sustainable development: leadership and accountability for the 90's. Winnipeg: IISD, 1992.

competitividade global requer que os recursos sejam usados com eficiência, sejam recursos naturais ou físicos, humanos ou de capital.

Como está representado na Figura 2.1, a idéia a ser defendida nos tempos atuais é: "acima a economia e a qualidade de vida, abaixo a utilização de recursos e a poluição" (WBCSD, 2000, p.23). As linhas contínuas, na Figura 2.1, mostram o ponto de desenvolvimento atual e as linhas em tracejado, as perspectivas para o futuro após a adoção de modelos econômicos mais eficientes. A economia e a qualidade de vida devem continuar a subir, enquanto a utilização de recursos e a poluição devem cair. Segundo os autores, é necessária uma melhora da qualidade de vida para todos os setores da sociedade, porém acompanhado por um ambiente natural preservado e equilibrado.

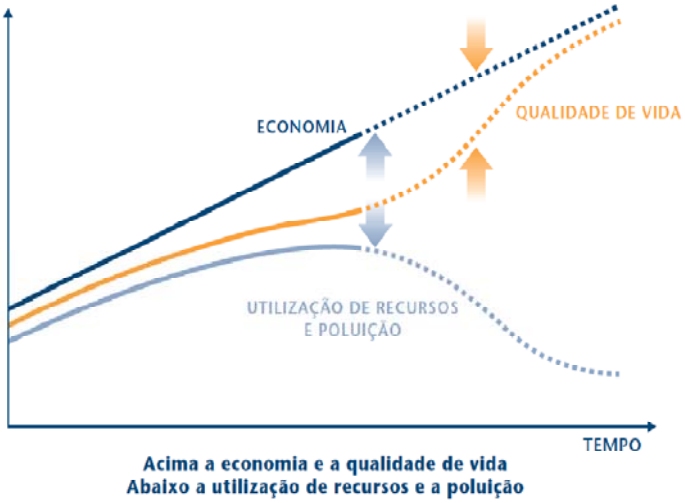


Figura 2.1 – Sustentabilidade e objetivos para um modelo econômico mais eficiente.

Fonte – WBCSD, 2001, p.25.

Os engenheiros podem participar da construção de sistemas de produção sustentáveis criando tecnologias com bom desempenho econômico e socioambiental. O projeto de novos sistemas de produção deve intensificar o esforço para prevenir perdas e geração de resíduos pelo desenvolvimento de processos mais limpos. Na seção 2.2 serão abordadas as características associadas a processos sustentáveis.

Muitas oportunidades aparecem de práticas sustentáveis de manufatura. Tomando, por exemplo, o caso do uso de recursos materiais em projetos de produtos e processos, bons resultados podem aparecer da reciclagem e coleta de materiais, utilização de materiais substitutos que proporcionam menos perdas, produtos com tempo de vida útil superior ou ainda, a possibilidade de recuperação de partes de produtos em seu final de vida (CASCIO, 1996).

De acordo com Jin e High (2004), relatórios que abordam diretamente a sustentabilidade constituem uma das maiores oportunidades de vantagem competitiva. Em 2004, 45% das 250 maiores companhias dos Estados Unidos separavam o relatório corporativo na modalidade sustentabilidade (o que incluem os aspectos sociais e ambientais). Analisando o grupo das 100 maiores empresas, 36% adotavam ainda alguma espécie de indicador de desempenho em sustentabilidade. Jin e High (2004) explicam que para alguns setores, p.ex. químico, mineração, papel e celulose, a comunicação de indicadores de sustentabilidade alcança a marca de 100%.

Entre os objetivos pretendidos pelas empresas com a adoção de uma estratégia que vise à sustentabilidade, têm-se: obtenção de informações para o *benchmarking* interno e externo de suas atividades, obediência a leis e normas, melhora na imagem da companhia e finalmente, monitoramento constante visando à melhoria da eficiência operacional no tempo. As ações de *benchmarking* fazem parte dos programas de melhoria contínua, onde medidas de desempenho da organização são comparadas com valores de referência.

A evolução dos sistemas de produção rumo a modelos sustentáveis pode ser resumido em quatro diferentes estágios. Na Figura 2.2 está representada a evolução dos sistemas de produção rumo a modelos sustentáveis.

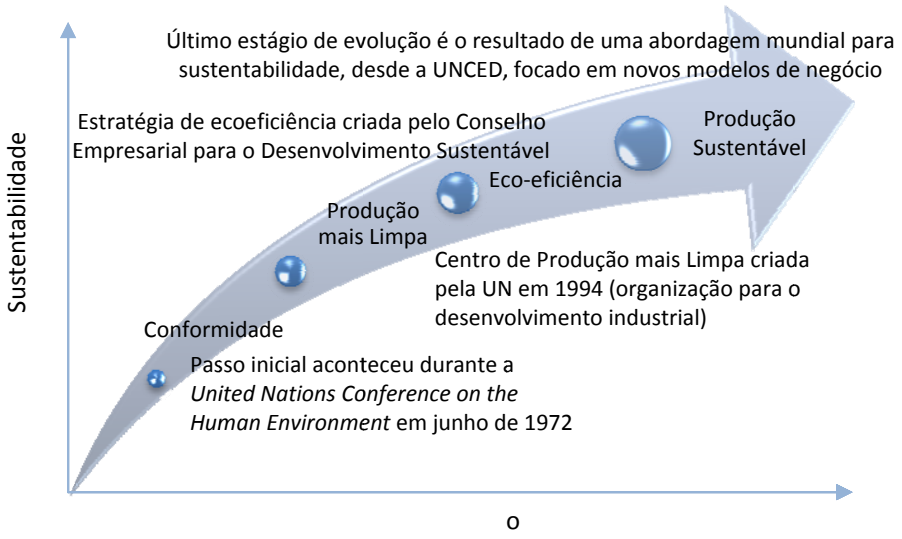


Figura 2.2 – Evolução dos sistemas de produção rumo a modelos sustentáveis.

Fonte – Autor.

Primeiramente optou-se pelo controle do tipo gestão de conformidade, ou *compliance management*. Em seguida, passou-se a atuar ativamente através da produção mais limpa. A eco-eficiência veio em seguida, contribuindo pela primeira vez para o desenvolvimento econômico ao mesmo tempo em que promovia a proteção do meio-ambiente. Então,

finalmente, surgiu a abordagem na qual o setor privado veio a equilibrar as suas ações de acordo com os três pilares da sustentabilidade – justiça social, prosperidade econômica e balanço ecológico (WBCSD, 2001). Este último modelo é conhecido como responsabilidade corporativa, ou *responsible entrepreneurship*. Hoje em dia, a gestão empresarial concentra-se no desenvolvimento e implementação de uma estratégia de negócios, que engloba a visão de sustentabilidade.

Como foi comentado anteriormente e também pode ser visto na Figura 2.2, os projetos de novos sistemas de produção adotaram, primeiramente, as práticas voltadas para o tratamento de perdas e resíduos, também chamada de abordagem de "fim de tubo". A substituição do tratamento pela prevenção na geração de perdas e resíduos tornou os processos mais limpos e eficientes, uma condição para o desenvolvimento sustentável. Em seguida, os modelos sustentáveis de produção representam a tendência de vanguarda, ao trazer a dimensão adicional de equidade e bem social, em conjunto com a geração de valor econômico, para o planejamento das empresas (BARBIERI, 2007). A seguir estão detalhadas as diferentes abordagens propagadas nas últimas décadas visando melhorar o desempenho dos sistemas de produção.

2.1. Controle ao final do processo, ou abordagem do tipo *end-of-pipe*

As tecnologias para o controle da poluição, diferentemente das tecnologias de prevenção de poluição, têm a função de tratar e dispor poluentes ou subprodutos tóxicos liberados ao final de processos produtivos. Para alcançar tal objetivo, são acrescentados aos sistemas de produção novos equipamentos e operações. Por meio da instalação de controles e tecnologias para essa função, não ocorre qualquer alteração na quantidade de poluição produzida, somente na qualidade do seu tratamento, sendo por esse motivo denominado controle do tipo *end-of-pipe* (KLASSEN; WHYBARK, 1999).

Rusinko (2007) também explica que o controle ao final do processo é uma abordagem que se refere tipicamente à armazenagem, tratamento e/ou disposição da poluição depois que é criada. Uma característica das tecnologias voltadas ao controle da poluição é não contribuir para a diminuição da geração de novos poluentes. Qualquer benefício de tal abordagem advém da diminuição do risco associado à presença de substâncias poluentes, transformando as substâncias em compostos mais seguros, ou mesmo as convertendo em substâncias benignas.

A crença de que para aprimorar a qualidade ambiental é preciso elevar os custos de produção é uma conseqüência de tal estratégia de controle ambiental das operações. Porter e Linde (1995) afirmam que a visão preponderante de um *trade-off* inerente e fixo, entre meio-ambiente e economia, surgiu da abordagem *end-of-pipe*. Um exemplo de controle de poluição é a instalação de filtros em instalações para a descarga de gases, com o objetivo de prevenir o lançamento de substâncias tóxicas na atmosfera.

Medidas de controle do tipo *end-of-pipe* são vistas como custosas e não produtivas uma vez que não proporcionam um potencial para vantagens competitivas. Estão preocupadas basicamente em atender padrões de controle, sem procurar superar tais limites. Dessa forma, a regulação ambiental que patrocina tal abordagem é responsável por manter as características dos sistemas de produção estáticos e não promover a melhoria continua (WBCSD, 1998).

Segundo Porter e Linde (1995), um problema enfrentado pelas empresas que buscam por melhor controle da poluição é a necessidade de assumir investimentos em equipamentos que não proporcionam ganhos de produção. Ao invés de adotarem medidas que diminuam a geração de poluentes, direcionam grande atenção para a identificação e disposição de resíduos – uma abordagem custosa. Somente nos anos mais recentes, a estratégia de produção mais limpa passou a ser adotado por empresas nas suas práticas de gestão.

2.2. Produção mais limpa

O conceito de produção mais limpa surgiu em 1989, patrocinado pela UNEP (*United Nations Environmental Program*), com o intuído de minimizar os impactos ambientais dos sistemas de produção. Produção mais limpa pode ser interpretada como a "aplicação contínua de uma estratégia de prevenção ambiental voltada a produtos e processos com o objetivo de diminuir os riscos ao meio-ambiente e a população" (UNEP, 1996, p.5).

O Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável, ou WBCSD (1998), argumenta que a produção mais limpa vem a incorporar o uso mais eficiente dos recursos naturais e desse modo minimizar a geração de resíduos e poluição, bem como os riscos a saúde humana e a sua segurança. Em resumo, ela lida com os aspectos ambientais na sua fonte e não no final do processo, sobrepondo-se a abordagem do tipo *end-of-pipe*.

Definir as fontes causadoras e não os efeitos dos impactos ambientais é uma estratégia positiva para o negócio e para o meio-ambiente. É possível afirmar que prevenir poluição e resíduos vem a ser um investimento que se contrapõe aos custos finais elevados associados às atividades de limpeza. Para os processos de manufatura, produção mais limpa inclui

economizar recursos materiais e energia, reduzir o uso de substâncias tóxicas e reduzir a quantidade e toxicidade de todas as emissões e resíduos. Para produtos, envolve reduzir os efeitos negativos através do seu ciclo de vida, da extração dos recursos materiais até a sua disposição final. Já para serviços, cuidados especiais são aplicados no momento do seu planejamento e execução (WBCSD, 1998).

A UNEP (1996) expõe os seguintes meios para alcançar a produção mais limpa: aprimoramento das operações, boa manutenção e organização interna (*housekeeping*), modificação de processos, mudança nas plantas produtivas e equipamentos, substituição de materiais tóxicos ou recursos e melhores projetos de produtos.

O uso de tecnologias amigáveis ao meio-ambiente também é uma ação importante na busca por melhores resultados. Tais tecnologias devem ser menos poluidoras, usar os recursos de uma maneira sustentável, possibilitar a reciclagem com maior intensidade de seus descartes e produtos, e lidar com os seus resíduos de uma forma mais aceitável do que outras tecnologias para os quais são substitutos (HAY; NOONAN, 2005).

A produção mais limpa proporciona a vantagem de ser uma abordagem mais efetiva em custo e não somente um meio de controlar a poluição, i.e., aumenta a eficiência do processo pela melhora da qualidade do produto e da minimização de poluição, resíduos e perdas geradas. Essa foi à solução para lidar com os custos crescentes do tratamento do tipo *end-of-pipe* e com a pressão por processos não causadores de impacto ambiental. A produção mais limpa também envolve uma mudança de atitude ao adotar uma gestão ambiental responsável e uma avaliação criteriosa das opções tecnológicas. Em resumo, é uma maneira eficiente de operar processos, manufaturar produtos e prover serviços, promovendo a redução dos custos associados a resíduos e emissões, o que vem a gerar no final, vantagens competitivas que podem auxiliar na abertura de novos mercados à empresa.

Os esforços para eliminar poluição sob a ótica da produção mais limpa seguem a mesma lógica dos programas de gestão da qualidade. Usar recursos mais eficientemente, eliminar a necessidade por substâncias tóxicas e materiais de difícil manipulação, ou ainda, abolir operações desnecessárias, são exemplos de ações que servem a ambos os propósitos. Porter e Lindle (1995) dizem que não é de se espantar a Gestão da Qualidade Total tenha se tornado uma fonte de idéias para a redução da poluição, já que a busca por maior produtividade e a visão de cadeia estendida (fornecedores, distribuidores e demais parceiros de negócios) são aspectos fundamentais para a melhoria do desempenho ambiental.

Rusinko (2007) estudou a relação existente entre as práticas de produção mais limpa, i.e., prevenção da poluição e responsabilidade de produto[8] (p.ex. redução do consumo de energia), e os resultados competitivos específicos da manufatura (p.ex. redução dos custos de produção), além de outros desdobramentos para a empresa (p.ex. melhoria da imagem da companhia). A hipótese defendida adota a perspectiva de que poluição está relacionada com a perda de produtividade, seja pelo uso em excesso de recursos, falta de qualidade nos processos, ou mesmo, pela falta de políticas para melhoria e inovação.

Para comprovar tal hipótese, foi realizada pelo autor uma pesquisa de campo junto às empresas do setor têxtil dos EUA. Os resultados competitivos foram mensurados pelo custo de manufatura e da qualidade do produto. As vantagens competitivas em potencial incluem a imagem da empresa, a habilidade em atrair novos clientes e a promoção de novas idéias. Na Figura 2.3 estão representados os dados colhidos através da pesquisa de campo.

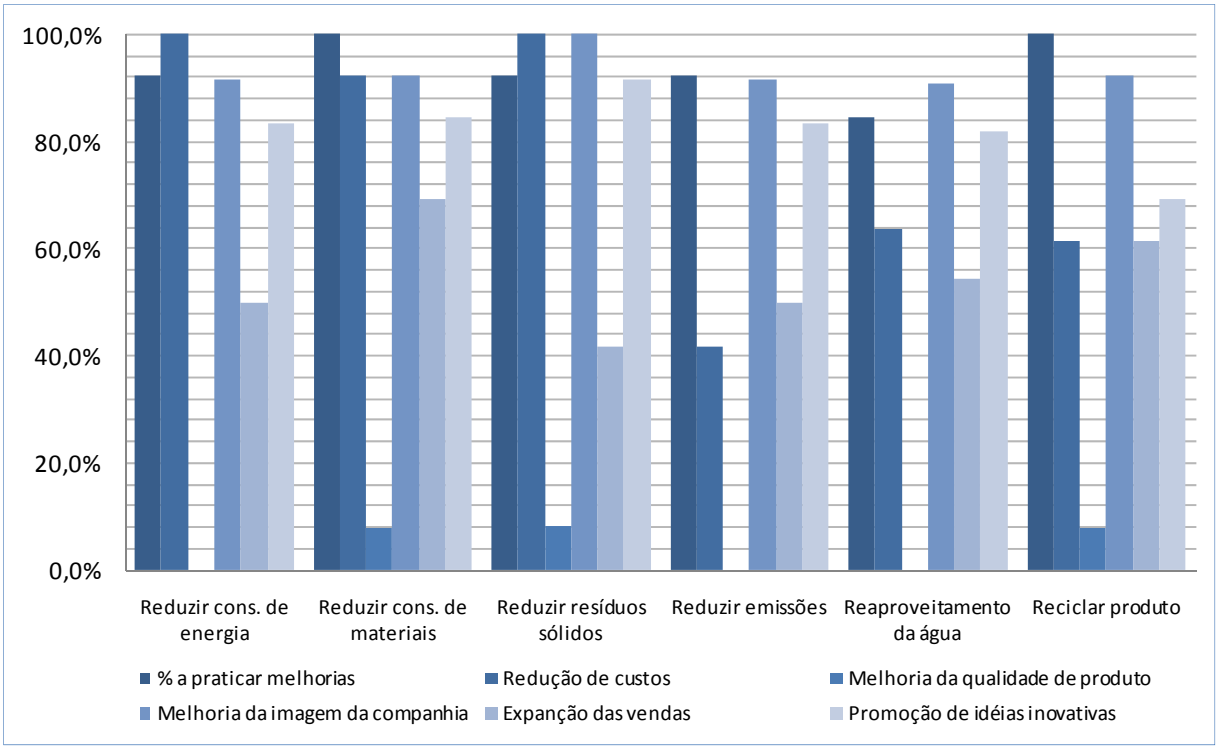


Figura 2.3 – Desdobramentos positivos do programa de produção mais limpa.

Fonte – Adaptado de RUSINKO, 2007.

Analisando os resultados obtidos é possível comprovar que as práticas de produção mais limpa, realmente, trouxeram desdobramentos positivos às empresas pesquisadas, p.ex.,

[8] Enquanto as práticas de prevenção da poluição estão orientadas basicamente para as operações de manufatura, a responsabilidade de produto aplica a perspectiva ambiental para toda a cadeia de valor, incluindo outros *stakeholders* como Pesquisa e Desenvolvimento, Designers e Fornecedores. Exemplos de práticas incluem o reprojetar produtos e processos para serem mais amigáveis ao meio-ambiente, usando recursos renováveis e encorajando os fornecedores a adotarem a prevenção da poluição e a responsabilidade de produto. Tais práticas também resultam em vantagem competitiva (RUSINKO, 2007).

medidas adotadas para reduzir a quantidade de resíduos sólidos implicaram em desdobramentos positivos para os cinco aspectos de desempenho considerados. Entre as empresas pesquisadas que promoveram melhorias visando à diminuição da geração de resíduos (92,3%), como conseqüência, desfrutaram de uma melhor imagem perante aos *stakeholders* (100%) e de uma redução de custos (100%), além de terem favorecido a difusão de novas idéias (91,7%), a expansão das suas vendas (41,7%) e a melhoria da qualidade dos seus produtos (8,3%).

Continuando a analisar as ações implementadas dentro dos programadas de produção mais limpa, representadas na Figura 2.3, a redução do consumo de materiais e a promoção de práticas de reciclagem foram práticas mais comuns, ambas com uma adesão de 100%. Os desdobramentos positivos que foram mais desfrutados, por sua vez, incluem a melhoria da imagem da companhia e a redução de custos.

2.3. Eco-eficiência

A melhoria da condição ambiental e a prosperidade econômica são prioridades simultâneas no mundo global. A eco-eficiência oferece a oportunidade de atender a estes dois objetivos. O conceito de eco-eficiência foi introduzido em 1992 pelo WBCSD, com a finalidade de demonstrar as oportunidades econômicas da sustentabilidade ambiental (WBCSD, 2000). Schwarz, Beloff e Beaver (2002) definem eco-eficiência como sendo a conexão do conceito de criação de valor para o negócio com o desempenho ambiental. De acordo com os autores, uma estratégia de gestão que incorpora a eco-eficiência busca criar mais valor com menos impacto. Ela permite uma produção mais eficiente e a criação de melhores produtos e serviços, enquanto reduz o uso de recursos, os desperdícios e a poluição ao longo de toda a cadeia de valor.

O WBCSD (2001) destaca que a eco-eficiência é alcançada pela oferta de bens e serviços a preços competitivos, que, por um lado, satisfazem às necessidades de consumo e ao mesmo tempo, contribuem para a qualidade de vida, reduzindo progressivamente o impacto ecológico e a intensidade de utilização de recursos ao longo do ciclo de vida (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 – Principais componentes da eco-eficiência.

Os sete componentes da eco-eficiência	
1	Reduzir a intensidade de material de produtos e serviços
2	Reduzir a intensidade de energia de produtos e serviços
3	Reduzir a dispersão tóxica
4	Aumentar a reciclabilidade de materiais
5	Aumentar o uso de recursos materiais renováveis
6	Facilitar reprocessamento do material (reduzir *material durability*)
7	Aumentar a intensidade do uso de produtos e serviços

Fonte – WBCSD, 1998.

Melhores resultados econômicos aparecem desta nova abordagem de gestão, principalmente, advindas de soluções inovadoras para produtos e serviços. Diferentes autores (WBCSD, 1998; SCHWARZ; BELOFF; BEAVER, 2002; JANSSON; PHAAL, 2002), afirmam que as empresas com maior sucesso são aquelas que estabeleceram objetivos ambientais mais difíceis e foram capazes de alcançar resultados positivos pelo emprego de novas tecnologias e práticas. Em resumo, a eco-eficiência permite que novas oportunidades de negócio tomem forma, incentivando a inovação tecnológica.

Assim como Porter e Linde (1995), os princípios da ecoeficiência também consideram a poluição como uma forma de desperdício econômico. De acordo com os autores, sucatas, substâncias tóxicas, ou energia descartada no meio-ambiente como poluição, são sinais claros de que recursos foram usados incompletamente e ineficientemente. Associado à perda de recursos, as empresas ainda devem executar atividades complementares que adicionam custos, mas não criam valor para os clientes. Um exemplo é a atividade de estocagem ou transporte.

Dentro da filosofia de eco-eficiência, o WBCSD (2001) destaca algumas ações que as empresas devem ser realizar em áreas específicas para conduzir programas de melhoria em seus sistemas de produção (Figura 2.4).

Primeiramente, é necessário efetuar a reengenharia dos processos, reduzindo o consumo de recursos e a geração de poluição. Quanto mais riscos associados aos produtos e processos forem evitados, melhor desempenho em custo é esperado. Outra medida importante envolve a valorização dos co-produtos (*by-products*), i.e., lutar por desperdício zero. Está claro para as empresas mais modernas que o chamado "desperdício" dos seus processos representa um valor econômico não aproveitado. Uma terceira ação concentra-se em realizar a reconcepção de produtos e processos, aproveitando o potencial de melhoria que surge do uso

de novas tecnologias e rotinas. Por fim, devem-se buscar novas parcerias com clientes. Trabalhar em conjunto com os clientes ou outros grupos de agentes econômicos pode auxiliar as empresas a repensar os mercados e a remodelar completamente seu plano de marketing.

Figura 2.4 – Ações visando a eco-eficiência.

Fonte – *Adaptado de* WBCSD, 2001.

O enfoque da eco-eficiência pede que as empresas concentrem esforços na produtividade de seus recursos, a fim de aprimorar o desempenho ambiental do produto e ao mesmo tempo, trazer maior competitividade para a empresa. Para planejar e monitorar tal processo faz-se necessário que sejam estabelecidas medidas de desempenho e realizadas avaliações periódicas da condição ambiental e econômica.

Produção mais limpa e eco-eficiência dividem um objetivo comum, o progresso por meio do respeito às limitações do planeta em prover recursos e suporte. Contudo, a eco-eficiência vai um pouco mais adiante ao colocar o resultado econômico justo a visão de produção mais limpa. O lado social por sua vez, não está explicitamente definido em ambas as estratégias.

2.4. Produção sustentável

Progressivamente a sociedade cobra do mundo corporativo evidências de uma gestão sustentável, com metas de desempenho e monitoramento constante das atividades de manufatura. Existe a demanda por um modelo de gestão que faça a ligação entre o conceito de

criação de valor para o negócio com a compatibilidade ecológica e social, trazendo ambos em um balanço justo (VDI 4070, 2006).

Como foi dito anteriormente, o conceito de produção sustentável surgiu em 1992 durante conferência das Nações Unidas para o Desenvolvimento e Meio-Ambiente (UNCED, 1992). Durante o encontro foi identificado o consumo elevado e a produção como grandes responsáveis pela ameaça a sustentabilidade global. Enquanto o consumo sustentável visa os consumidores, a produção sustentável visa as organizações que produzem os produtos e serviços.

Sistemas de produção sustentáveis devem atender a uma série de princípios e boas práticas já difundidas, como a economia de recursos materiais, energia e água, somadas a novas regras, principalmente voltadas a dimensão social. No Quadro 2.2 está descrita uma lista de aspectos fundamentais para melhorar a sustentabilidade das empresas. Jansson e Phaal (2002) afirmam que para se atender aos objetivos da produção sustentável, o setor industrial deve utilizar métodos aprimorados, novas práticas e processos melhorados para converter recursos e energia.

Quadro 2.2 – Princípios da Produção Sustentável.

Dimensão	Descrição
Produtos e Serviços	Produtos e serviços devem ser brandos ao meio-ambiente e seguros através do seu ciclo de vida
	Produtos e serviços devem ser desenhados para serem duráveis, reparáveis, recicláveis, compostáveis e facilmente biodegradáveis
	Produtos e serviços devem ser produzidos e empacotados com uma quantidade mínima de materiais e energia
Processos	Os desperdícios e co-produtos não benignos ao meio-ambiente 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, além das formas de energia e materiais usadas serem mais apropriadas ao objetivo final
	O local de trabalho deve ser desenhado para minimizar continuamente ou eliminar ameaça química, ergonômica e física
Trabalhadores	Seus trabalhos devem ser organizados para conservar e melhorar a eficiência e criatividade
	Sua segurança e bem estar é uma prioridade
	São encorajados e auxiliados para continuamente desenvolver seus talentos e capacidade
	Sua participação no processo de decisão deve ser incentivada
Comunidades	Comunidades relacionadas e qualquer fase do ciclo de vida são respeitadas e melhoradas economicamente, socialmente, culturalmente e fisicamente
Stakeholders	A viabilidade econômica do aumento contínuo do consumo de materiais e energia deve ser parte integrante do planejamento estratégico e da administração corporativa

Fonte – VELEVA *et al.*, 2001.

Ainda que uma empresa tenha a vontade e a energia necessária para tornar a sua manufatura mais sustentável, a maior quantidade de controles e a necessidade por mudanças e reestruturações internas nas suas operações fazem com que tal processo não seja rápido ou simples. Antes disso, é necessária a adoção de estratégias que valorizem a sustentabilidade dos sistemas de manufatura, começando com estratégias mais imediatas, focadas em instalações eficientes, até chegar à própria revisão do modelo de negócio e análise da cadeia de suprimentos. A estratégia mais efetiva para promover a sustentabilidade é focada na adoção de modelos de negócio "bem concebidos". Nesse sentido, Veleva e Ellenbecker (2001) desenvolveram um guia para a introdução de práticas sustentáveis nos sistemas de produção. Esse guia é composto por cinco níveis diferentes de profundidade para a introdução do tema sustentabilidade nos sistemas de produção (Figura 2.5). De acordo com os autores, todas as fases apresentam regras e orientações características, que somadas, passam a satisfazer a evolução para a produção sustentável.

Figura 2.5 – Guia para a introdução de práticas sustentáveis nos sistemas de produção.
Fonte – VELEVA; ELLENBECKER, 2000.

O primeiro nível corresponde à obediência a leis e requerimentos. Nesse estágio inicial, a empresa está preocupada em avaliar a extensão na qual a sua instalação ou tecnologia atende as regulações e leis ou em conformidade com padrões das indústrias ou associações, p.ex., inventário do total de liberações tóxicas, ato de segurança ocupacional e saúde, ato para o ar limpo.

O segundo nível está focado no uso eficiente de recursos e na minimização na geração de subprodutos e emissões. Os indicadores de sustentabilidade para esse estágio incluem medidas de entrada, saída e desempenho das tecnologias e plantas, como consumo de energia, resíduos ou acidentes de trabalho. Diferentemente do estágio inicial, as práticas para o nível

dois podem ser críticas para a obtenção de vantagem competitiva, uma vez que estão preocupadas em proporcionar maior eficiência.

O terceiro nível concentra esforços em planejar e controlar os efeitos em potencial das instalações e tecnologias sobre o meio-ambiente, funcionários e saúde pública, desenvolvimento da comunidade e viabilidade econômica. Busca antecipar possíveis impactos que podem ser gerados pela planta industrial. Um exemplo pertinente da avaliação do efeito negativo da planta produtiva seria o cálculo do total de gases geradores do efeito estufa (GEEs) produzidos pela fábrica durante o ano, mensurados em CO_2 equivalentes.

O quarto nível proporciona uma visão de sustentabilidade que vai além da própria firma, para considerar também a cadeia de suprimentos, distribuição do produto, uso e disposição final. O objetivo é considerar os impactos gerados durante todo o ciclo de vida do produto, considerando assim outras partes, i.e., fornecedores, distribuidores e clientes. Quando a questão envolve sustentabilidade, a responsabilidade de uma empresa envolve não somente seus processos, mas também as atividades causadas pela demanda da empresa (HAUSCHILD *et al.*, 2005). Dessa forma, é preciso adotar uma abordagem de ciclo de vida para gestão sustentável de empresas. O objetivo seria criar uma cadeia de suprimentos verdadeiramente sustentável. Para isso, deve ser aplicada uma visão holística na avaliação da sustentabilidade de processos e produtos para que as empresas não adotem soluções que transfiram o impacto ambiental para outra parte do ciclo de vida. Assim, a gestão da cadeia de suprimentos passou a assumir, além da função tradicional de gerenciar o fluxo de informações, material e capital, também a função de criar valor sustentável para toda a cadeia.

Finalmente, no último nível de evolução das firmas rumo à produção sustentável, o foco está em ajustar os sistemas de produção ao cenário de sociedade sustentável. Em resumo, o nível cinco avalia os efeitos da produção na qualidade de vida para o futuro e no desenvolvimento humano, levando em conta a capacidade de suporte do meio-ambiente. Veleva e Ellenbecker (2001) salientam que a produção sustentável não é uma atividade isolada no interior da empresa. Essa é a parte de um sistema econômico, social e ambiental da comunidade. Nesse contexto, comunidade refere-se a ambas as comunidade local e comunidade global.

Ao melhorar a sustentabilidade do negócio, as empresas passam a desfrutar de importantes vantagens competitivas. Os desdobramentos positivos da produção sustentável atingem a todos os *stakeholders*, sejam eles, consumidores, empregados ou até mesmo, autoridades e o poder público. Porter e Lindle (1995) apresentam uma lista de benefícios a serem desfrutados por produtos e processos advindos de práticas sustentáveis (Figura 2.6).

Para o caso da análise de desempenho dos produtos, resultados positivos incluem produtos com mais qualidade e consistentes, menores custos de produção (p.ex. substituição de material), menores custos com embalagens, uso mais eficiente dos recursos pelos produtos, produtos mais seguros, menores custos de disposição para os clientes, e finalmente, reuso e maior valor para o produto em final de vida.

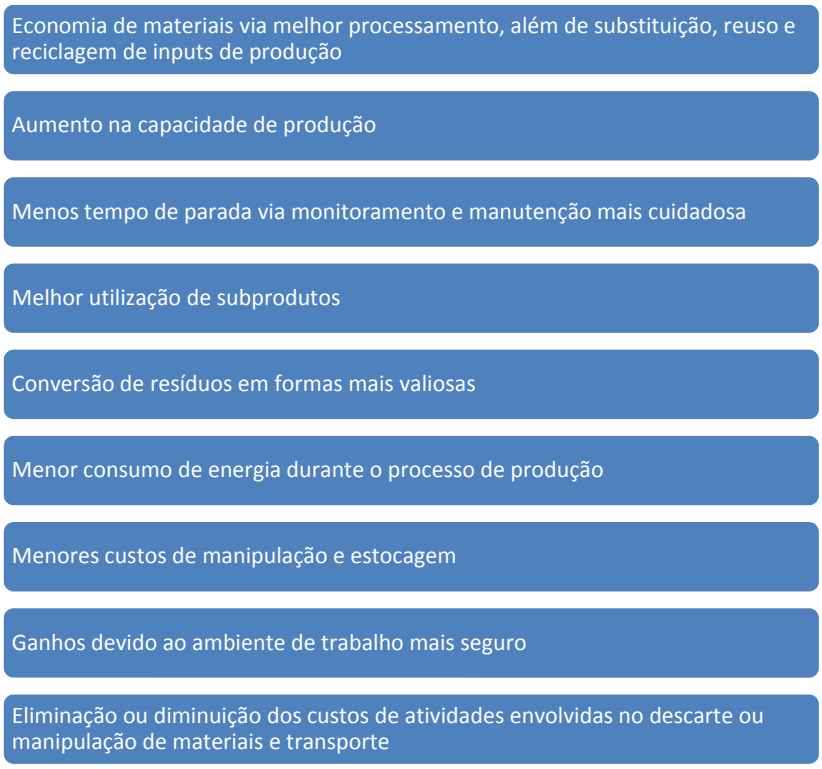


Figura 2.6 – Ganhos para processos e produtos advindo de práticas sustentáveis.

Fonte – PORTER; LINDLE, 1995.

A associação de engenheiros alemães (VDI 4070, 2006), em sua diretiva sobre gestão sustentável, também elaborou uma lista dos principais benefícios advindos da produção responsável para os diferentes *stakeholders* (Quadro 2.3). A produção sustentável é uma das preocupações da gestão sustentável.

As empresas obtêm uma série de benefícios a partir das práticas de gestão sustentável. Ganhos imediatos incluem melhor eficiência no consumo de recursos, mão-de-obra altamente qualificada, satisfação do cliente e aceitação do público. Frutos futuros incluem melhor relação com os *stakeholders* em geral e uma competitividade superior.

Quadro 2.3 – Benefícios da gestão sustentável.

Stakeholders	Dimensão econômica	Dimensão ambiental	Dimensão social
Consumidores	Entrega de "valor por dinheiro"	Proteção do meio-ambiente durante a fase de uso	Retenção de consumidores por imagem positiva
Empregados	Mão-de-obra qualificada e motivada	Menor impacto na saúde e segurança	Boas condições de trabalho e satisfação ajudam a reter bons funcionários
Fornecedores	Parceiros de negócio confiáveis e compartilhamento de informações	Integração de aspectos ambientais em produtos e processos	Fornecimento confiável e segurança no trabalho
Acionistas	Investimento atrativo	Investimentos atrativos para "investidores verdes"	Investimentos atrativos para "investidores conscientes socialmente"
Fornecedores de capital	Termos favoráveis	Redução do risco devido à abordagem de prevenção	Trabalhos seguros por efeito da minimização de riscos
Autoridades	Procedimentos simplificados	Requerimentos reduzidos	Boa comunicação e coordenação
Público em geral	Imagem de empresa de vanguarda	Imagem positiva de companhia responsável ambientalmente	Imagem positiva de companhia responsável socialmente

Fonte – VDI 4070, 2006, p.4.

3. Medição de desempenho em sustentabilidade

Entre as diferentes opções de ferramentas e métodos para avaliação e apresentação da sustentabilidade dos sistemas de produção[9], as empresas têm optado pelo uso de indicadores de desempenho. As empresas procuram aprimorar o seu desempenho baseados na idéia: o que é medido pode ser gerenciado, ou "*what get's measured, get's managed*" (PUTNAM, 2002).

O uso de indicadores de sustentabilidade tem auxiliado as empresas a identificarem e abandonarem as operações intensivas em recursos, perseguindo por modelos de produção mais eficientes (AZAPAGIC, 2004). Ao longo do capítulo é realizado um apanhado dos princípios e definições que envolvem o assunto. Os diferentes tipos e as principais aplicações gerenciais dos indicadores são apresentados em seguida. Por último, são detalhados e comparados os principais modelos de medição de desempenho em sustentabilidade, obtidos a partir de revisão da literatura.

3.1. Princípios e definições

A idéia conceitual da medição de desempenho em sustentabilidade consiste em coletar dados mensuráveis e rastreáveis das firmas que reflitam os principais aspectos ou pontos de pressão. O grande desafio é gerar e disseminar informações para a tomada de decisão sobre sustentabilidade que sejam robustos, relevantes, acurados e viáveis em custo para os usuários (OLSTHOORN *et al.*, 2001; JIN; HIGH, 2004).

Segundo Sikdar (2003), desenvolvimento sustentável pode ser visto como um balanço entre desenvolvimento econômico, gestão ambiental e igualdade social. Ainda de acordo com esse autor, a sustentabilidade somente ocorrerá quando as condições econômicas e sociais forem melhoradas ao longo do tempo sem exceder a capacidade ambiental. Essa visão é referida amplamente como sendo a abordagem do resultado triplo, ou triple bottom line.

A avaliação de desempenho das organizações deve ser feita para cada uma das dimensões da sustentabilidade: indicadores ambientais, indicadores sociais e indicadores econômicos. No entanto, essas métricas[10] avaliam somente uma dimensão da sustentabilidade,

[9] A Agência de Proteção Ambiental (EPA, 2003) dos Estados Unidos lista uma série de exemplos de métodos e ferramentas que podem ser empregados para avaliar a sustentabilidade de sistemas de produção, p.ex. inventário de emissões, avaliação do ciclo de vida, contabilidade do custo ambiental, avaliação de risco, entre outros exemplos.

[10] A métrica define um meio específico para mensurar e avaliar um indicador de desempenho. No geral, uma variedade de métricas pode ser escolhida para qualquer indicador. Considerando o indicador Resíduo Sólido, métricas em potencial incluem volume anual (toneladas/ano), melhoria anual (% redução), ou quantidade evitada (toneladas recicladas/ano) (FIKSEL; MCDANIEL; MENDENHALL, 1999).

sendo por isso chamadas unidimensionais (1D). Da mesma forma, existem tentativas de mensurar duas dimensões (2D). Tais métricas estão ilustradas na Figura 3.1 como pertencentes à área comum entre duas dimensões, sendo classificados como: indicador sócio-econômico, indicador de eco-eficiência e indicador sócio-ambiental. Medidas que reflitam a sustentabilidade são obtidas da intersecção de todos os aspectos do resultado triplo, sendo por isso, classificadas como tridimensionais (3D).

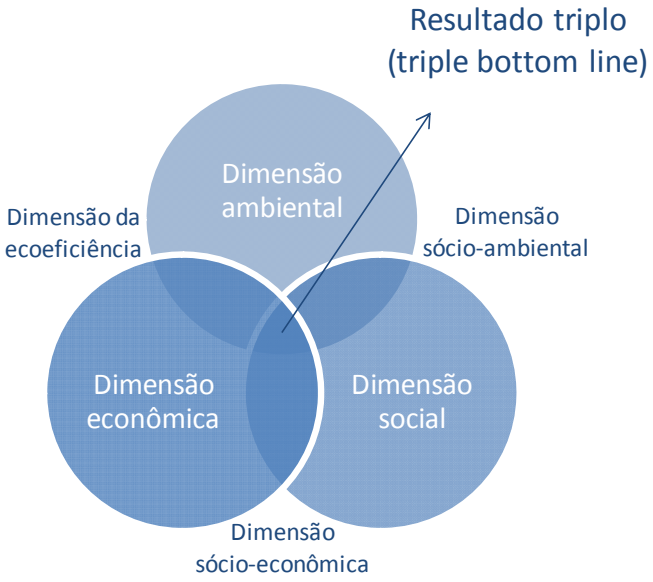


Figura 3.1 – Dimensões da sustentabilidade e tipos de indicadores de desempenho.

Fonte – SIKDAR, 2003, p.1930.

Veleva e Ellenbecker (2001) colocam os indicadores de sustentabilidade como importantes ferramentas de suporte a gestão de sustentabilidade. Os indicadores podem facilitar a criação de um sistema de produção mais ecoeficiente e responsável socialmente. A seguir é apresentada uma lista de objetivos que deve ser atendida pelas empresas e seu sistema de medição de desempenho com a finalidade de viabilizar a produção sustentável:

- Produzir informações periódicas sobre o desempenho das instalações;
- Promover a aprendizagem organizacional em sustentabilidade;
- Medir continuamente o desempenho para rastrear os avanços em sustentabilidade;
- Atualizar e melhorar o desempenho da empresa por meio de benchmarking externo;
- Estabelecer canais de comunicação com os *stakeholders*;
- Incentivar a participação dos *stakeholders* na tomada de decisão.

Uma lista de fatores de qualidade para os indicadores também foi elaborada por Veleva e Ellenbecker (2001), servindo como um guia durante o processo de construção do

sistema de medição de desempenho. A seguir podem ser vistos os fatores de qualidade apresentados pelos autores:

- Apropriado a tarefa de mensurar a produção sustentável;
- Baseados em dados disponíveis, acurados e verificáveis;
- Baseado em um conjunto de indicadores e não em um;
- Baseado em indicadores principais e suplementares;
- Baseado nos princípios de produção sustentável;
- Formado por um número gerenciável de indicadores;
- Fácil de aplicar, além de permitir a reavaliação de seus indicadores;
- Simples, mas poderosos;
- Formado por indicadores quantitativos e qualitativos;
- Apropriado a comparações entre companhias;
- Apropriado às discussões sobre os principais assuntos globais;
- Consistente com indicadores sustentáveis nacionais e da comunidade;
- Desenvolvido através de um processo amplo com a participação de *stakeholders*;
- Formado por uma fronteira de estudo bem definida.
- Elaborado com dimensões bem definidas: unidade de medida, tipo de medida (absoluto ou taxa) e período de medida

Outras características foram, ainda, citadas por Schwarz, Beloff e Beaver (2002) como fundamentais para os indicadores de sustentabilidade (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 – Características desejadas para os indicadores em sustentabilidade.

Características	Descrição
Simples	Não requer grande quantidade de tempo e tão pouco de mão-de-obra para serem desenvolvidos
Útil	Devem ser úteis para a tomada de decisão e relevante para o negócio
Compreensível	Deve ser de fácil entendimento para pessoas de diferentes áreas
Baixo custo	A tomadas das medidas devem apresentar custo compatível
Decomposição	Os resultados obtidos devem ser consistentes e comparáveis de acordo com regras ajustadas a tomada de decisão
Robusta	Demonstrar corretamente que avanços foram feitos quando da adoção de melhorias (passível de verificação)
Complementaridade	Os resultados para um negócio podem servir de dados de entrada para outras empresas na cadeia de suprimentos
Segurança	Dados sigilosos devem ser preservados em segurança

Fonte – SCHWARZ; BELOFF; BEAVER, 2002.

De acordo com Spangenberg e Bonniot (1998), os indicadores devem ser simples e diretos, mostrando aspectos de desempenho que sejam relevantes e sem exageros. O conjunto de medidas deve procurar não focar somente nos sintomas e danos, mas também, buscar prever e responder a possíveis pressões. Os indicadores devem ser comunicáveis, reproduzíveis e limitados em número, porém refletindo os pontos principais de pressão de uma forma confiável.

Além das determinações quanto ao formato e construção dos indicadores de sustentabilidade apresentados acima, estes também devem seguir a quatro princípios básicos, como apresentado por Fiksel, McDaniel e Mendelhall (1999):

1. Devem considerar relação entre recursos e valor;
2. Devem atender ao conceito do resultado triplo, ou *triple bottom line*;
3. Devem procurar enxergar todo o ciclo de vida do produto manufaturado;
4. Devem usar indicadores de resultado juntamente com direcionadores de resultado.

O primeiro fator chave trata dos recursos consumidos contraposto ao valor gerado. As organizações sustentáveis devem maximizar a criação de valor enquanto minimizam o consumo de recursos e a geração de poluentes. O conceito do resultado triplo, ou *triple bottom line*, apresentado por Elkington (1998), deve ser atendido plenamente pelo sistema de medição de desempenho, i.e., as dimensões ambiental, social e econômica são mensuradas conjuntamente dentro de uma dada empresa. No final, o desempenho para as três dimensões precisa ser balanceado com a finalidade de melhorar a sustentabilidade do sistema como um todo. A consideração de todo o ciclo de vida das operações e produtos da empresa é outro fator chave. Considerar o escopo do ciclo de vida implica visualizar as fases que antecedem a produção até a disposição final do produto (FIKSEL; MCDANIEL; MENDELHALL, 1999). Finalmente, o uso de indicadores de resultado e também de direcionadores de resultado é importante para a legitimidade do sistema de medição de desempenho. (Figura 3.2) Além de mensurar as melhorias alcançadas, é fundamental mensurar as iniciativas tomadas pela gestão para tornar a empresa mais sustentável.

3.2. Tipos de indicadores de sustentabilidade

Conforme é detalhado na norma ISO 14031 (1999), diferentes tipos de indicadores de sustentabilidade podem ser escolhidos para compor os relatórios de desempenho. Os indicadores podem ser classificados em medidas diretas ou absolutas, relativas, agregadas, ponderadas ou índices.

Medidas diretas ou absolutas representam somente um tipo de parâmetro, como dados de peso sobre poluentes gerados. Esse tipo de medida é essencial para a avaliação da capacidade, do teto ou do limite para a expansão de uma atividade qualquer – um princípio fundamental da sustentabilidade. Por exemplo, o monitoramento do total de fósforo, em toneladas, liberados em um rio por uma operação particular permite aos usuários considerar estas emissões frente à capacidade do rio, i.e., o total de fósforo que o rio pode carregar sem demonstrar certo efeito, como a eutrofização (GRI, 2006).

As medidas relativas servem para comparar parâmetros de dois tipos diferentes, p.ex., nível de poluentes gerados em contrapartida à quantidade de produtos manufaturados. Essa medida ajuda a relacionar o desempenho com as melhorias praticadas na empresa, unidade de negócio ou organização. "*Medidas relativas fornece informação sobre a eficiência de uma atividade, na intensidade do impacto, ou na quantidade de valor ou realizações*" (GRI, 2006, p.82).

Os indicadores agregados representam dados comuns de diferentes fontes, como o total de poluição gerada em função de diferentes unidades de produção. Outro tipo de medida são os indicadores ponderados, que se encarregam de conferir um determinado peso às medidas de desempenho. O último tipo de medida corresponde aos índices. Estes transformam os dados de desempenho em uma unidade comum ou padronizada para permitir a comparação com algum tipo de referência, como, por exemplo, as emissões de uma empresa por ano dividido pelo total de todo o país ou região.

Outra orientação importante ocorre sobre a natureza dos indicadores (Figura 3.2). É preciso diferenciar direcionadores de resultado de indicadores de resultado (*leading and leading indicators*).

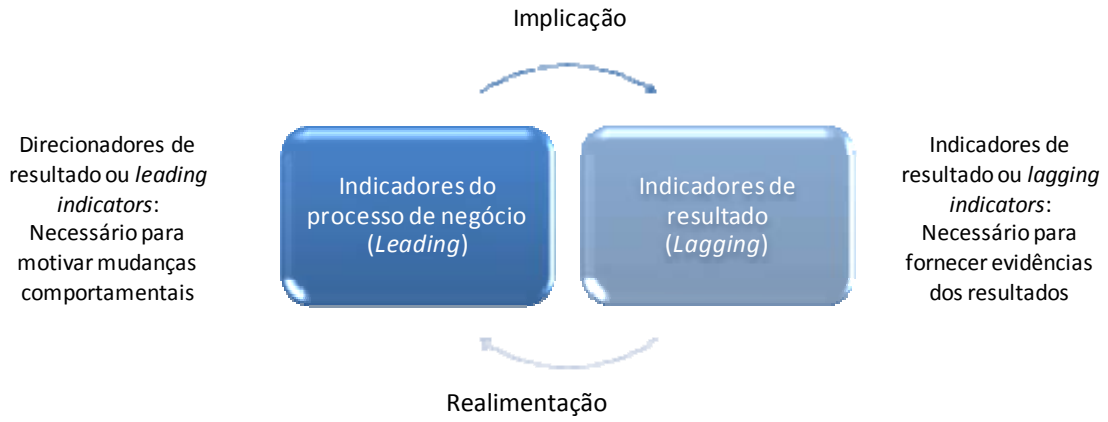


Figura 3.2 – Direcionadores de resultado e indicadores de resultado.
Fonte – FIKSEL; MCDANIEL; MENDELHALL, 1999, p.9.

Enquanto os indicadores de resultado são utilizados pelas empresas para reportar melhorias nos processos de negócio, representando dessa forma um espelho do passado, os direcionadores representam os esforços atuais que podem aprimorar o desempenho da organização. Logo, os indicadores de resultado não reportam situações ou projeções futuras. Exemplos de direcionadores de resultado incluem a quantidade de funcionários sob treinamento em sustentabilidade ou ainda, os investimentos realizados em melhorias tecnológicas para a redução da quantidade de emissões e resíduos. No caso dos indicadores de resultado, exemplos válidos seriam: quantidade de emissões de CO_2 ou satisfação dos *stakeholders* (FIKSEL; MCDANIEL; MENDELHALL, 1999).

Os tipos de indicadores de sustentabilidade podem ser divididos, ainda, de acordo com o nível de análise pretendido no processo de medição de desempenho. A Associação dos Engenheiros Alemães em sua diretiva sobre gestão da sustentabilidade afirma que é importante definir apropriadamente os termos utilizados para a medição de desempenho. Como pode ser visto na Figura 3.3, a organização dos tipos de medidas é feita em diferentes níveis.

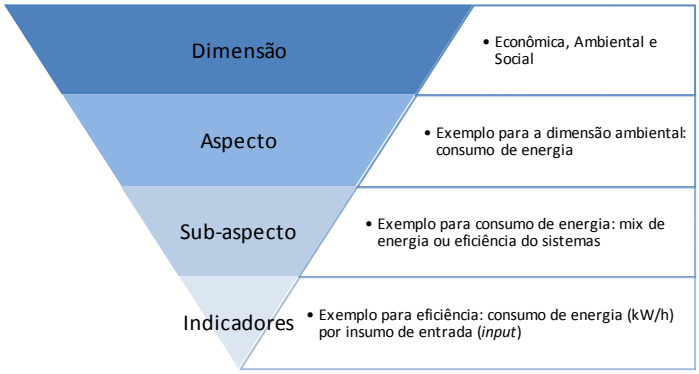


Figura 3.3 – Termos usados para a medição de desempenho em sustentabilidade.

Fonte – VDI 4070, 2006, p.6.

Dimensão pode ser definida como uma área ampla, de assuntos econômicos, ambientais e sociais de interesse dos *stakeholders*. Aspecto e sub-aspecto estão situados em um nível inferior a dimensão e correspondem a categorias mais específicas de avaliação. Indicador é a medida específica de um dado aspecto, a ser utilizada para demonstrar o seu nível de desempenho (GRI, 2006).

3.3. Principais usos gerenciais dos indicadores de sustentabilidade

Os indicadores de sustentabilidade apresentam diferentes usos gerenciais. Autoridades nacionais e internacionais podem utilizar tais medidas para verificar a adequação das

operações das empresas a regulações, controles e leis. Outra função é assegurar aos *stakeholders* que a sua empresa possui um bom desempenho em sustentabilidade, com a finalidade de proteger os próprios interesses. Uma função importante é garantir a geração de informações para avaliações de partes externas à empresa. Já em um nível micro, dentro dos limites da empresa, um objetivo é a garantia das metas de eficiência esperadas para os produtos e processos. Por último, uma aplicação importante concentra-se na melhoria contínua de produtos e processos (THORESEN, 1999).

Jasch (2000) apresenta como principal contribuição do uso de indicadores de sustentabilidade o seu suporte ao planejamento, direcionamento e controle dos aspectos de desempenho. A comparação de indicadores para diferentes períodos, lugares e firmas permite uma avaliação ampla do progresso alcançado e dos ganhos advindos dos programas em sustentabilidade. Schwarz, Beloff e Beaver (2002) também apresentam alguns usos gerenciais dos indicadores de sustentabilidade. Logo a seguir, na Figura 3.4, pode ser visto uma lista de tais aplicações gerenciais, assim como um breve detalhamento.

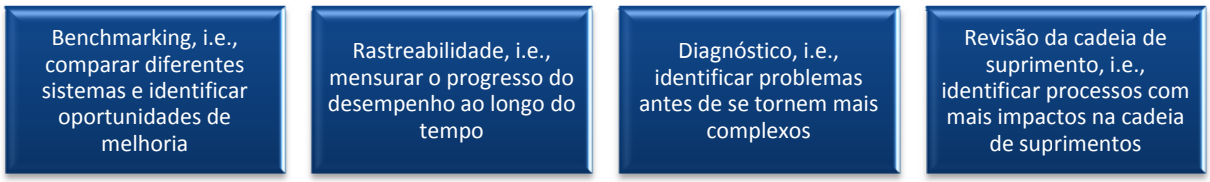


Figura 3.4 – Principais usos gerenciais dos indicadores de sustentabilidade.
Fonte – SCHWARZ; BELOFF; BEAVER, 2002.

Conforme a Figura 3.4, Schwarz, Beloff e Beaver (2002) concentram sua atenção no nível operacional da empresa. Entre outras funções, os indicadores podem ser usados para a avaliação de instalações e tecnologias, quantificando os resultados dos sistemas de produção do ponto de vista da sustentabilidade. Esta aplicação dos indicadores de sustentabilidade é importante para o objetivo da pesquisa de doutorado, pois as informações de desempenho podem ser valiosas para identificar as instalações e tecnologias que mais necessitam de melhorias e em casos extremos, quais devem ser descontinuadas por serem ineficientes e/ou ultrapassadas.

3.4. Processo de medição de desempenho em sustentabilidade

O processo de medição de desempenho em sustentabilidade está dividido em diferentes fases e passos. É preciso enxergar os indicadores como parte do processo de

negócio como um todo, um processo contínuo de análise, diagnóstico e melhoria. No caso específico do método elaborado por Fiksel, McDaniel e Mendelhall (1999), o processo foi dividido em três fases distintas: Planejamento, Implantação e Revisão (Quadro 3.2).

Quadro 3.2 – Fases que integram a medição de desempenho em sustentabilidade.

Fases		Passos
1	Planejamento	1. Desenvolver uma política de sustentabilidade 2. Identificar os aspectos principais 3. Estabelecer objetivos 4. Selecionar indicadores 5. Definir metas
2	Implantação	6. Obter suporte 7. Integrar com os processos de negócio 8. Inventário e relatório de desempenho 9. Melhorar o desempenho
3	Revisão e melhoria do processo de medição de desempenho	10. Obter retorno 11. Rever as diferentes etapas do processo

Fonte – FIKSEL; MCDANIEL; MENDELHALL, 1999, p.5.

A fase de planejamento tem como objetivo fornecer orientação às tarefas envolvidas na medição de desempenho, contribuindo para o sucesso da avaliação, apresentação e melhoria da sustentabilidade. De acordo com Fiksel, McDaniel e Mendelhall (1999), durante a fase de planejamento as partes envolvidas criam um *framework* que considera todas as preocupações mais importantes da empresa. Antes de iniciar essa fase, o escopo da avaliação deve estar bem definido, podendo ser pequeno, como no caso de um produto, ou então amplo, como no caso de uma empresa inteira. O primeiro passo da fase de planejamento é estabelecer uma política de sustentabilidade, com metas de desempenho para as áreas econômico, ambiental e social. É importante que a estratégia de negócio formulada esteja em concordância com a política de sustentabilidade da empresa.

Ainda na fase de planejamento, uma questão deve ser respondida: Quais aspectos de desempenho são mais importantes para melhorar a sustentabilidade? Depois de definidos os aspectos que mais contribuem para a melhoria da sustentabilidade, inicia-se a fase mais desafiadora, selecionar os indicadores mais relevantes.

Aspectos são definidos como elementos indutores de mudanças no ambiente, que acabam por gerar impactos ambientais, sociais ou econômicos. Exemplos para o caso

específico dos aspectos ambientais e seus respectivos impactos ambientais[11] podem ser vistos no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Exemplos de aspectos ambientais e seus respectivos impactos.

Aspectos ambientais	Impactos ambientais
Efluentes descartados no meio-ambiente	Degradação do habitat aquático, fornecimento de água potável
Vazamentos	Contaminação do solo e subsolo
Uso de eletricidade	Poluição do ar, aquecimento global
Uso de papel reciclável	Conservação dos recursos naturais
Emissões de substâncias na atmosfera	Poluição do ar

Fonte – EPA US, 2003.

Como existem muitos indicadores, a escolha de quais medidas utilizar é complexa e envolve diferentes considerações. Além do objetivo por trás dessas medidas, é preciso considerar o tipo de firma, o setor em estudo, o tamanho da empresa, a proximidade a mercados consumidores sensíveis a questões ambientais, as regulações externas e ainda, a cultura corporativa da organização. Cada conjunto de indicadores deve ser específico para o contexto organizacional e para as necessidades dos usuários por informações (OLSTHOORN *et al.*, 2001). De acordo com a EPA US (2003), o fator-chave para a escolha dos indicadores de sustentabilidade seria a influência e magnitude dos diversos aspectos gerados pelas atividades da empresa.

Fiksel, McDaniel e Mendenhall (1999) elaboraram uma seqüência de três passos com a intenção de auxiliarem as empresas a identificarem os aspectos mais relevantes:

1. Identificar todos os aspectos que são potencialmente importantes: essa tarefa envolve atividades como a condução de sessões de *brainstorming*[12], revisão de dados históricos e entrevistas com *stakeholders* da organização;
2. Avaliar e estimar a magnitude de todos os aspectos que são potencialmente importantes: tal atividade requer a quantificação dos aspectos tanto em termos de valor e recursos;
3. Elaborar um ranking dos aspectos em termos de sua importância relativa: a definição dos aspectos mais importantes pode ser realizada através de várias técnicas de decisão em grupo. Depois de determinados quais aspectos são mais importantes, os tomadores de decisão podem proceder com a seleção dos poucos que merecem ser monitorados.

[11] Impacto ambiental pode se definido como qualquer mudança no meio ambiente, benéfica ou prejudicial, resultante das atividades de instalações, produtos ou serviços antrópicos (EPA, 2003).
[12] Por meio de uma dinâmica de grupo, os aspectos principais em sustentabilidade são listados. Pessoas de diferentes áreas e especialidades potencializam o processo.

Retornando ao modelo do Quadro 3.2, agora é a vez de analisar a fase de implantação do sistema. Estando pronto o *framework* de indicadores de desempenho, os processos de inventário, análise, reportagem e melhoria podem ser conduzidos. Uma dificuldade típica do passo oito é a obtenção de dados ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, p.ex. obter quantidade de gases do efeito estufa para todo o ciclo de vida de um produto.

A terceira e última fase envolve a revisão e melhoria do processo de medição de desempenho. O processo de revisão é importante para atualizar a base do conhecimento usada na análise, por isso deve ser feito com atenção. Uma sugestão feita por Fiksel, McDaniel e Mendelhall (1999) é iniciar a avaliação de sustentabilidade com um conjunto limitado de indicadores, reconhecendo que o *framework* vai evoluir prontamente. Na Figura 3.5 é possível ver um esquema com todas as etapas do modelo proposto.

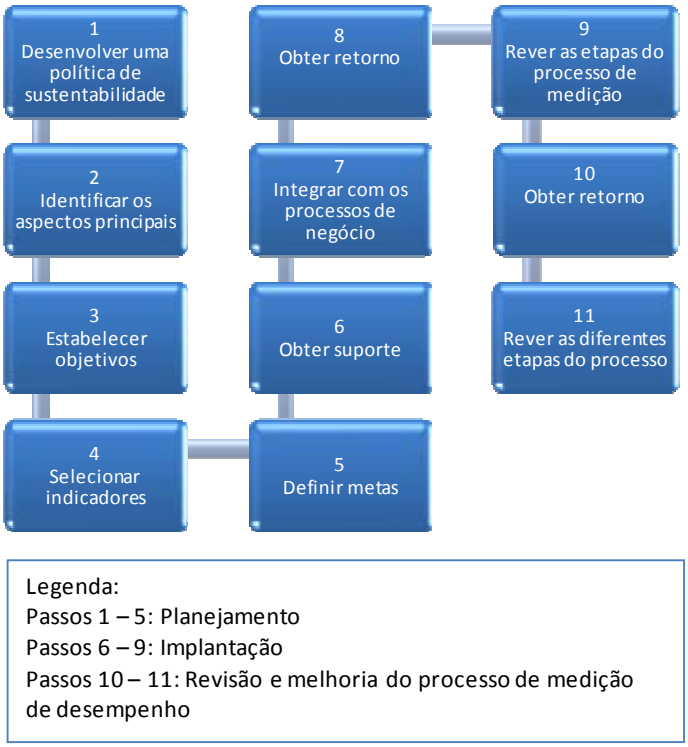


Figura 3.5 – Fases que integram a medição de desempenho em sustentabilidade.

Fonte – FIKSEL; MCDANIEL; MENDELHALL, 1999, p.5.

Outros modelos desenvolvidos para avaliar a medição de desempenho em sustentabilidade também seguem a estrutura sugerida por Fiksel, McDaniel e Mendelhall (1999) e adotam o mesmo tipo de procedimento: "planejar, fazer, checar e atuar", ou "*plan-do-check-act*" (ISO 14031, 1999; JASCH, 2000).

Veleva e Ellenbecker (2001) também construíram uma rotina para definir, mensurar e melhorar o desempenho em sustentabilidade. O seu modelo é formado por oito passos dentro de um processo contínuo em *loop*, ou circular (Figura 3.6).

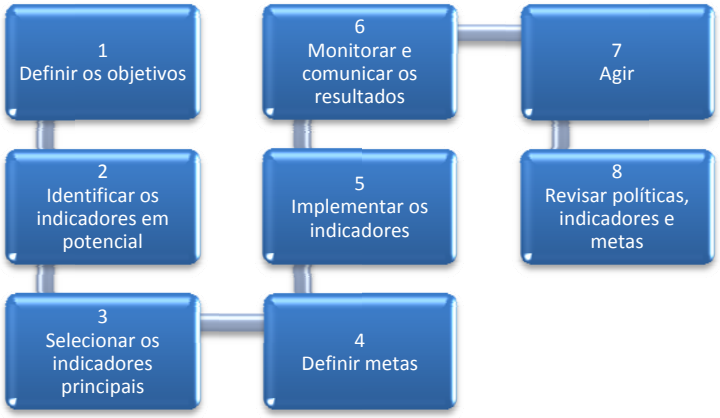


Figura 3.6 – Processo contínuo em *loop* para mensurar a sustentabilidade das organizações.

Fonte – VELEVA; ELLENBECKER, 2001.

Na primeira fase, devem ser detalhados os objetivos da produção sustentável. Esses objetivos devem refletir a missão da companhia e encorajar o envolvimento dos *stakeholders* nas decisões da empresa. Na fase seguinte, são identificados os indicadores em potencial que refletem os objetivos e as metas da companhia. Logo em seguida, na fase três, são selecionados os indicadores principais. Durante a fase quatro são definidas as metas de desempenho, essenciais para o comprometimento e o controle das partes envolvidas. A fase cinco envolve a coleta de dados, cálculo, avaliação e interpretação dos resultados. Essa é a etapa que consome mais tempo e requer a participação de profissionais de diferentes áreas da empresa ou mesmo, de grupos externos.

Já a fase seis envolve a monitoramento e a comunicação dos resultados, incentivando a melhoria contínua na organização. Portanto, é recomendado estabelecer sistemas para a avaliação, interpretação e apresentação regular dos resultados para empregados e outras partes interessadas (p.ex., *shareholders*, consumidores e comunidade). Na fase sete, acontecem as ações a partir dos resultados. Aqui são tomadas as ações corretivas e demonstrado que o sistema de medição de desempenho não é somente um exercício de relações públicas e sim, um meio para executar a melhoria contínua visando à sustentabilidade[13].

Finalmente, na última fase do modelo de Veleva e Ellenbecker (2001), é feita a revisão dos indicadores, políticas e metas. Essa é uma fase-chave, visto que abre espaço para o estabelecimento de novos parâmetros e realimenta o processo de medição de desempenho em sustentabilidade.

[13] Velleva e Ellenbecker (2001, p.531) citam as ações advindas da estratégia de prevenção de poluição e de produção mais limpa como um bom meio de atuação para realizar as melhorias, "[…] a prevenção de poluição e a produção mais limpa estão entre as abordagens mais efetivas para o desenvolvimento de soluções concretas".

3.5. Modelos de medição de desempenho para avaliação da sustentabilidade

Existem diferentes modelos de medição de desempenho para avaliar a sustentabilidade de processos, produtos e serviços. Cada modelo, contudo, apresenta uma característica distinta, podendo ser usado em análises de escopo amplo, p.ex. sustentabilidade de corporações, ou então, em análises específicas, com escopo pequeno, p.ex. processos de produção isolados.

Após revisão da literatura sobre medição de desempenho e sustentabilidade em diferentes bancos de dados[14], foram selecionados e estudados quatorze modelos particulares. Esses modelos de medição de desempenho deveriam contemplar preferencialmente as três dimensões que compõem a visão *triple bottom line* da sustentabilidade. No entanto, também foram considerados modelos relevantes que trabalhassem com uma ou duas dimensões, bastando para isso, serem largamente conhecidos e aplicados em diferentes empresas. Esse é o caso do modelo de duas dimensões desenvolvido pelo Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável e adotado em diferentes países (WBCSD, 2000). No Quadro 3.4 pode ser vista a lista de modelos estudados, classificados de acordo com as dimensões, e também o escopo de avaliação dos modelos. O escopo é divido da seguinte forma:

- Amplo: *framework* inclui indicadores para a avaliação de produtos, processos, serviços, instalações e gestão;
- Manufatura: *framework* elaborado especialmente para a avaliação de processos de manufatura;

Os modelos propostos surgiram para harmonizar o processo de desenvolvimento de indicadores e colaborar para a medição de desempenho sobre sustentabilidade. Os indicadores sugeridos foram elaborados para serem robustos e fornecer informações confiáveis aos diferentes *stakeholders*, sem a contrapartida de elevados custos e tempo de análise. Uma fase importante da formulação do sistema de medição de desempenho é a definição dos aspectos e dos indicadores para a sustentabilidade. Essa fase é responsável por escolher indicadores significativos perante as preocupações econômicas, ambientais e sociais dos *stakeholders*.

Contudo, uma característica comum aos sistemas estudados é a ausência de um método estruturado e claro para a identificação dos principais aspectos das atividades. Determinados autores apresentam algumas considerações de como proceder, no entanto uma orientação mais detalhada não foi encontrada. Ainda de acordo com os modelos estudados, é

[14] Consultar capítulo 5, seção 2, para maior detalhamento dos aspectos metodológicos.

usual aplicar o método de análise entrada-saída para contabilizar todos os valores dos indicadores.

Quadro 3.4 – Lista de modelos de medição de desempenho selecionados.

	Autores	Dimensões	Escopo
1	Fiksel, McDaniel e Mendenhall, 1999	*Triple bottom line*	Amplo
2	Thoresen, 1999	Ambiental	Amplo
3	Olsthoorn *et al.*, 2001	Econômico e ambiental	Amplo
4	Schwarz, Beloff e Beaver, 2002	Econômico e ambiental	Manufatura
5	Environmental Protection Agency, US, 2003	Ambiental	Manufatura
6	Hay e Noonan, 2005	Ambiental e social	Manufatura
7	International Standard Organization (EN ISO 14031), 1999	Ambiental	Amplo
8	Labuschagne, Brent e Erck, 2005	*Triple bottom line*	Amplo
9	Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2006	*Triple bottom line*	Amplo
10	Global Reporting Initiative (GRI), 2006	*Triple bottom line*	Amplo
11	Institution of Chemical Engineers (IChemE), 2002	*Triple bottom line*	Amplo
12	World Business Council for Sust. Develop. (WBCSD), 2000	Econômico e ambiental	Amplo
13	Veleva e Ellenbecker, 2001	*Triple bottom line*	Amplo
14	Azapagic, 2004	*Triple bottom line*	Amplo

A partir da análise criteriosa desses modelos, a intenção é obter uma quantidade suficiente de aspectos de desempenho e indicadores ambientais, sociais e econômicos. Essas informações serão usadas para compor o método de avaliação de desempenho. Todos os modelos resumidos no Quadro 3.4 estão detalhados nas seções seguintes, juntamente com a lista de aspectos de desempenho e indicadores de sustentabilidade adotados por cada um.

3.5.1. Modelo Fiksel, McDaniel e Mendenhall

O modelo para medição de desempenho de Fiksel, McDaniel e Mendenhall (1999) não apresenta uma estrutura organizada para os diferentes aspectos, tratando de forma neutra os mais variados tipos de análise em uma empresa (Figura 3.7). Em outras palavras, não existe um grupo de aspectos direcionado especificamente para o desenvolvimento de novos produtos, ou ainda, para a avaliação de processos de manufatura. Cabe assim, ao responsável pela análise escolher aqueles aspectos mais adequados para cada tipo de estudo.

Figura 3.7 – Modelo Fiksel, McDaniel e Mendenhall.

Fonte – FIKSEL; MCDANIEL; MENDENHALL, 1999, p.8.

3.5.2. Modelo Thoresen

O modelo proposto por Thoresen (1999) trabalha basicamente com indicadores ambientais, embora considere alguns aspectos da dimensão social. De acordo com o autor, a adoção de indicadores de desempenho ambiental é um agente facilitador para o projeto, pois possibilita o desenvolvimento de produtos, processos e serviços sustentáveis. A estrutura do modelo está devidamente ilustrada na Figura 3.8.

Os aspectos estão divididos em duas categorias principais, indicadores de ciclo de vida do produto e indicadores do desempenho ambiental das operações. Esta última categoria apresenta, ainda, duas classificações: gestão ambiental e processos de manufatura. Uma separação dos aspectos em diferentes categorias, produtos, processos e gestão, facilita o diagnóstico da situação ambiental da empresa e também, a fase planejamento de projetos de melhoria.

De acordo com o autor, os pontos dentro da empresa a serem monitorados, devem ser escolhidos cuidadosamente, já que uma visão estreita pode deixar de lado as atividades que verdadeiramente influenciam o desempenho ambiental. Assim, a seleção dos indicadores de desempenho deve ser executada com o auxílio de alguma ferramenta de suporte. Thoresen (1999) sugere o uso da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). É feita a afirmação de que os problemas são frequentemente encontrados na fronteira entre os elementos do sistema total, sendo importante analisar todas as fontes de impacto nos diferentes estágios do ciclo de vida, i.e., emissões, efluentes, resíduos, consumo de energia, atividades de transporte e consumo de materiais.

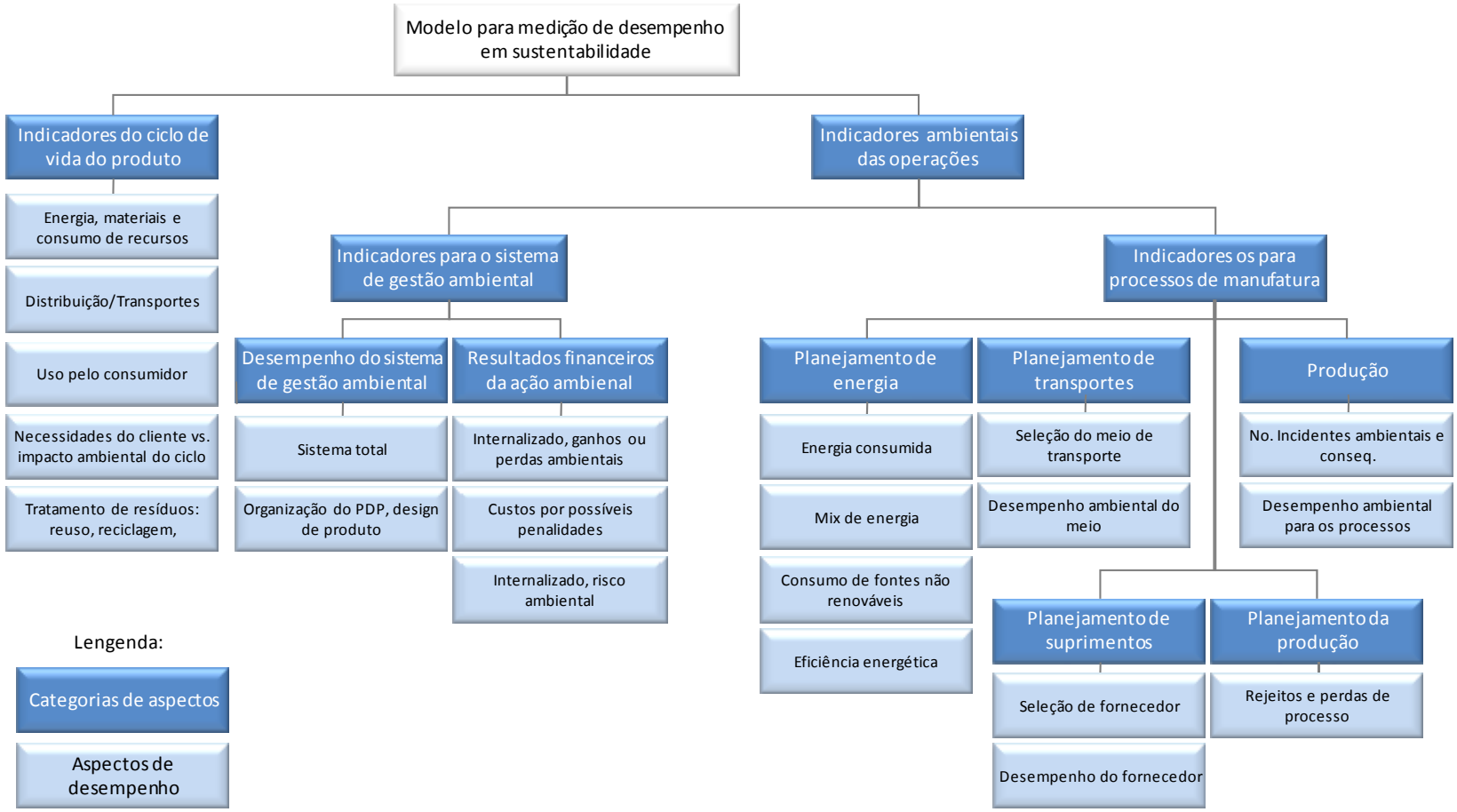


Figura 3.8 – Modelo Thoresen.

Fonte – THORESEN, 1999, p.369.

3.5.3. Modelo Olsthoorn, Tyteca, Wehrmeyer e Wagner

Os autores fizeram uma revisão dos diferentes métodos usados nas empresas para avaliar o desempenho ambiental e econômico. Como resultado, foi encontrada uma grande variedade de abordagens, o que dificulta a tarefa de consolidar os muitos indicadores disponíveis em um conjunto simples e poderoso. No entanto, Olsthoorn *et al.* (2001) foram capazes de apontar um conjunto de indicadores que mostraram-se populares na prática ou na literatura (Figura 3.9).

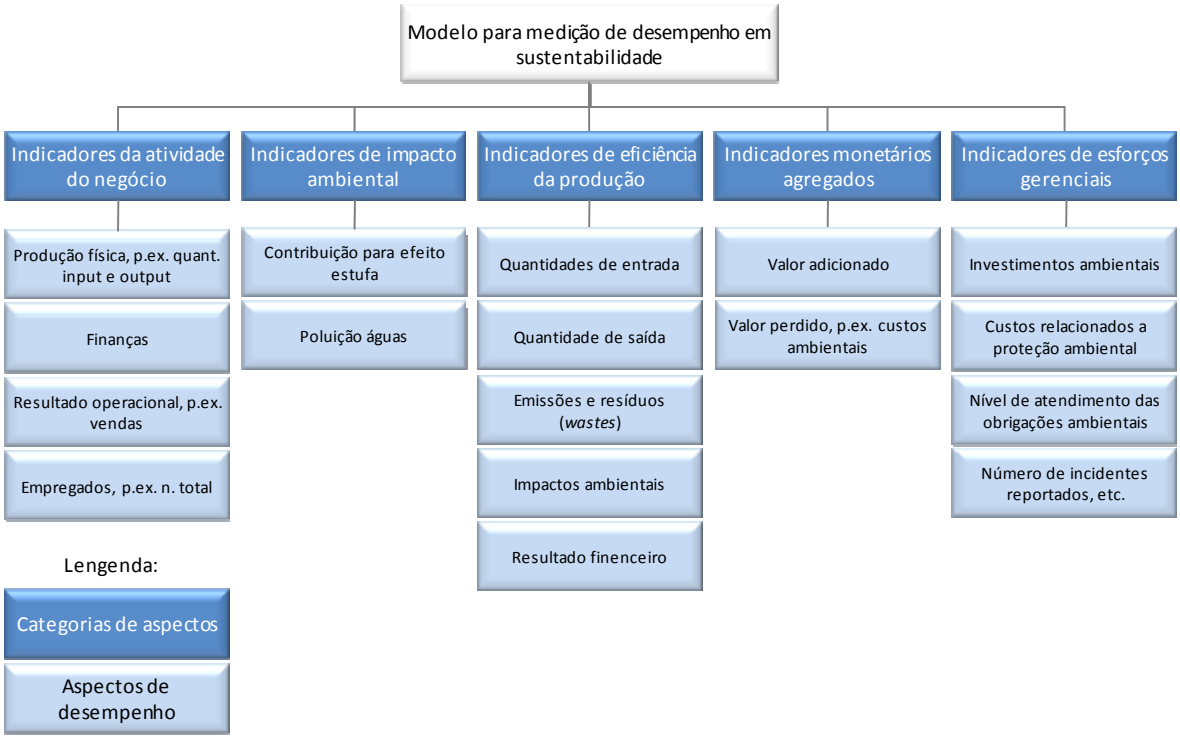


Figura 3.9 – Modelo Olsthoorn, Tyteca, Wehrmeyer e Wagner.
Fonte – OLSTHOORN; TYTECA; WEHRMEYER, 2001, p. 462.

O modelo sugerido acaba por abordar diversos indicadores:

1. Indicadores de atividade de negócio: aborda valores agregados da empresa, como o resultado operacional e o número de empregados;
2. Indicadores de impacto ambiental: preocupado em avaliar o impacto proporcionado pelo negócio, com especial atenção a contribuição para o efeito estufa e poluição das águas;
3. Indicadores de eficiência da produção: utiliza medidas ajustadas unicamente para as unidades produtivas;

4. Indicadores monetários agregados: objetivo é avaliar o valor adicionado e perdido durante as atividades do negócio;
5. Indicadores de esforços gerenciais: diferentes medidas abordam a responsabilidade ambiental da empresa.

Para o caso das medidas de esforços gerenciais e de eficiência de produção, Olsthoorn *et al.* (2001) não se limitou a um grupo de indicadores, deixando claro a existência de outros possíveis indicadores. Dependendo da empresa e do objetivo da análise, deve-se escolher os indicadores mais adequados.

3.5.4. Modelo Schwarz, Beloff e Beaver

Schwarz, Beloff e Beaver (2002) optaram em seu modelo por empregar uma quantidade mínima de indicadores. Contudo, mesmo utilizando poucos indicadores, os autores afirmam que a credibilidade dos resultados obtidos não é comprometida. Para os casos mais complexos, também existe a opção de adicionar outras medidas de desempenho. Na Figura 3.10 é possível verificar os indicadores ambientais e econômicos do modelo de Schwars, Beloff e Beaver (2002).

Figura 3.10 – Modelo Schwarz, Beloff e Beaver.
Fonte – SCHWARZ; BELOFF; BEAVER, 2002, p.58.

O modelo formulado é ajustado à avaliação da sustentabilidade econômica e ambiental de processos de manufatura. Os indicadores são usados para o cálculo de índices de desempenho, com as medidas ambientais no numerador e as medidas econômicas no denominador. No final da análise, diferentes medidas de eco-eficiência representam o real desempenho da empresa. Expressar as métricas como taxas, segundo Schwarz, Beloff e Beaver (2002), fornece aos *stakeholders* um meio para relatar o desempenho econômico e ambiental, ao mesmo tempo em que protege os dados sigilosos da empresa.

O modelo desenvolvido por Schwarz, Beloff e Beaver (2002) conta com cinco indicadores básicos de sustentabilidade ambiental:

1. Intensidade de material: é expresso como sendo a quantidade de material não convertido por unidade de produto. É calculado subtraindo-se do total de material a massa da peça final;
2. Intensidade de energia: quantidade de energia consumida pelo processo, já considerando a sua eficiência energética. A intensidade de energia é uma forma útil de conduzir *benchmarking* e avaliar a evolução temporal dos processos;
3. Consumo de água: quantidade de água consumida por unidade de produto, incluindo água para resfriamento e perdas por evaporação;
4. Emissões tóxicas: quantidade de material tóxico liberado por unidade de produto.
5. Emissão de poluentes: quantidade de poluentes emitidos por unidade de produto. Esse indicador é calculo pela soma dos valores equivalentes das emissões, p.ex. CO_2 no caso do efeito estufa.

As métricas representadas no modelo da Figura 3.10 seguem uma regra simples, quanto menor o valor calculado para o índice de desempenho, mais eficiente é o processo. Uma medida menor indica que o impacto do processo é menor (o numerador é menor) ou que o processo é mais eficiente (o denominador é maior). A regra de que menor é melhor pode ser usada para avaliar o desempenho relativo de processos de manufatura em termos de impacto por unidade de *input*.

3.5.5. Modelo EPA US

O modelo de medição de desempenho desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*Environment Protection Agency* – EPA US) trata de avaliar os efeitos ambientais dos processos de manufatura, fornecendo aos tomadores de decisão e

aos demais *stakeholders* informações valiosas sobre as pressões provenientes das operações. Uma representação das principais categorias de medidas pode ser vista na Figura 3.11.

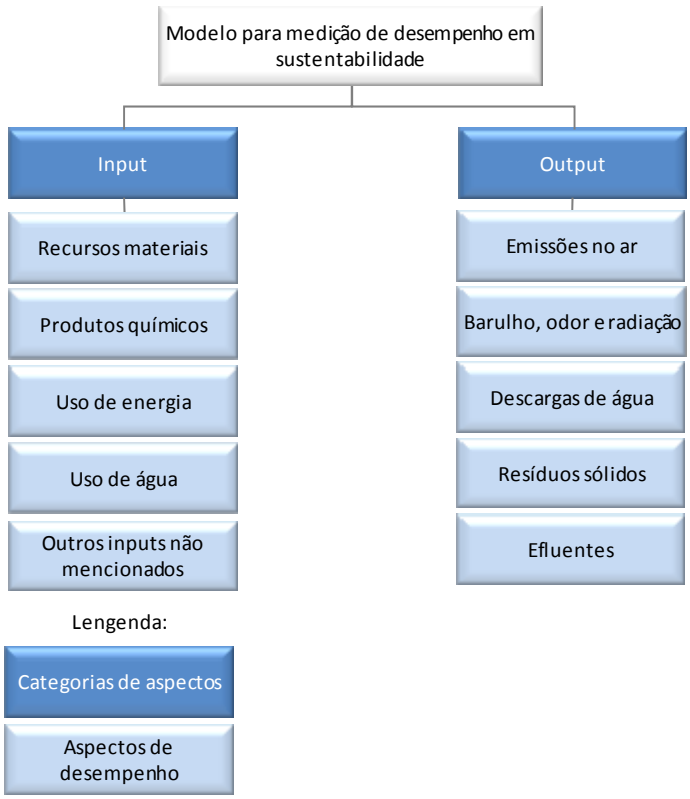


Figura 3.11 – Modelo EPA US.

Fonte – EPA US, 2003.

Esta metodologia procura dar suporte a tomada de decisão e garantir boas escolhas a partir das opções tecnológicas existentes, antecipando os impactos ambientais proporcionados pelos fatores de produção antes que ocorram (EPA US, 2003). Uma característica do modelo EPA US é a divisão dos aspectos em elementos de entrada (*input*) e de saída (*output*). É sugerido o uso de fluxogramas de processo para auxiliar na identificação das entradas e saídas do sistema. O processo de medição de desempenho elaborado pela EPA US está dividido em algumas etapas:

1. Elaborar uma descrição do processo de manufatura, descrever seus requerimentos e investigar o contexto em que opera;
2. Identificar os resíduos e as perdas ocasionadas;
3. Caracterizar as emissões liberadas no ambiente;
4. Analisar as conseqüências cumulativas dos efeitos das pressões ambientais.

3.5.6. Modelo Hay e Noonan

O modelo de Hay e Noonan (2005) visa auxiliar na avaliação e seleção de processos de manufatura amigáveis ao meio-ambiente. Conforme explicam os autores, realizar investimentos para o tratamento de poluentes decididamente não é a melhor alternativa de investimento, visto que são soluções caras e não trazem retorno financeiro. Já a produção mais limpa evita este dilema com o uso de tecnologias modernas, eficientes e amigáveis ao meio ambiente, que no final geram menos poluição e tornam as empresas mais produtivas.

O método apresentado surgiu da necessidade de uma melhor compreensão dos desdobramentos de diferentes tecnologias de manufatura sobre a sustentabilidade das empresas. Como pode ser visto na Figura 3.12, Hay e Noonan (2005) separaram o processo de avaliação de sistemas de produção em cinco fases complementares.

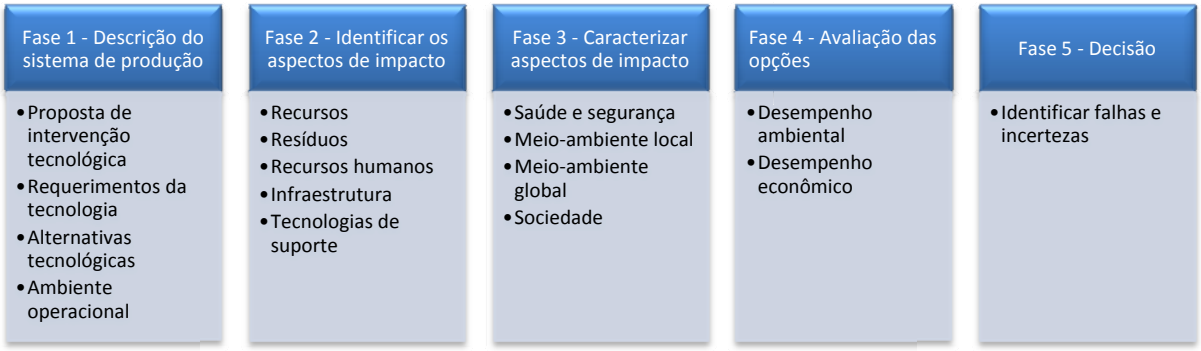


Figura 3.12 – Processo de avaliação de processos de manufatura.

Fonte – HAY; NOONAN, 2005.

O processo de avaliação de processos de manufatura tem início com a descrição do sistema de produção. Logo em seguida, é conduzida uma avaliação dos aspectos referentes ao processo, identificando as entradas e saídas que compõem o sistema. Depois de identificados os aspectos, a próxima tarefa é caracterizar os impactos, i.e., rastrear e mensurar os indicadores para os aspecto mais relevantes. Na fase quatro, é realizada a comparação das opções existentes para depois, ao longo da fase 5, escolher a melhor configuração de recursos de manufatura, por meio do consenso entre as partes envolvidas. A idéia central é comparar os resultados de desempenho das diferentes opções e depois sumarizar os aspectos positivos e negativos com o auxilio de alguma ferramenta de análise.

A fronteira do modelo de Hay e Noonan (2005) é formada por diferentes entradas e saídas, que servem como base para a avaliação das tecnologias de manufatura:

- Entradas: infra-estrutura, energia, materiais, tecnologias de suporte, trabalho e habilidades;

- Saídas: resíduos e produtos.

Os tipos de impacto considerados por Hay e Noonan podem ser divididos em cinco grupos (Figura 3.13), sendo dedicada também especial atenção a dimensão social. Esta abordagem tem o objetivo de fornecer uma visão clara dos diferentes tipos de impacto proporcionados pelas opções de processos de manufatura. Como conseqüência, critérios comuns permitiriam a comparação das tecnologias.

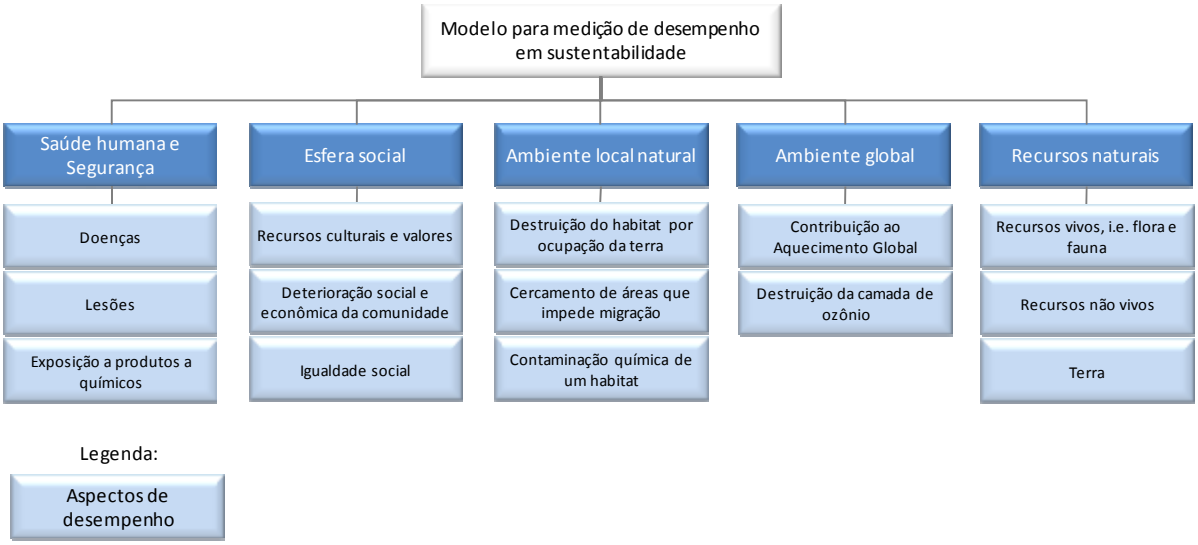


Figura 3.13 – Modelo Hay e Noonan

Fonte – HAY; NOONAN, 2005, p.14.

3.5.7. Modelo ISO 14031

O modelo proposto pela ISO 14031 (ISO 14031, 1999) para a avaliação de desempenho da sustentabilidade ambiental[15], ou *environmental performance evaluation* (EPE), tem como objetivo entender, demonstrar e melhorar as operações das empresas. Isto pode ser alcançado gerenciando efetivamente os elementos das suas atividades, produtos e serviços que podem causar um impacto significativo ao meio-ambiente. Dessa forma, a ISO 14031 foi desenvolvida para auxiliar os sistemas de gestão ambiental a fornecer informações confiáveis e verificáveis em uma base constante para determinar quando o desempenho ambiental está dentro dos critérios definidos pela organização.

[15] A definição para EPE, segundo a ISO 14031 (1999, p.5), é: "processo para facilitar a tomada de decisões em assuntos relativos ao desempenho ambiental de organizações, selecionando indicadores, coletando e avaliando dados, avaliando informações contra critérios de desempenho ambiental, reportando e comunicando, e periodicamente revisando e melhorando esse processo".

A norma ISO 14031 (ISO 14031, 1999) adota três tipos diferentes de indicadores de desempenho, os indicadores para as operações, para a condição ambiental e para o gerenciamento da organização. Os indicadores gerenciais tratam de medir os esforços realizados pela empresa para melhorar o desempenho ambiental de suas operações. Existem os indicadores de condição ambiental, voltado ao aspecto amplo da condição atual do ambiente e do possível impacto futuro. Ele serve diretamente como fonte de informação para o sistema de gestão da empresa. Finalmente, têm-se os indicadores de desempenho operacionais, correspondendo basicamente às atividades de manufatura, transporte e suporte da organização.

A avaliação de desempenho ambiental orientada pela norma ISO 14031 (ISO 14031, 1999) segue o modelo de intervenção "*plan-do-check-act*", modelo este, também utilizado por outros autores. Na Figura 3.14, estão expostos os passos que compõem a rotina de melhoria ambiental a partir da avaliação de desempenho.

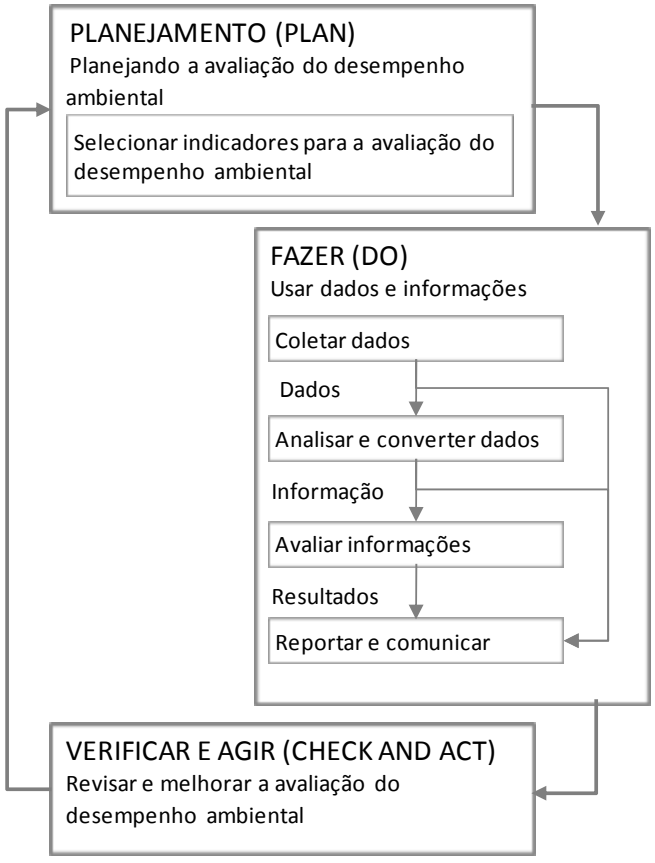


Figura 3.14 – Procedimento para a avaliação de desempenho "*plan-do-check-act*"

Fonte – ISO 14031, 1999, p.7.

Na primeira fase, devem ser encontrados os aspectos ambientais de maior relevância e que se estejam sob a esfera de controle da organização. Uma determinação dessa fase corresponde à definição de expectativas de desempenho para tais critérios. A visão dos

stakeholders deve estar integrada a essa rotina inicial. Umas listas dos elementos que devem constar na fase de planejamento do EPE são: totalidade das atividades da organização, estrutura organizacional, estratégia de negócio, política ambiental, leis, custos e benefícios ambientais, informações sobre a condição ambiental e fatores sociais e ambientais (ISO 14031, 1999).

A norma ISO 14004 (ISO 14004, 2004) fornece orientações simples de como selecionar os principais aspectos: "a identificação dos aspectos significantes é um processo contínuo que melhora o conhecimento da empresa sobre a sua relação com o ambiente, contribuindo para melhorias futuras". Antes de definir prioridades de ação é essencial que os impactos ambientais gerados sejam identificados. Uma lista dos aspectos de desempenho recomendados pode ser vista na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Modelo ISO 14031 para a avaliação do desempenho ambiental.
Fonte – ISO 14031, 1999, p.32.

Para cada aspecto ambiental podem surgir diferentes indicadores de desempenho. A norma ISO 14031 oferece vários exemplos de indicadores ambientais, que podem ser usados de acordo com as operações da organização. Uma lista completa dos indicadores sugeridos está organizada no Quadro 3.5.

Durante a segunda etapa (Figura 3.14) os dados gerados são usados para obter informações sobre o desempenho ambiental das diferentes atividades da empresa. De acordo com a norma ISO 14031, a coleta dos dados deve ser feita regularmente e assegurando a confiabilidade das fontes, se possível com a anuência do Departamento de Gestão da

Qualidade. Os dados podem ser obtidos de diferentes maneiras: entrevistas, monitoração, relatórios regulares, relatórios de produção e inventários, relatórios financeiros e de contabilidade, arquivos de compra, auditorias ambientais, estudos e relatórios científicos, agências governamentais e não governamentais, instituições acadêmicas, fornecedores e terceirizados, clientes e associações. Depois de obtidos os dados, basta transformá-los em indicadores de desempenho para que sejam analisados.

Quadro 3.5 – Exemplos de indicadores ambientais.

Aspectos de desempenho	Indicadores de sustentabilidade
Materiais	Quantidade de material por produto, Quantidade de material processado, reciclado ou reusado, Quantidade de embalagem descartada ou reusada, Quantidade material auxiliar reciclado ou reusado, Quantidade material reusado no processo de produção, Quantidade de água por produto, Quantidade de água reusada, Quantidade de material tóxico
Energia	Quantidade de energia por ano ou produto, Quantidade energia usada por serviço ou cliente, Quantidade de cada tipo de energia usado, Quantidade energia gerada por processos paralelos, Quantidade energia economizada por programas melhoria
Serviços de suporte	Quantidade produto tóxico usado por contratados, Quantidade agentes limpeza usado por contratados, Quantidade de materiais reciclados ou reusáveis usados, Quantidade e tipo de resíduos gerados
Produtos	Número produtos lançados com propriedades não tóxicas, Número de produtos que podem ser reciclados ou reusados, % do conteúdo do produto a ser reusado ou reciclado, % de produtos defeituosos, Número de subprodutos gerados por unidade de produto, Número de unidade de energia gasta durante uso do produto, Duração da vida útil do produto, Número de produtos com instruções ambientais de uso e disposição final
Serviços oferecidos	Quantidade de agente de limpeza usado por m2, Quantidade de combustível usado, Quant. Idade de licenças vendidas para a melhoria de processos, Quantidade de materiais usados no pós venda, Risco de crédito ou insolvências relacionados ao meio-ambiente
Resíduos	Quantidade de resíduos por produto ou por ano, Resíduos (reciclável, reusável ou poluente) por ano, Quantidade de resíduo a ser disposta, Quantidade de resíduo armazenado, Quantidade de resíduo controlado por autorizações, Quantidade de resíduo convertido em material reusável, Resíduo tóxico eliminado por substituição de material
Emissões e efluentes	Quantidade de emissões específicas por ano, Quantidade de emissões por unidade de produto, Quantidade de energia liberada para o ar, Quantidade emissões negativas a camada de ozônio, Quantidade de emissões negativas ao aquecimento global, Quantidade de efluentes por ano, Quantidade calor, vibração e luz emitida, Quantidade energia desperdiçada para água, Quantidade material enviado para aterro por unidade de produto, Quantidade efluente por cliente ou serviço, Quantidade de barulho em uma certa localização, Quantidade radiação liberada, Quantidade material descartado para água por unidade de produto
Instalações físicas e equipamentos	Equipamentos para desmontagem, reciclagem ou reuso, Número horas de equipamento em operação por ano, Número de eventos de emergência ou de não-rotinas, Área total usada para produção, Área usada para produzir unidade de energia, Consumo de combustível de frota, Número de veículos com tecnologia para economia de combustível, Número de horas de manutenção preventiva por ano
Suprimentos e entregas	Consumo combustível médio da frota, Número de entregas por dia, Veículos com equipamento de prevenção de poluição, Número de viagens salvas por outras entregas, Número de viagens por tipo de meio de transporte.

Fonte – ISO 14031, 1999, p.34.

Ainda na segunda etapa, as informações derivadas da análise dos dados, expressas em termos de indicadores, devem ser comparadas com as metas de desempenho da organização. A comparação pode indicar progresso ou deficiência no desempenho ambiental e servir como

sinalizador da necessidade de intervenções na gestão ambiental da empresa. Uma obrigação da avaliação de desempenho é reportar a diferentes partes os resultados. A reportagem do desempenho ambiental promove o comprometimento da empresa em atender as metas e obrigações ambientais, um benefício que retorna a empresa em melhor eficiência interna e na abertura de novos mercados (ISO 14031, 1999).

Na última etapa, as oportunidades de melhoria do sistema devem ser satisfeitas. Possíveis pontos a serem verificados incluem a relação dos custos associados ao monitoramento e aos benefícios obtidos, o progresso da empresa para atender aos critérios e adequar-se a eles, e por fim, a validade e credibilidade das fontes de dados e métodos de coleta.

O modelo ISO 14031 apresenta uma estrutura bem elaborada para seus aspectos e seus respectivos indicadores de desempenho. A seqüência de passos do processo de avaliação de desempenho atende ao objetivo de avaliar o desempenho ambiental das empresas e propor melhorias. Além disso, a diferenciação dos indicadores em operacionais e gerenciais aumenta o nível de compreensão dos resultados das análises.

3.5.8. Modelo Labuschagne, Brent e Erck

De acordo com Labuschagne, Brent e Erck (2005), existi uma carência de sistemas de medição de desempenho que reconheçam a sustentabilidade nas práticas operacionais. Para eles, a sustentabilidade era pensada mais nos termos institucionais e estratégicos, sem considerar o lado econômico-operacional das atividades de manufatura apropriadamente. Poucos indicadores foram aplicados com o intuito de medir o rendimento das operações e as existentes, focavam demasiadamente no lado ambiental e eram orientados basicamente ao desenvolvimento de produtos.

Dessa forma, o objetivo do modelo proposto foi desenvolver um conjunto amplo de critérios em sustentabilidade que pudesse ser usado para avaliar sistemas de produção, assim como a sustentabilidade como um todo da companhia. Como é descrito pelos autores, um pré-requisito para se promover a sustentabilidade das operações, projetos e corporação, vem a ser a definição e a concretização de uma política para a sustentabilidade institucional. É fundamental que a organização reconheça o seu papel para a sociedade e o meio-ambiente, somente depois as outras iniciativas poderiam ser avaliadas de acordo com o modelo do resultado triplo.

As companhias podem incorporar princípios sustentáveis às suas atividades das seguintes maneiras: durante a preparação e a revisão da estratégia de negócio, dando suporte aos novos acordos e negociações, desenvolvendo novos projetos contendo princípios da sustentabilidade e por fim, ampliando a visão de sustentabilidade para além dos limites da empresa (LABUSCHAGNE; BRENT; ERC, 2005).

A Figura 3.16 ilustra o modelo elaborado pelos autores para avaliar o desempenho da sustentabilidade das operações de uma empresa. Dentro do modelo proposto, as iniciativas operacionais e as iniciativas sociais são consideradas separadamente. A responsabilidade social corporativa (CSR) ou os investimentos sociais corporativos (CSI) não são vistos como a única contribuição da empresa, as atividades operacionais também exercem papel de destaque no desempenho social e diferenciam-se por estarem integradas diretamente as atividades de negócio (LABUSCHAGNE; BRENT; ERCK, 2005, p.376):

> CSI ou CSR não devem ser confundidos, ou interpretados, como a única dimensão da sustentabilidade social de uma indústria [...] A sustentabilidade social das principais atividades de negócio deve ser avaliada em termos dos diferentes programas que existem em toda a companhia. Com o objetivo de assegurar essa distinção, o *framework* do modelo proposto define a estratégia corporativa em duas partes distintas: iniciativas operacionais, os quais incluem as principais atividades de negócio, e iniciativas sociais, os quais se referem aos programas CSI e CSR.

Na análise realizada foram consideradas somente as iniciativas operacionais. Como pode ser visto na Figura 3.16, o nível operacional da empresa é avaliado segundo as três dimensões da sustentabilidade: econômica, ambiental e social. A partir de cada uma destas, surgem aspectos que servem de ponto de partida para a elaboração dos indicadores de desempenho. Labuschagne, Brent e Erck (2005) argumentam que o desempenho econômico não é interpretado como sendo um agente externo e, sim, como uma medida exclusivamente interna. Esta visão é justificada pela idéia de que as iniciativas operacionais contribuem diretamente para a lucratividade da companhia, i.e., as operações da empresa precisam estar em plenas condições para que as demais áreas não sejam penalizadas. Logo, o foco da medição da sustentabilidade econômica é interno, enquanto as contribuições externas pertencem à sustentabilidade social.

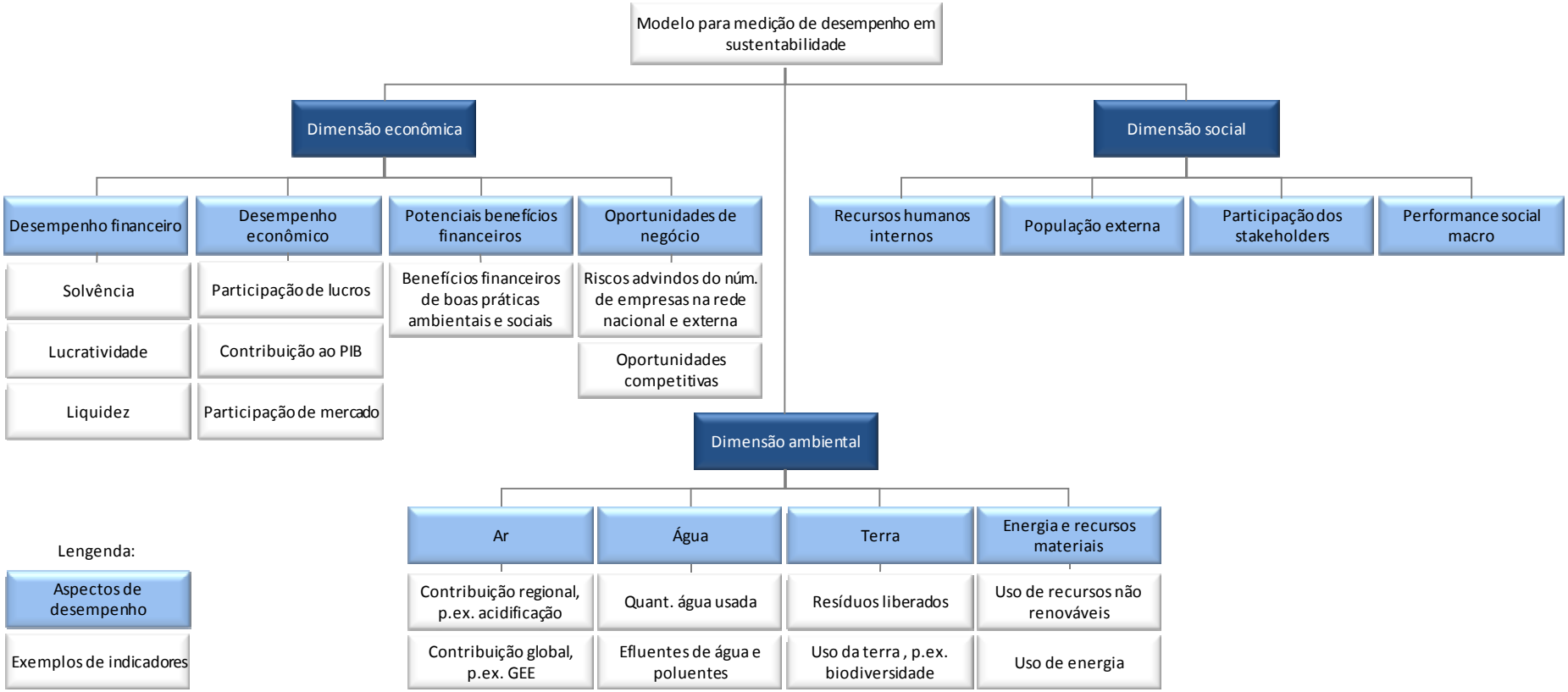


Figura 3.16 – Modelo Labuschagne, Brent e Erck.

Fonte – LABUSCHAGNE; BRENT; ERCK, 2005, p.377

Os aspectos para a medição do desempenho ambiental foram separados em quatro diferentes grupos: ar, água, terra, energia e recursos minerais. Embora aspectos sejam definidos claramente, a identificação de quais seriam os mais relevantes ainda não é fácil. Labuschagne, Brent e Erck (2005) sugerem, além do tipo de análise causa-efeito, a ferramenta *Life Cycle Assessment* (LCA) como solução para se encontrar quais aspectos são mais relevantes.

A dimensão social do *framework*, além de medir a sustentabilidade das operações, está preocupada com os impactos proporcionados pela empresa fora de seus limites e com o tipo de relação junto aos *stakeholders*. Dessa forma, a sustentabilidade social tem dois focos, o interno e o externo. O foco interno trata da saúde e do bem estar dos funcionários, práticas disciplinares, equidade e direitos humanos. Treinamento, oportunidades de crescimento profissional e desenvolvimento humano também devem ser incluídos. O foco externo está preocupado com a comunidade local, regional e nacional. Através da Figura 3.17 é possível visualizar todos os diferentes aspectos desenvolvidos para a avaliação social de operações produtivas.

A estrutura formulada na Figura 3.17 cobre um conjunto consideravelmente amplo de aspectos. A quantidade de critérios usados para a avaliação é suficiente para investigar os verdadeiros impactos provocados nos sistemas sociais, assim como sua relação com os vários *stakeholders*. Entretanto, é chamada a atenção para a realidade das companhias que não depositam a devida atenção na medição do desempenho social, "muito menos trabalho tem sido feito sob sustentabilidade social, em relação à gestão dos negócios" (LABUSCHAGNE; BRENT; ERCK, 2005, p. 382).

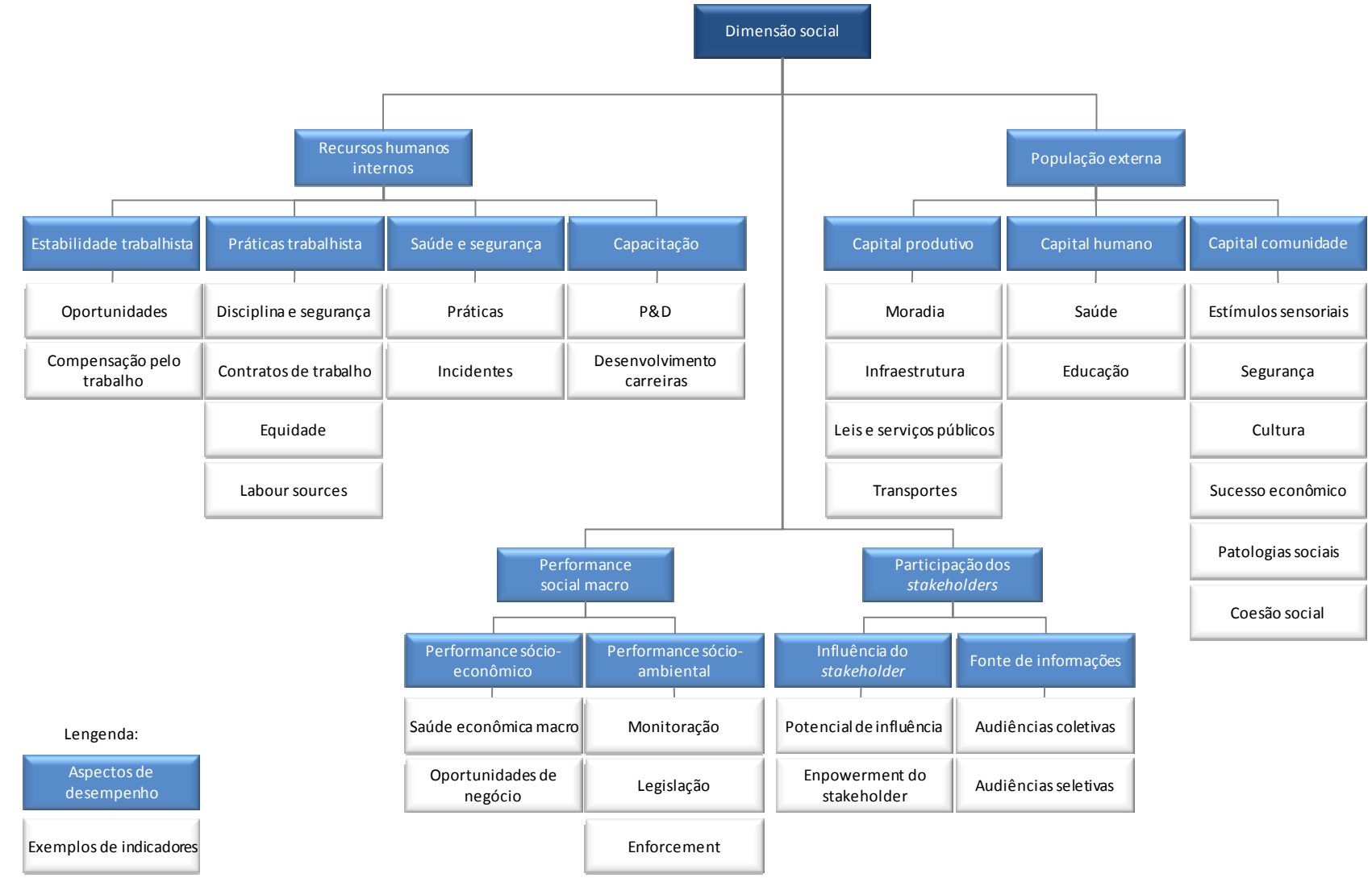


Figura 3.17 – Modelo Labuschagne, Brent e Erck para a dimensão social

Fonte – LABUSCHAGNE; BRENT; ERCK, 2005, p.378.

3.5.9. Modelo da Associação dos Engenheiros Alemães

O objetivo do modelo desenvolvido pela Associação de Engenheiros Alemães foi fornecer uma abordagem prática e efetiva em custo para integrar critérios de gestão sustentável aos processos de negócio (produtos e serviços), assegurando a transparência e rastreabilidade das informações geradas. Segundo a Associação dos Engenheiros Alemães (VDI 4070, 2006), o conjunto de orientações que constam no manual para a sustentabilidade das empresas visa fornecer informações necessárias para a implantação de metas e objetivos sustentáveis.

O procedimento para a avaliação da sustentabilidade das operações da Associação de Engenheiros Alemães também segue o modelo *plan-do-check-act* (ciclo PDCA), adotado por outros sistemas de medição de desempenho[16]. Considerando somente a fase de planejamento, uma importante atribuição vem a ser a definição dos indicadores de desempenho a serem empregados na avaliação e monitoramento das operações.

A Figura 3.18 traz a série de indicadores de desempenho desenvolvidos pela Associação de Engenheiros Alemães que servem de base para as empresas implantarem programas de gestão sustentável. Os indicadores estão classificados em três diferentes graus de importância, os indicadores principais, adicionais e complementares respectivamente. Embora a empresa possa selecionar os indicadores que sejam mais adequados as suas operações, é recomendado pela Associação de Engenheiros Alemães o uso dos indicadores classificados como principais (em negrito na Figura 3.18) pois são vistos como cruciais para a reportagem do rendimento em sustentabilidade. Como está descrito na norma, o modelo enfatiza os principais aspectos: "o guia situa-se nos principais aspectos que são também de relevância política e social" (VDI 4070, 2006, p. 5).

Algumas considerações devem ser feitas à respeito de certos indicadores de desempenho, a começar sobre ao método de cálculo do valor adicionado, ou *value added*. Esse cálculo deve ser feito subtraindo-se do valor de vendas, o total dos custos de compra de materiais e serviços e depreciação. O custo relativo ao desenvolvimento de pessoal é efetuado dividindo-se total gasto em treinamento pela folha de pagamento. Já o nível de ruído no ambiente de trabalho deve respeitar as normas de saúde da empresa e das legislações sobre saúde e segurança no trabalho.

---

[16] "Os projetos de melhoria contínua são parte importante dos programas de gestão sustentável. O ciclo PDCA deve ser aplicado periodicamente em produtos e processos, i.e., todos locais de trabalho e níveis gerenciais da empresa, no esforço global para melhorar a sustentabilidade dos diferentes processos de produção" (VDI 4070, 2006, p.5).

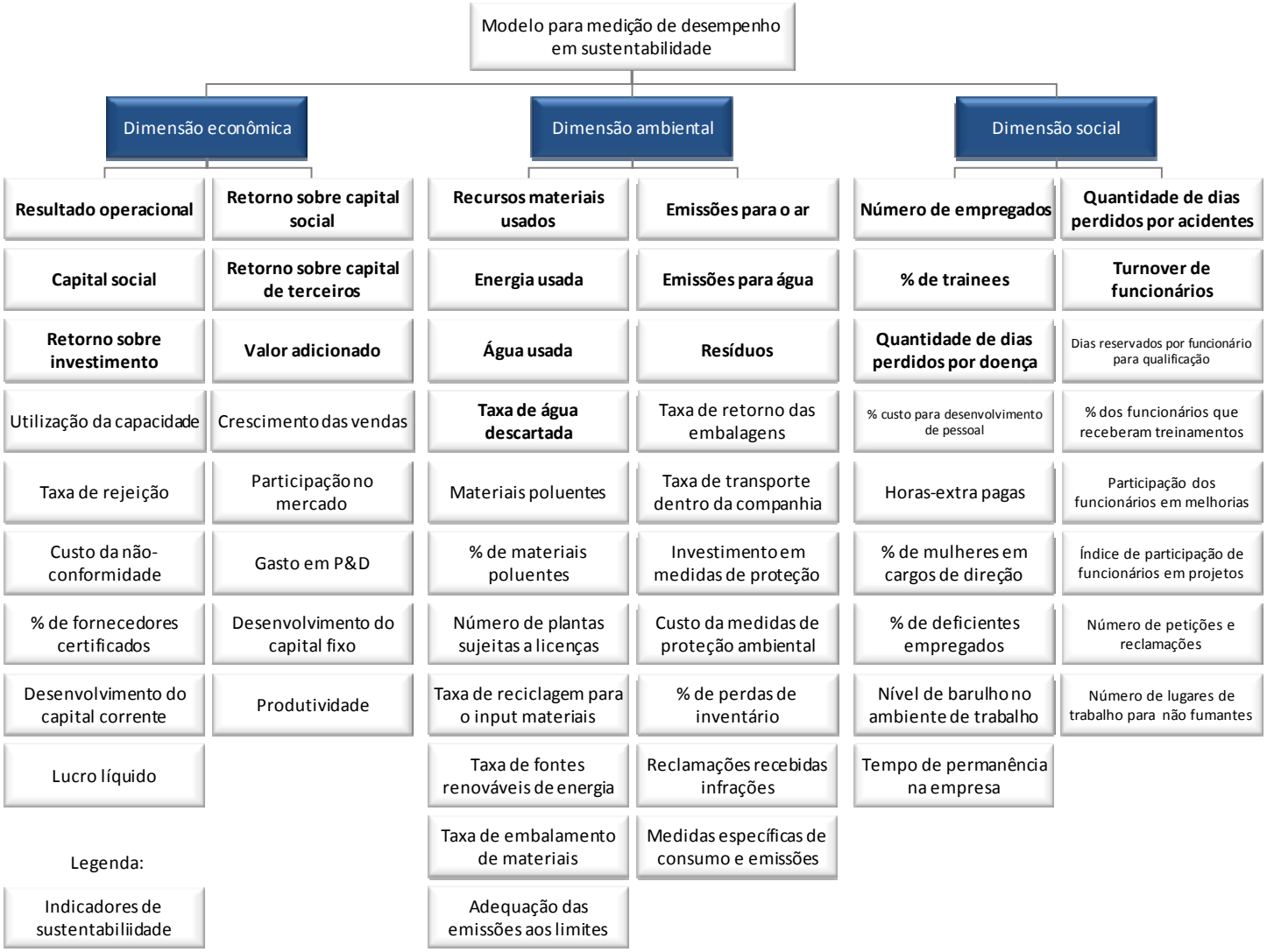


Figura 3.18 – Modelo da Associação dos Engenheiros Alemães

Fonte – VDI 4070, 2006, p.13.

3.5.10. Modelo Global Reporting Initiative

O documento elaborado pelo *Global Reporting Initiative*[17] apresenta o conteúdo e os princípios necessários para a construção de relatórios de sustentabilidade. As métricas estão estruturadas de acordo com a hierarquia: categoria (dimensão), aspectos e indicadores. As definições usadas pelo GRI estão em concordância com outros modelos de medição de desempenho.

Os indicadores propostos pela GRI atendem ao conceito do resultado triplo, tratando, portanto, das dimensões social, ambiental e econômica. O modelo procura coletar medidas de desempenho para diferentes tipos de aspectos de desempenho. A Figura 3.19 apresenta as categorias e aspectos de acordo com a estrutura proposta pelo GRI (2006). Métricas podem ser desenvolvidas pelas empresas de acordo com o escopo da Figura 3.19 e em concordância com os aspectos mais importantes de suas atividades principais.

Dentro dos padrões de medidas definidos pelo GRI, os indicadores podem ser tanto quantitativos quanto qualitativos. Os indicadores qualitativos são mais indicados em situações complexas de serem medidas, servindo perfeitamente como complemento para a análise das informações. As medidas qualitativas também serviriam melhor para os casos em que o impacto a ser mensurado é compartilhado por outras empresas.

[17] O GRI foi criado em 1997 como uma iniciativa conjunta entre organizações não governamentais que trabalham para economias responsáveis (*Coalition for Environmentally Responsible Economies*) e o Programa para o Meio-ambiente das Nações Unidas, com o objetivo central de aprimorar a qualidade, rigor e utilidade dos relatórios em sustentabilidade.

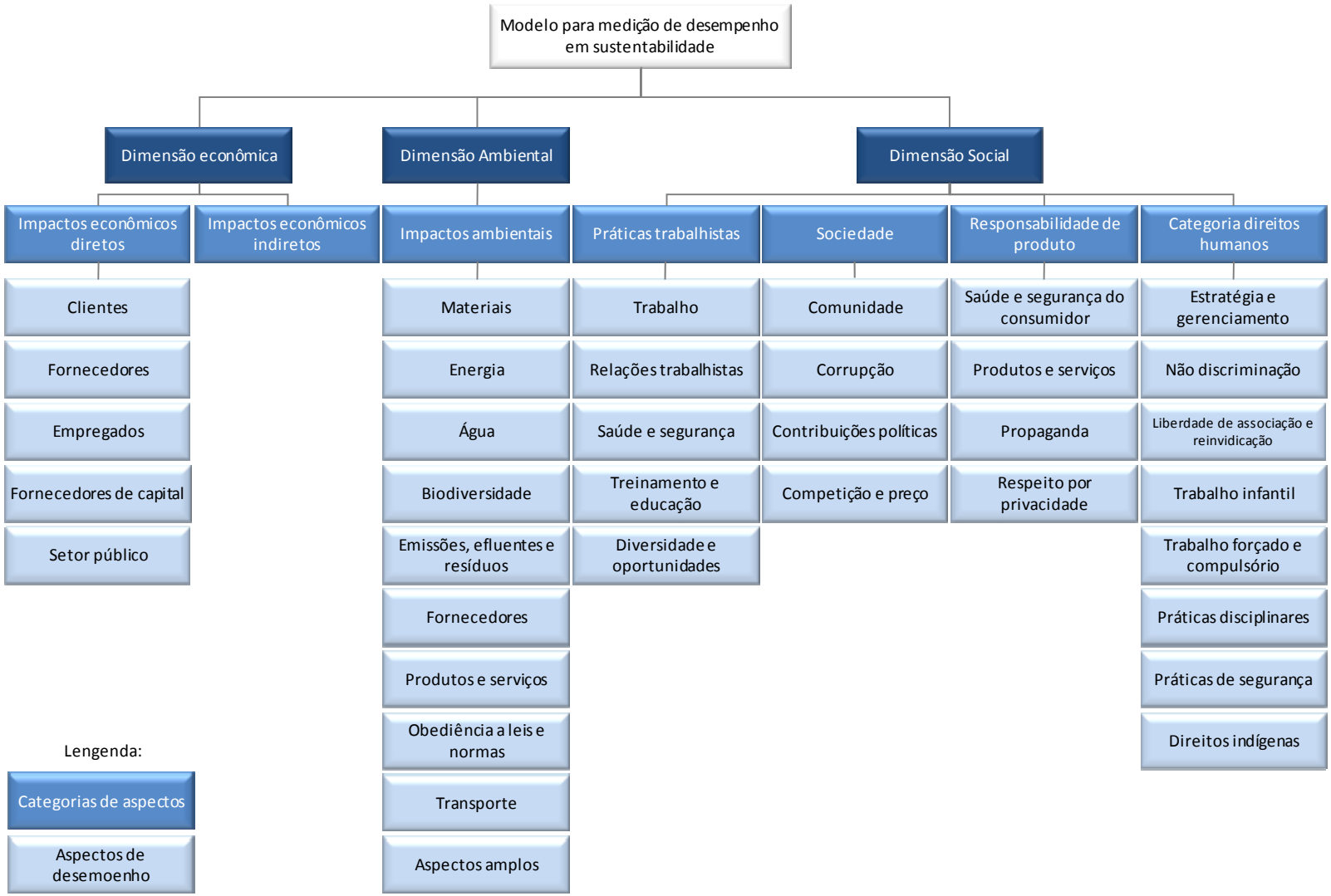


Figura 3.19 – Modelo *Global Reporting Initiative.*

Fonte – GRI, 2006, p.44.

A dimensão econômica abordada pelo GRI trata dos impactos sobre os *stakeholders* e o sistema econômico, local, nacional e global. Os impactos econômicos podem ser divididos em dois tipos: impactos diretos, tais medidas analisam o fluxo monetário entre a organização e os *stakeholders*, p.ex. custo de materiais adquiridos de fornecedores; ou impactos indiretos, externalidades, custos e benefícios, que surgem de transações e não estão totalmente no valor monetário do negócio, p.ex. patentes, mudanças de localização, contribuição para o GDP ou competitividade nacional (Quadro 3.6).

Logo, as medidas de desempenho econômico são diferentes das usuais. Essas medidas estão mais preocupadas com o status econômico da organização e não somente com a condição financeira, tradicionalmente valorizada pelas empresas. A atenção esta nas interações diretas e indiretas com os *stakeholders* e como essas partes são afetadas. Nesse caso, os *shareholders* são considerados como uma das partes entre outros grupos de interesse.

Quadro 3.6 – Indicadores econômicos de desempenho, segundo o modelo.

Dimensão	Tipo de indicador	Aspecto	Indicador
Econômica	Principal	Clientes	Indicador de fluxo monetário, p.ex., vendas
Econômica	Principal	Fornecedores	Custo de todos os materiais, serviços e bens comprados
Econômica	Principal	Fornecedores	Percentual de contratos pagos de acordo com termos acordados
Econômica	Principal	Empregados	Folha de pagamento e benefícios por país ou região
Econômica	Principal	Fornecedores de capital	Divisão por credor dos interesses pagos
Econômica	Principal	Fornecedores de capital	Queda ou aumento dos ganhos retidos ao final do período
Econômica	Principal	Setor público	Total de pagamentos feitos em forma de impostos por país
Econômica	Principal	Setor público	Benefícios recebidos por país ou região
Econômica	Principal	Setor público	Doações para comunidades, sociedade civil e outros grupos
Econômica	Adicional	Fornecedores	Lista dos fornecedores por país e organização
Econômica	Adicional	Indiretos	Identificar externalidades principais
Econômica	Adicional	Setor público	Infra-estrutura construída fora da atividade principal da empresa

Fonte – GRI, 2006, p.47.

Os indicadores de desempenho GRI podem ser classificados como principais, i.e., aqueles que interessam a grande maioria do *stakeholders*, ou adicionais. Os indicadores adicionais não são usados em todos os relatórios em sustentabilidade e servem a um grupo específico de *stakeholders*. Em alguns casos, as medidas adicionais servem como uma sinalização de detalhamentos futuros a serem integrados aos relatórios da organização.

Tratando da dimensão ambiental da sustentabilidade, esta inclui impactos em sistemas naturais do tipo vivos e não vivos, contando ecossistema, terra, ar e água. É argumentado pelos autores proponentes do método GRI que a dimensão ambiental de desempenho do

sistema atingiu o maior nível de concordância e uniformidade dentre as três categorias do *triple bottom line* para a reportagem da sustentabilidade (GRI, 2006). No Quadro 3.7, estão listados indicadores principais para o desempenho ambiental da sustentabilidade.

Quadro 3.7 – Indicadores principais para o desempenho ambiental.

Dimensão	Tipo de indicador	Aspecto	Indicador
Ambiental	Principal	Materiais	Materiais usados por peso e volume
Ambiental	Principal	Materiais	Percentual de materiais usados provenientes de reciclagem
Ambiental	Principal	Água	Total de água empregada
Ambiental	Principal	Produtos e serviços	Impactos ambientais significantes
Ambiental	Principal	Produtos e serviços	Percentual reaproveitado ao final de vida
Ambiental	Principal	Energia	Energia direta usada por tipo de fonte
Ambiental	Principal	Energia	Energia indireta usada
Ambiental	Principal	Biodiversidade	Propriedades em locais ricos em biodiversidade
Ambiental	Principal	Biodiversidade	Maiores impactos associados à biodiversidade
Ambiental	Principal	Emissões, efluentes e resíduos	Emissões de gases greenhouse
Ambiental	Principal	Emissões, efluentes e resíduos	Substâncias nocivas a camada de ozônio
Ambiental	Principal	Emissões, efluentes e resíduos	Emissão de outras substâncias importantes
Ambiental	Principal	Emissões, efluentes e resíduos	Total de resíduos por tipo e destino
Ambiental	Principal	Emissões, efluentes e resíduos	Efluentes para água por tipo
Ambiental	Principal	Emissões, efluentes e resíduos	Vazamentos de óleos, produtos químicos e combustíveis
Ambiental	Principal	Obediência a leis	Não regularidades a leis e acordos

Fonte – GRI, 2006, p.49.

Segundo GRI (2006), as informações devem ser reportadas em termos absolutos e também de forma normalizada, p.ex., uso de recursos por unidade de produto. Informações absolutas são especialmente importantes para proporcionar perspectivas da magnitude de impactos em sistemas amplos, enquanto que as medidas normalizadas oferecem indicadores de eficiência e possibilitam a comparação entre diferentes organizações. Em geral, *stakeholders* devem estar hábeis a calcular valores normalizados usando dados de relatórios. A relação entre as medidas de desempenho econômico e ambientais resultam em indicadores de ecoeficiência. Já a relação entre medidas de desempenho econômico e social resultam em indicadores sócio-econômicos. Para ter uma visão mais abrangente dos tipos de medidas de sustentabilidade basta consultar a Figura 3.1.

Além dos indicadores principais, o modelo GRI também específica um conjunto extenso de indicadores adicionais para a dimensão ambiental. A biodiversidade é o aspecto com o maior número de indicadores adicionais. A lista de indicadores adicionais pode ser visto no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Indicadores adicionais para desempenho ambiental.

Dimensão	Tipo de indicador	Aspecto	Indicador
Ambiental	Adicional	Água	Fontes e ecossistemas afetados pelo uso
Ambiental	Adicional	Água	Razão do uso versus a capacidade de renovação
Ambiental	Adicional	Água	Total de água reciclada e reusada
Ambiental	Adicional	Fornecedores	Desempenho ambiental dos fornecedores
Ambiental	Adicional	Transporte	Impactos ambientais significantes
Ambiental	Adicional	Energia	Iniciativas para energia renovável e eficiência
Ambiental	Adicional	Energia	Pegada ecológica (energia) dos produtos
Ambiental	Adicional	Energia	Outros usos indiretos de energia/impactos
Ambiental	Adicional	Biodiversidade	Terras usadas para produção ou extrativismo
Ambiental	Adicional	Biodiversidade	Percentual de superfície impermeabilizada
Ambiental	Adicional	Biodiversidade	Impacto sob áreas protegidas e sensíveis
Ambiental	Adicional	Biodiversidade	Percentual de área preservada e restaurada
Ambiental	Adicional	Biodiversidade	Ações para recuperar áreas degradadas
Ambiental	Adicional	Biodiversidade	Espécies ameaçadas de extinção na área afetada
Ambiental	Adicional	Biodiversidade	Unidades operando ao redor de áreas protegidas
Ambiental	Adicional	Emissões, efluentes e resíduos	Outras emissões indiretas de gases greenhouse
Ambiental	Adicional	Emissões, efluentes e resíduos	Manipulação de resíduos perigosos
Ambiental	Adicional	Emissões, efluentes e resíduos	Ecossistemas e fontes de água afetados
Ambiental	Adicional	Aspectos amplos	Total de gastos ambientais

Fonte – GRI, 2006, p.49.

A dimensão social proposta pelo GRI utiliza uma série de indicadores para descrever os impactos proporcionados pelas empresas por intermédio de suas operações. Aspectos relativos a práticas trabalhistas, direitos humanos, ou assuntos mais amplos afetando consumidores, comunidades e outros *stakeholders* são avaliados para definir o desempenho social.

É interessante fazer uma observação sobre a natureza dos indicadores sociais. Estes diferem consideravelmente da natureza dos indicadores econômicos e ambientais. As medidas usadas para os impactos sociais são comumente difíceis de serem quantificadas. Conseqüentemente, parte dos pontos avaliados foi desdobrada em medidas qualitativas. Dentre os diferentes modelos estudados, o modelo GRI vem a ser o mais completo para a dimensão social, apresentando um escopo amplo e uma quantidade superior de indicadores.

No caso do aspecto, Produtos e Serviços, diversas sugestões de medidas foram feitas pelo GRI, sendo a grande maioria classificada como indicadores adicionais e somente três classificados como principais (Quadro 3.9).

Quadro 3.9 – Indicadores sociais para a categoria Produtos e Serviços.

Dimensão	Tipo de indicador	Aspectos	Indicador
Social	Principal	Saúde e segurança do consumidor	Descrição da política para preservar saúde e segurança
Social	Principal	Produtos e serviços	Ações para informação sobre produto e labelling
Social	Principal	Respeito por privacidade	Ações voltadas a privacidade do consumidor
Social	Adicional	Saúde e segurança do consumidor	Número e tipo de não conformidades, incluindo multas
Social	Adicional	Saúde e segurança do consumidor	Número de reclamações e tipo coletadas por representantes
Social	Adicional	Saúde e segurança do consumidor	Código de adequação voluntária, rótulos e prêmios
Social	Principal	Produtos e serviços	Número e tipo de não conformidades, incluindo multas
Social	Adicional	Produtos e serviços	Mecanismos para apurar satisfação de clientes
Social	Adicional	Propaganda	Ações voltadas ao atendimento de normas ou padrões
Social	Adicional	Propaganda	Número e tipo de regulações para marketing e propaganda
Social	Adicional	Respeito por privacidade	Número de reclamações substancias relacionadas à privacidade do cliente

Fonte – GRI, 2006, p.52.

Analisando agora a categoria de impacto relativa à Sociedade, os indicadores estão separados segundo os seguintes critérios: corrupção, competição e preço, contribuições políticas e comunidades. Muitas das medidas sugeridas pelo GRI foram classificadas como adicionais, mesmo assim não deixam de ter relevância como fonte de informações suplementares aos *stakeholders* (Quadro 3.10).

Quadro 3.10 – Indicadores sociais para a categoria Sociedade.

Dimensão	Tipo de indicador	Aspecto	Indicador
Social	Principal	Comunidades	Descrição das políticas para gerenciar o impacto em comunidades
Social	Principal	Contribuições políticas	Descrição dos meios para gerenciar o lobby político e contribuições
Social	Principal	Corrupção	Descrição dos meios para combater a corrupção e suborno
Social	Adicional	Comunidades	Prêmios importantes recebidos para o desempenho social, étnico e ambiental
Social	Adicional	Contribuições políticas	Quantidade de dinheiro destinado a política
Social	Adiciona	Competição e preço	Decisões da corte envolvendo leis antitrustes e monopólio
Social	Adiciona	Competição e preço	Meios para combater ambiente não competitivo

Fonte – GRI, 2006, p.52.

Os indicadores principais e adicionais para a categoria Práticas Trabalhistas estão representados no Quadro 3.11. Os aspectos para essa categoria foram criados respeitando as

leis e recomendações estabelecidas pela Organização Internacional do Trabalho, ou *International Labor Organization* (ILO).

Quadro 3.11 – Indicadores sociais para a categoria Práticas Trabalhistas.

Dimensão	Tipo de indicador	Aspecto	Indicador
Social	Principal	Saúde e segurança	Reportagem de acidentes e doenças
Social	Principal	Saúde e segurança	Presença de comitês de saúde e segurança dos trabalhadores
Social	Principal	Saúde e segurança	Ausência de trabalhadores e incidentes envolvendo trabalhadores
Social	Principal	Saúde e segurança	Programas envolvendo HIV no trabalho e na comunidade
Social	Principal	Trabalho	Detalhamento do tipo de vínculo de trabalho, p.ex., temporário ou permanente
Social	Principal	Trabalho	Quantidade de empregos criados e turn-over
Social	Principal	Relações trabalhistas	Percentual de trabalhadores representados por uniões ou outros meios
Social	Principal	Relações trabalhistas	Tipo de relação com os trabalhadores para consulta ou mudanças
Social	Principal	Treinamento e educação	Número de horas de treinamento por ano/funcionário
Social	Principal	Diversidade e oportunidades	Descrição de políticas e programas de igualdade
Social	Principal	Diversidade e oportunidades	Composição do quadro de direção
Social	Adicional	Saúde e segurança	Evidências de obediência a lei internacional do trabalho
Social	Adicional	Saúde e segurança	Descrição de acordos com unidades de representação de trabalhadores
Social	Adicional	Trabalho	Benefícios além dos obrigatórios por lei, e.g. educação, saúde.
Social	Adicional	Relações trabalhistas	Participação dos trabalhadores nas decisões
Social	Adicional	Treinamento e educação	Programas para o gerenciamento de carreiras
Social	Adicional	Treinamento e educação	Programas específicos para uma gestão capacitada

Fonte – GRI, 2006, p.52.

Os indicadores sociais para a categoria Direitos Humanos podem ser vistos logo em seguida no Quadro 3.12. Por meio desses indicadores sociais é possível traçar um perfil do comportamento da empresa perante a sociedade e detalhar as boas práticas para com a população.

Quadro 3.12 – Indicadores sociais para a categoria Direitos Humanos.

Dimensão	Tipo de indicador	Aspecto	Indicador
Social	Principal	Estratégia e gerenciamento	Meios para lidar com os direitos humanos no trabalho
Social	Principal	Estratégia e gerenciamento	Impactos causados devido a investimentos
Social	Principal	Estratégia e gerenciamento	Procedimentos para considerar direitos humanos na cadeia de suprimentos
Social	Principal	Não discriminação	Programas para coibir a discriminação
Social	Principal	Liberdade de associação e reinvidicação	Descrição das condições para liberdade de associação e barganha
Social	Principal	Trabalho infantil	Condições para aplicar lei que proibi trabalho infantil
Social	Principal	Trabalho forçado	Condições para aplicar lei que proibi trabalho forçado
Social	Principal	Direitos indígenas	Descrição dos meios para considerar os direitos indígenas
Social	Principal	Direitos indígenas	Mecanismos para a atuação conjunta da comunidade em atividades de proteção
Social	Principal	Direitos indígenas	Quantidade dos ganhos redistribuídos para a comunidade
Social	Adicional	Estratégia e gerenciamento	Treinamento em aspectos relacionados a direitos humanos
Social	Adicional	Práticas disciplinares	Descrição de processos de apelação
Social	Adicional	Práticas disciplinares	Sistemas de proteção dos funcionários e não-retaliação
Social	Adicional	Práticas de segurança	Treinamento em direitos humanos para pessoal de segurança

Fonte – GRI, 2006, p.52.

3.5.11. Modelo do Instituto dos Engenheiros Químicos

O guia desenvolvido pela Instituição dos Engenheiros Químicos[18] visa introduzir uma série de indicadores que pudessem ser usados na avaliação da sustentabilidade de sistemas de produção e dessa forma, auxiliar os engenheiros a proporcionar uma maior eficiência ambiental, social e econômica.

De acordo com a Instituição dos Engenheiros Químicos (2002), as métricas apresentadas a seguir foram selecionadas por especialistas e devem ser interpretadas de acordo com as características das operações a serem avaliadas. Todas as medidas podem ser divididas pelas medidas de saída do processo com o objetivo de serem produzidos indicadores relativos de desempenho. Deste modo, são usadas taxas para relacionar medidas sociais ou ambientais contra valores econômicos.

Na Figura 3.20, está representada a estrutura do modelo de medição de desempenho desenvolvido pela Instituição dos Engenheiros Químicos. A dimensão econômica está

[18] A Instituição dos Engenheiros Químicos, com mais de 25.000 associados por todo mundo, enxerga o desenvolvimento sustentável como o assunto mais importante a ser tratado pela sociedade (IChemE, 2002).

separada de acordo com as categorias: lucratividade, valor e taxas, e investimentos (diretos e indiretos). Exemplos de indicadores também são apresentados. Os indicadores econômicos abordam a questão diferentemente dos indicadores financeiros usuais, pois estão focam nas medidas de criação de valor e de riqueza.

Os indicadores de desempenho para a dimensão ambiental estão separados em dois grupos: emissões, efluentes e resíduos, e recursos. Esses grupos ainda se dividem em outras categorias de desempenho, sendo efetivos para captar os impactos ambientais gerados pelos processos de produção. As medidas de desempenho ambiental devem ser relacionadas ao peso ou ao valor adicionado ao produto, a fim de produzir medidas relativas de ecoeficiência. Através de tais medidas é possível fazer uma perfeita correlação entre as informações disponíveis.

Por último, têm-se os indicadores de desempenho para a dimensão social. Três grupos de indicadores tentam avaliar o desempenho no ambiente interno e externo a empresa. Contudo, não apresentam o mesmo nível de sofistificação do modelo GRI. No modelo da Instituição dos Engenheiros Químicos (2002) existem sugestões de métricas para a dimensão social. Esses indicadores foram desenvolvidos com o intuito de refletir a atitude da companhia para com os seus próprios funcionários, fornecedores, contratados terceirizados e clientes, e também sociedade.

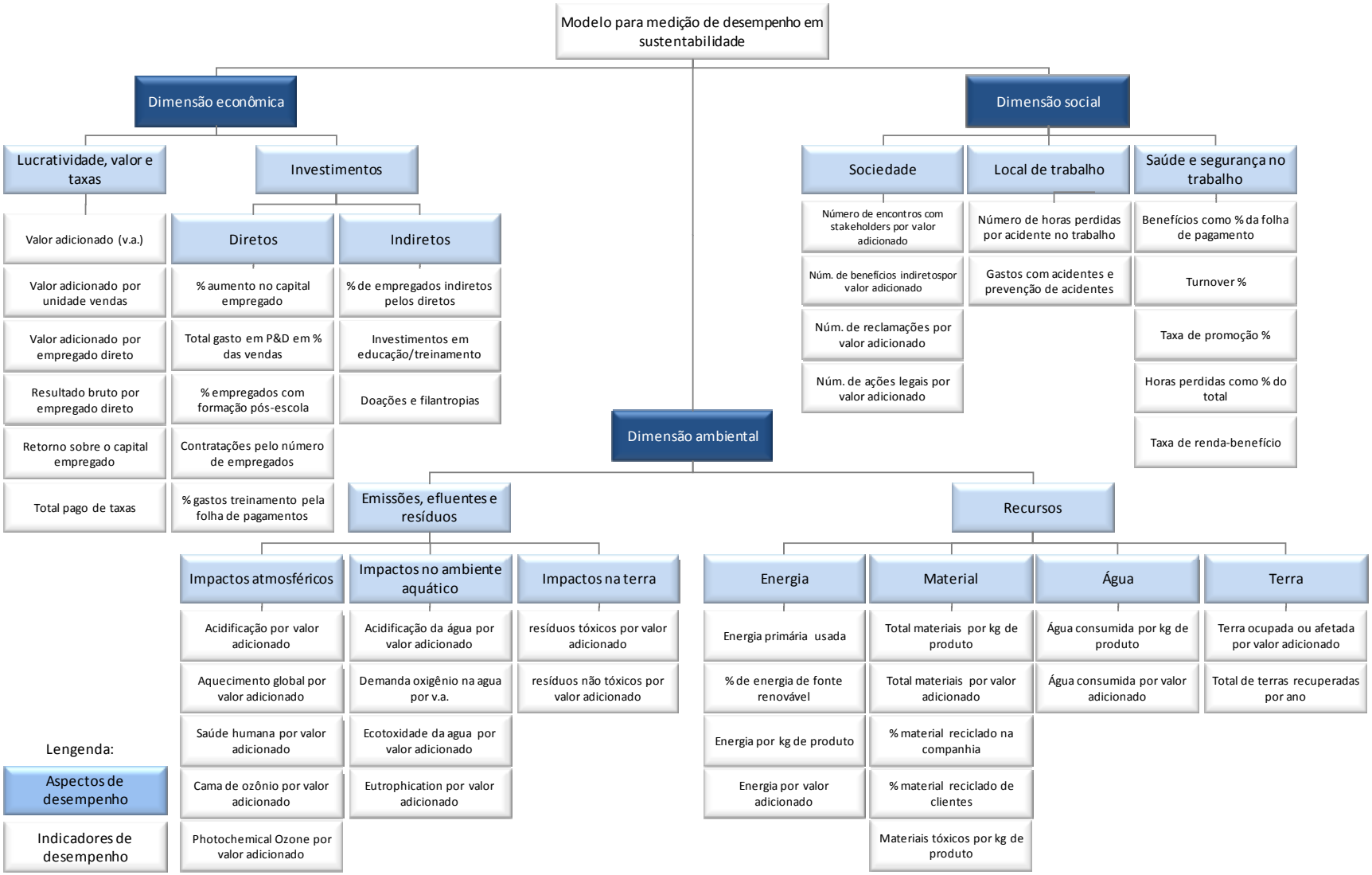


Figura 3.20 – Modelo IChemE

Fonte – ICHEME, 2002, p.7-14.

3.5.12. Modelo do Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável

O Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD)[19] estabelece uma abordagem flexível a ser usada em diferentes setores empresariais para a medição de desempenho. O método apresentado visa ajudar as empresas, indivíduos, governo e outras organizações a tornarem-se mais sustentáveis, valorizando dois ingredientes essenciais - progresso econômico e respeito ao meio-ambiente. Os indicadores servem para monitorar o desempenho da organização e estabelecer objetivos.

A abordagem proposta pelo WBCSD contém três níveis para a organização da informação: categorias, aspectos e indicadores. Estes níveis são consistentes com a terminologia utilizada nas séries ISO 14031 (ISO 14031, 1999) e na *Global Reporting Initiative* (GRI, 2006). Os indicadores definidos pelo WBCSD dividem-se em duas categorias, meio-ambiente e economia, conforme a fórmula para o cálculo da eco-eficiência.

Os dados podem ser apresentados como valores absolutos, razões de eco-eficiência, ou indexados a um determinado ano ou a um objetivo. Para relacionar as duas dimensões da ecoeficiência, recomenda-se que a fórmula seja representada da seguinte forma: (valor do produto ou serviço)÷(influência ambiental). Os indicadores podem ser ainda classificados como principais ou adicionais. Os primeiros são importantes para priorizar e harmonizar as medidas de ecoeficiência, evitando dessa maneira a proliferação de indicadores e ajudando na clareza dos relatórios. Já os indicadores adicionais existem para serem usados em avaliações específicas. O modelo do Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável pode ser visto na Figura 3.21.

[19] O Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável, ou *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), é uma coligação de 130 empresas internacionais, que partilham o compromisso do desenvolvimento sustentável. Os membros associados provêm de 30 países e de mais de 20 sectores industriais importantes. A organização beneficia ainda de uma sólida rede global de conselhos empresariais nacionais e regionais e organizações em parceria (WBCSD, 2000).

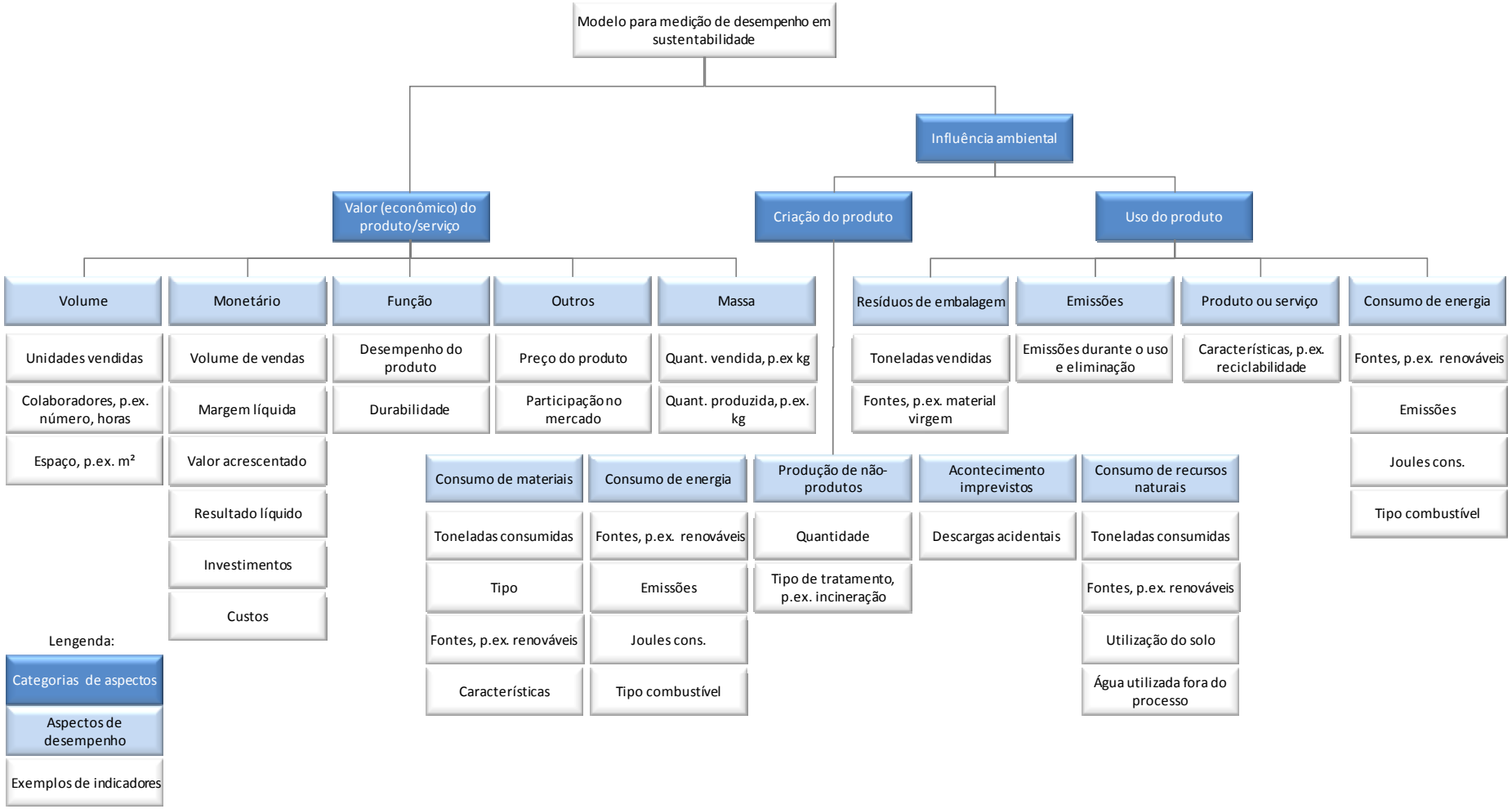


Figura 3.21 – Modelo do Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável

Fonte – WBCSD, 2000, p.31.

3.5.13. Modelo Veleva e Ellenbecker

Veleva e Ellenbecker (2001) apresentam uma nova ferramenta para a promoção da sustentabilidade no negócio, por meio do uso de indicadores voltados à produção sustentável. Os autores sugerem um novo método para a avaliação de desempenho, formado por indicadores principais e complementares. Os autores acreditam ser possível aplicar um conjunto de indicadores padronizados: "é melhor mensurar os parâmetros corretos aproximadamente do que os incorretos com grande precisão" (VOLLMANN[20], 1996 *apud* VELEVA; ELLENBECKER, 2001, p. 520).

Usualmente, os indicadores principais são comuns aos diferentes tipos de negócio. Já os indicadores suplementares são ajustáveis as companhias, processos, produtos e serviços. Enquanto alguns pontos são comuns a todas as empresas, como o consumo de energia ou de água, outras medidas não podem ser padronizadas. Logo, o uso de indicadores suplementares responde ao desafio de avaliar impactos de produção que sejam específicos. Os indicadores principais não são mais importantes, eles são somente o primeiro passo na procura por medidas de sustentabilidade. Em resumo, os indicadores principais, segundo Veleva e Ellenbecker (2001), visam:

a. Fornecer um conjunto padrão de indicadores cobrindo todos os seis aspectos de produção sustentável;
b. Sugerir indicadores simples e fáceis de serem aplicados;
c. Usar dados que já foram coletados para outros propósitos;
d. Evitar o uso excessivo de indicadores;
e. Sugerir indicadores que tratem de assuntos globais chave, p.ex., aquecimento global ou destruição da camada de ozônio;
f. Direcionar a organização para um comportamento correto;
g. Fornecer uma nova ferramenta e como medir os seus avanços rumo a uma produção sustentável.

Dessa forma, os autores sugerem 22 indicadores principais. Estes foram indicados para medir assuntos comuns a todas as instalações. A idéia dos autores foi aproveitar a própria experiência em trabalhos anteriores e, ainda, inserir indicadores de outros modelos, p.ex., WBCSD, ISO 14031 e GRI. O modelo de Veleva e Ellenbecker encontra-se ilustrado na Figura 3.22.

---

[20] VOLLMANN, T. **The transformation imperative**: achieving market dominance through radical change. Boston, MA: Harvard Business School Press, 1996.

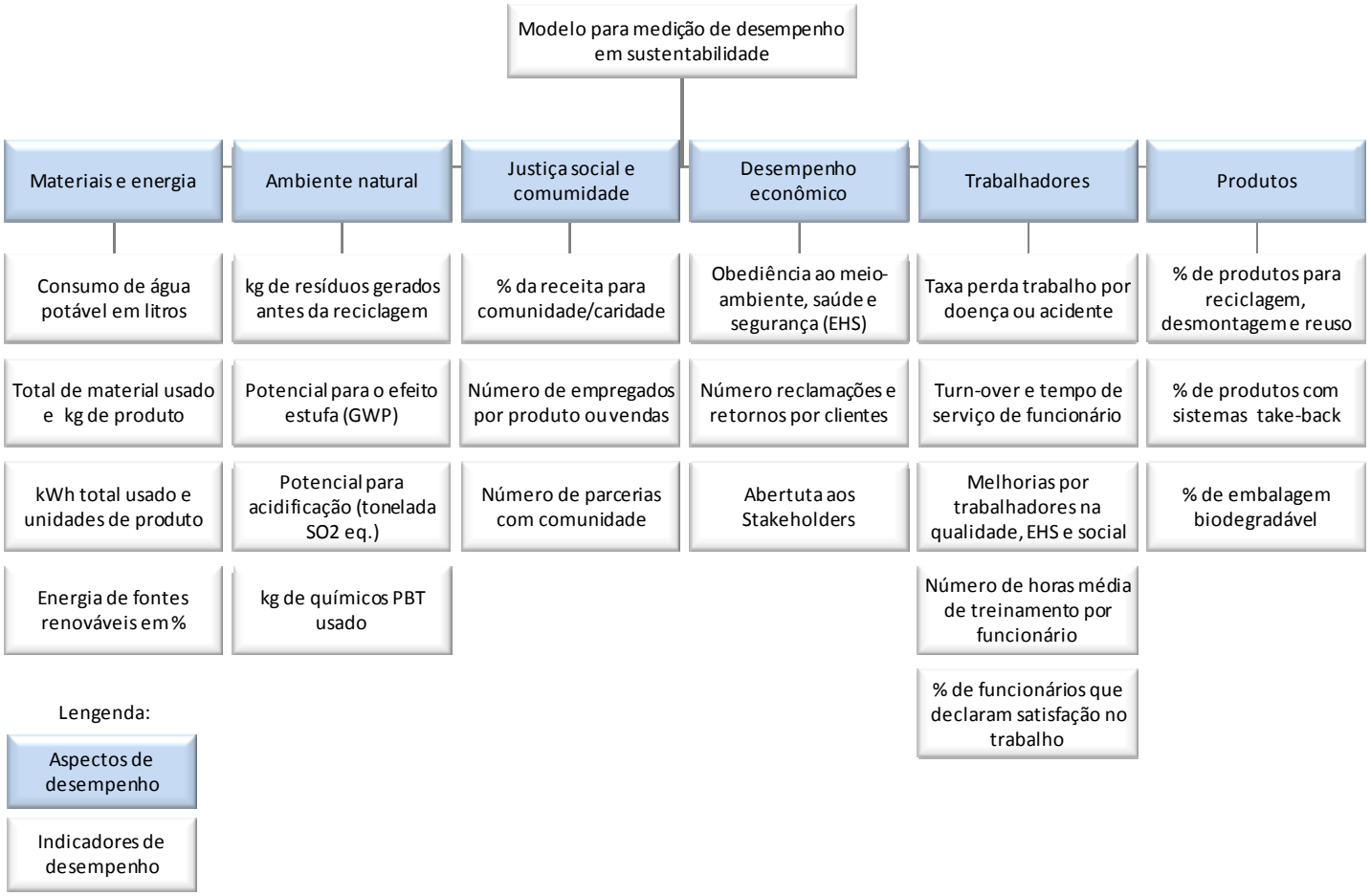


Figura 3.22 – Modelo de Veleva e Ellenbecker.

Fonte – VELEVA; ELLENBECKER, 2001, p.525-530.

3.5.14. Modelo Azapagic

O modelo desenvolvido por Azapagic (2004) também contribui com um *framework* de indicadores de sustentabilidade para a mensuração do desempenho. Os indicadores foram desenvolvidos para serem aplicados em sistemas de produção[21], podendo ser usado internamente para a identificação de boas oportunidades ou, então, externamente, em relatórios de sustentabilidade, ou para engajar *stakeholders* (Figura 3.23).

Figura 3.23 – Modelo Azapagic.
Fonte – AZAPAGIC, 2003, p.647.

Conforme Azapagic (2004), os indicadores econômicos avaliam o impacto econômico do sistema de produção frente aos seus *stakeholders* internos e externos e também, no sistema econômico local, nacional e global. Assim, os indicadores econômicos incluem medidas

[21] O modelo de Azapagic (2004) foi concebido para diferentes sistemas de produção, porém com maior ênfase no setor de mineração.

financeiras usuais como o lucro e também, outras medidas não tradicionais, adequadas para se refletir contextos maiores no qual a empresa opera. Já os indicadores ambientais medem o impacto da empresa nos sistemas naturais, incluindo humanos, ecossistemas, terra, ar e água. Esses impactos podem ser locais, regionais e globais, afetando assim uma grande quantidade de *stakeholders*. A dimensão social, por sua vez, deve mensurar o impacto da empresa em muitos grupos de interesse e de acordo com diferentes dimensões, p.ex., direitos humanos, sendo por isso de difícil mensuração.

3.6. Análise comparativa dos modelos de avaliação de desempenho

Como foi exposto na seção 3.5, diferentes modelos para a medição de desempenho em sustentabilidade podem ser utilizados por empresas em processos, produtos e serviços. Para a análise comparativa foram usados quatorze modelos que atendem ao conceito do resultado triplo: as necessidades econômicas, sociais e ambientais devem estar em equilíbrio para não comprometer o desenvolvimento futuro. Alguns dos modelos estudados, contudo, apresentam indicadores para somente uma ou então duas dimensões da sustentabilidade, i.e., alguns modelos contemplam apenas a sustentabilidade ambiental e outros, a sustentabilidade econômico-ambiental. Ainda assim, dada a relevância de tais sistemas uni ou bi-dimensionais, p.ex., ISO 14031 ou WBCSD, a contribuição de seus indicadores para a avaliação da sustentabilidade não poderia deixar de ser considerada na elaboração de um método voltado a processos de manufatura.

A estrutura dos modelos de medição de desempenho em sustentabilidade estudados é formada por diferentes níveis de abstração. Essa hierarquia possibilita uma profundidade de análise que será tanto maior, quanto maior for a necessidade por especialização. Análises detalhadas podem ser feitas para os fatores de maior impacto (DELAI, 2006).

Embora os indicadores devam ser representados individualmente, também pode ser útil representá-los de forma integrada, i.e., índices. Ao integrar indicadores o número de medidas diferentes diminui para um número mais fácil de ser gerenciado. Como o desenvolvimento sustentável é um conceito holístico e seus três pilares precisam ser considerados, integrar indicadores torna-se vantajoso (AZAPAGIC, 2003, p.656).

3.6.1. Análise comparativa para a dimensão ambiental

No Quadro 3.13, estão anotados todos os aspectos referentes aos quatorze modelos de medição de desempenho para a dimensão ambiental. Algumas considerações podem ser feitas sobre o resultado da análise comparativa. Primeiramente, a totalidade dos modelos de medição de desempenho avaliados considerou o desempenho ambiental como um item prioritário. Em segundo lugar, existem três tipos de indicadores: (1) aqueles derivados dos aspectos ambientais; (2) os indicadores associados às práticas de gestão ambiental; (3) os indicadores de potencial de impacto ambiental. Esse último é representado por categorias como, biodiversidade, acidificação, entre outros tipos de impactos ambientais.

A grande maioria dos modelos estudados considerou o consumo de materiais, energia e água como itens fundamentais para a medição do desempenho em sustentabilidade das empresas. Outros indicadores também aparecem com destaque, sendo eles: emissões, resíduos e efluentes. Alguns indicadores de potencial de impacto ambiental, também conhecidos como *mid-point indicators*, foram mencionados pelos modelos de medição de desempenho, p.ex., contribuição para o efeito estufa. Essa medida é importante para visualizar a condição atual do ambiente e o possível impacto futuro das atividades da empresa. Tais informações podem ajudar a empresa a entender melhor o seu impacto ou o potencial de impacto do seu tipo de negócio. Para obtê-las basta utilizar os indicadores de entrada e saída dos processos nos cálculos de impacto.

A visão de sustentabilidade na cadeia de suprimentos e na fase de uso e descarte do produto é considerada por alguns aspectos de desempenho, como os impactos das atividades de Transporte, de Fornecedores, ou ainda, da contratação de Terceiros para atividades de produção e suporte. A contabilização dos impactos do produto durante seu ciclo de vida seria contemplada diretamente dentro do aspecto Produtos e Serviços.

Quadro 3.13 – Quadro comparativo dos diferentes modelos para a dimensão ambiental.

		GRI	ISO 14031	Labuschagne, Brent e Erck	IChemE	VDI	Fiksel, McDaniel e Mendenhall	Thoresen	Olsthoorn et al.	Schwarz, Beloff e Beaver	EPA	Hay e Noonan	WBCSD	Veleva e Ellenbecker	Azapagic
Aspectos ambientais	Materiais	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	Energia	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Água	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	Emissões	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x
	Efluentes	x	x	x	x	x		x	x		x		x	x	x
	Resíduos	x	x	x	x	x		x	x		x		x	x	x
	Fornecedores	x	x					x							
	Produtos e serviços	x	x		x		x	x					x	x	x
	Embalagens		x		x	x	x						x	x	
	Transporte	x	x			x		x							
	Materiais tóxicos	x	x		x	x	x			x	x	x	x	x	
	Ruídos e radiação		x								x				x
	Terra	x		x								x			x
	Impactos de terceiros		x												
Aspectos de gestão ambiental	Sistemas de gestão ambiental	x	x			x		x	x						
	Obediência a leis e regulações	x	x			x		x	x						
	Infra-estrutura para melhor eficiência ambiental	x	x			x		x					x		
Medidas de potencial de impacto ambiental	Impacto local	x		x			x		x			x			x
	Biodiversidade	x		x			x		x			x			x
	Acidificação			x			x		x					x	x
	Destruição da camada de ozônio	x	x	x			x		x			x			x
	Efeito estufa	x	x	x					x			x		x	x
	Fomação fotoquímica de Ozônio			x					x						x
	Recursos energéticos e minerais			x	x		x	x	x						x

3.6.2. Análise comparativa para a dimensão econômica

A análise das variáveis econômicas pelos diferentes modelos também é importante, uma vez que está relacionada com a própria sobrevivência da organização e ao bem estar dos seus funcionários. Sua função é mensurar a geração de valor no curto e longo prazo e abordar o tipo de relacionamento com seus *stakeholders*. Como pode ser visto no Quadro 3.14, os indicadores econômicos foram separados em duas categorias: indicadores de desempenho financeiro e econômico. Os modelos contemplaram os indicadores financeiros com maior freqüência, porém também levaram em conta outras medidas mais amplas, como contribuição para o PIB ou participação de mercado.

A maior parte dos aspectos de desempenho ficou restrita ao nível operacional. Medidas tradicionais, como custo de produção ou resultado operacional, foram mescladas com novas medidas de desempenho, que tratam de contabilizar o real impacto econômico das atividades da empresa frente aos *stakeholders* e sociedade. Um exemplo de indicador desse tipo seria o custo do tratamento de emissões, efluentes e resíduos, ou ainda, os ganhos de receita de boas práticas ambientais, como a entrada de recurso advinda de práticas de reciclagem de descartes ou subprodutos.

Esse tipo de medida é capaz de orientar o planejamento estratégico da empresa de forma mais efetiva, pois sinaliza a quantidade de recursos usados que não se desdobram em produtos ou serviços, ou ainda, permite mostrar o custo real dos impactos gerados pela empresa em decorrência dos seus processos. Uma vantagem ao se usar indicadores financeiros para calcular a sustentabilidade de processos ou produtos, está na facilidade de compreensão e de engajamento dos gerentes e diretores na melhoria da sustentabilidade da empresa. É mais fácil mostrar ganhos de receita de boas práticas do que somente custos de tratamento ou de mitigação de impactos.

Quadro 3.14 – Quadro comparativo dos diferentes modelos para a dimensão econômica.

		GRI	ISO 14031	Labuschagne, Brent e Erck	IChemE	VDI	Fiksel, McDaniel e Mendenhall	Thoresen	Olsthoorn et al.	Schwarz, Beloff e Beaver	EPA	Hay e Noonan	WBCSD	Veleva e Ellenbecker	Azapagic
Desempenho Financeiro	Custos de produção	x				x		x	x			x		x	
	Custos de capital	x				x								x	
	Custos de fim de vida (p.ex. descarte)					x							x		
	Custos da ausência de funcionários					x							x		
	Custos associados a garantias e obrigações				x	x		x				x	x		
	Custo do tratamento de emissões, efluentes e resíduos							x					x		
	Custos equivalentes dos impactos ambientais							x					x		
	Custos para mitigar impactos ambientais							x					x		
	Ganhos de receita de boas práticas (p.ex. reciclagem)					x		x							
	Intervenção dos *stakeholders* (p.ex. perda de negócios)					x									
	Valor adicionado ao produto				x	x		x	x			x		x	
	Resultado operacional (p.ex. vendas, *turnover*)	x		x	x	x		x	x			x		x	
	Resultado líquido			x					x			x		x	
	Retorno sobre o capital social	x			x	x								x	
	Retorno sobre capital de terceiros	x			x	x								x	
	Investimentos (p.ex. ambientais)				x			x				x		x	
	Retorno sobre investimentos				x	x								x	
	Despesas administrativas e de venda							x							
	Despesas com treinamento				x										
	Liquidez e solvência			x											
	Benefícios em potencial de boas praticas, p.ex. subsídios	x		x											
	Capital social				x										
	Utilização da capacidade				x										
	Taxa de falhas e defeitos				x								x		
	Despesas com pesquisa e desenvolvimento				x	x									
	Desenvolvimento do capital corrente				x	x									
	Desenvolvimento do capital fixo				x	x									
Desempenho Econômico	Visão perante as partes externas (p.ex. *shareholders*)			x		x						x		x	
	Participação de Mercado	x		x								x			
	Contribuição ao GDP	x		x										x	
	Total de taxas pagas por região e país	x		x	x										
	Doações a comunuidade	x			x										

3.6.3. Análise comparativa para a dimensão social

A dimensão social dos modelos de medição de desempenho estudados é composta por uma grande diversidade de categorias de medidas. A divisão adotada para a elaboração do Quadro 3.15 busca traduzir para o âmbito empresarial, o impacto das operações sobre os sistemas sociais (*stakeholders*), contemplando os seguintes critérios: recursos humanos internos, direitos humanos, sociedade, responsabilidade de produto, e participação dos *stakeholders*. O tratamento social de uma empresa reflete a sua atitude para com os seus funcionários, fornecedores, terceirizados, consumidores e sociedade. Em resumo, é importante ter um bom desempenho social para que a empresa seja aceita e tenha uma boa reputação, necessários para um futuro de sucesso.

De acordo com o Quadro 3.15, a categoria recursos humanos internos constituí uma área de amplo interesse por parte dos diferentes modelos de medição de desempenho em sustentabilidade. O motivo principal da grande quantidade de modelos a mensurar essa categoria de desempenho social é a boa divulgação e obediência as leis internacionais do trabalho entre as empresas. Como a categoria recursos humanos internos envolve entre outras medidas, a saúde, a segurança e o treinamento dos funcionários, as empresas tradicionalmente já vêm investindo esforços em mensurar e melhorar tais indicadores. Essas medidas podem ser encontradas mais facilmente na forma de regulações e determinações obrigatórias para as empresas.

Em contra partida, outras categorias, como impactos na Sociedade, ainda não são abordados com grande intensidade pelos modelos de medição de desempenho. As empresas mais avançadas em sustentabilidade podem tentar controlar e melhorar os seus desdobramentos perante a sociedade, porém não seriam forçadas para tal. Seria uma prática "voluntária", resultado de metas mais ambiciosas e voltadas para a minimização de riscos de mercado e para a melhoria da imagem da empresa.

Quadro 3.15 – Quadro comparativo dos diferentes modelos para a dimensão social.

		GRI	ISO 14031	Labuschagne, Brent e Erck	IChemE	VDI	Fiksel, McDaniel e Mendenhall	Thoresen	Olsthoorn et al.	Schwarz, Beloff e Beaver	EPA	Hay e Noonan	WBCSD	Veleva e Ellenbecker	Azapagic
Recursos Humanos Internos	Relações trabalhistas, p.ex. satisfação do funcionário	x		x	x	x	x						x	x	
	Saúde e segurança (p.ex. acidentes, doenças)	x		x	x	x	x						x	x	
	Treinamento e educação	x		x	x	x	x						x	x	
	Igualdade de oportunidades (p.ex. deficientes)	x		x	x	x								x	
	Práticas justas de trabalho e obediência a leis	x		x		x								x	
	Liberdade de associação e barganha coletiva	x													
	Número de empregados, trainnes e *turnover*	x			x	x							x		
Direitos Humanos	Respeito a criança	x		x											
	Respeito aos direitos indígenas	x													
	Meios para lidar com direitos humanos no trabalho	x												x	
Sociedade	Cultura, saúde e educação oferecidos	x		x									x		
	Serviços oferecidos (p.ex. melhor infra-estrutura)			x									x		
	Respeito as leis e regulações			x											
	Competição (p.ex. produtos a preços aceitáveis)	x					x								
	Estímulos sensoriais (p.ex. odor, barulho)			x											
	Segurança (impacto nos crimes)			x											
	Prosperiadade econômica a comunidade			x									x	x	
	Contribuição a coesão social (p.ex. equiquidade)			x											
	Desenvolvimento de políticas para impactos gerados	x													
	Meios para combater suborno e corrupção	x												x	
Respons. Produto	Ações de P&D para produtos sustentáveis			x											
	Produtos e serviços (p.ex. reclamações, multas)	x					x								
	Saúde e segurança do consumidor	x					x								
	Certificados de adequação obtidos, ou *labels*	x													
	Atendimento de padrões de propaganda	x													
	Ações voltadas a privacidade do consumidor	x													
Participação dos *Stakeholders*	Potencial de influência na decisão			x									x	x	
	Fonte de informações (p.ex. audiências abertas)	x		x	x										
	Stakeholder enpowerment	x		x	x										

4. Características dos processos de retificação e torneamento

Os processos de usinagem são de grande relevância para o setor metal-mecânico. De acordo com Groover (2007, p.505), "os processos de usinagem são os mais versáteis e acurados processos de manufatura, capazes de cumprir a tarefa de produzir peças geométricas e superfícies variadas".

> Usinagem é um processo que é particularmente útil devido a sua acuracidade dimensional elevada, flexibilidade, e efetividade de custo para produção de pequenos lotes. Entre os processos de manufatura, usinagem é única por permitir tanto a criação quanto o acabamento de produtos (DAHMUS; GUTOWSKI, 2004, p.1).

O objetivo dessa seção é fornecer subsídios teóricos sobre os processos de torneamento e retificação para serem aplicados durante a condução da análise experimental, bem como durante a análise dos dados coletados. As informações apresentadas serão úteis durante a análise comparativa da sustentabilidade dos dois processos.

4.1. Retificação

Dentre os processos de usinagem, característicos da indústria metal-mecânica, o processo de retificação vem a ser um dos mais comuns (SOARES, 2002). A remoção de material é feita por meio da interação de grãos abrasivos presentes em uma ferramenta que avança sobre uma peça em condições de elevada velocidade. Muitas das peças usinadas têm a retificação como à última operação de uma ou várias de suas superfícies, por isso sendo um processo de acabamento final.

Oliveira (1998) explica que apesar de sua grande utilização, o processo de retificação é relativamente recente. A primeira máquina para retificação de superfícies externas com velocidades de 5 a 10 m/s foi montada em 1872. O grau de desenvolvimento de rebolos feitos com materiais abrasivos artificiais no início do século XX possibilitou o aumento significativo nas velocidades de corte. Neste processo, os grãos abrasivos são fixados junto à ferramenta através de um ligante ou liga, seguindo um tipo particular de arranjo espacial.

O processo de retificação tem como características, a possibilidade de obtenção de tolerâncias apertadas e de baixas rugosidades. Outra característica importante é a baixa capacidade de remoção de cavaco, sendo por isso, considerado um processo de acabamento. Como é explicado por Diniz, Marcondes e Coppini (1999, p.223), "o processo de retificação requer bastante atenção, pois se a peça for danificada nesta operação, todo o custo acumulado

nas operações anteriores não poderá ser recuperado". Nas próximas seções são detalhadas características e parâmetros importantes para o entendimento do processo de retificação.

4.1.1. Tipos de processo de retificação

Os processos de retificação podem ser classificados de acordo com a operação do rebolo e forma das superfícies geométricas produzidas. Uma classificação amplamente adotada em pesquisas sobre o processo de retificação baseia-se da norma DIN 8589 (OLIVEIRA, 1988). Na Figura 4.1 abaixo estão ilustrados os diferentes tipos de processos de retificação.

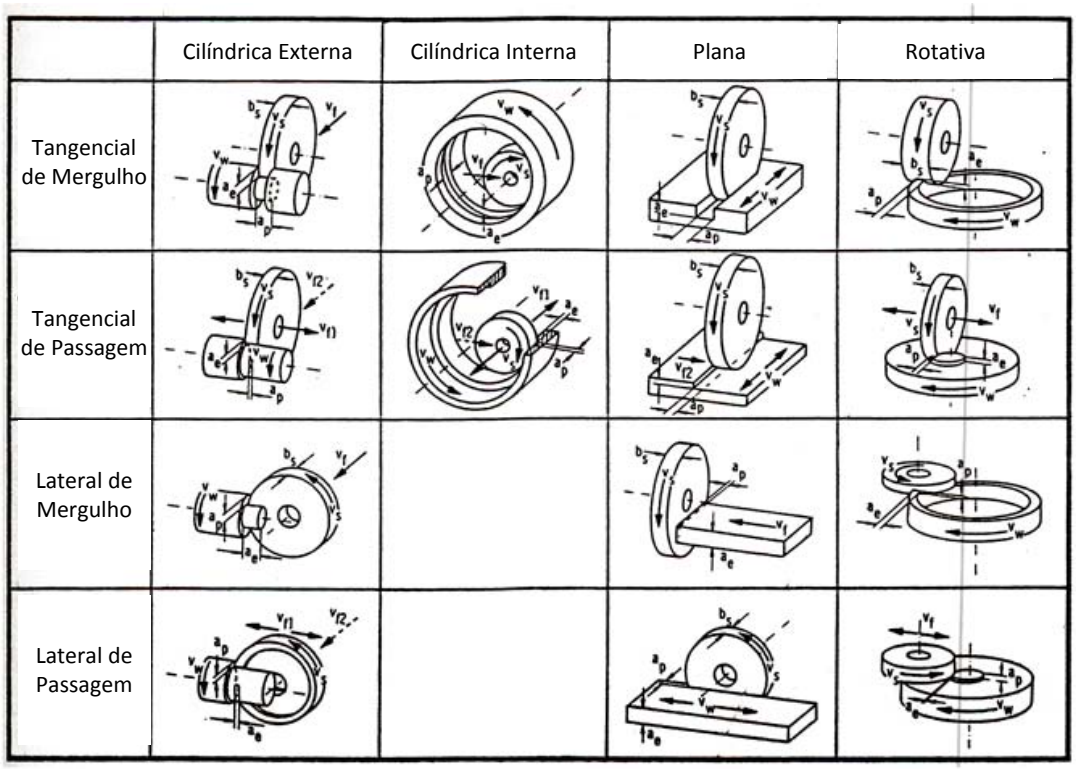


Figura 4.1 – Operações de retificação segundo norma DIN 8589.
Fonte – OLIVEIRA, 1988.

Novos desenvolvimentos tecnológicos beneficiaram os processos de retificação, como o uso de novos materiais para ferramentas, ou ainda, o projeto mecânico mais moderno de máquinas retificadoras. Melhores máquinas retificadoras foram obtidas, por exemplo, com o uso de mancais e guias hidrostáticos, ou com sistemas de compensação para a deformação térmica. Novos materiais para ferramentas foram criados, como o CBN[22], ou o grão abrasivo de diamante.

[22] O nitreto cúbico de boro (CBN) é um material de usinagem de alto rendimento.

4.1.2. Rebolo

Rebolo é a ferramenta abrasiva utilizada na retificação. Trata-se de um corpo geralmente cilíndrico. Nele, uma liga reúne inúmeros grãos abrasivos, que em contato com a peça realizam a usinagem. Cada grão abrasivo retira uma quantidade minúscula de material da peça. A classificação do rebolo é dada pelo conjunto de suas características, ou seja: tipo de grãos abrasivos, tamanho de grão, tipo de ligante, estrutura, dureza e densidade do rebolo (MALKIN, 1989).

Um fator especialmente importante para a seleção de um rebolo é o material da liga aglomerante, visto que determina a resistência, bem como a máxima velocidade de operação da ferramenta. Oliveira (1998) observa que cada tipo de abrasivo apresenta vantagens e desvantagens, citando o caso do óxido de alumínio, que apresenta grande estabilidade química e resiste a altas temperaturas, mas, no entanto, é o abrasivo menos duro (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 – Tipos de abrasivos e aplicações.

Abrasivo	Estabilidade térmica até (°C)	Adequado para
Óxido de alumínio	2000	Aços de todas as qualidades
Nitreto de boro cúbico (CBN)	1370	
Carboneto de silício	1300	Aços com carbono saturado, ferro fundido, óxidos, (vidros, cerâmicas, etc.)
Diamante sintético	900	

Fonte – OLIVEIRA, 1998.

Outro aspecto relevante para o desempenho de um rebolo é o seu desgaste. Desgaste é a quantidade de rebolo consumida durante um determinado ciclo ou operação. O desgaste sofrido pela ferramenta abrasiva é um fator muito importante para a eficiência do processo e qualidade superficial das peças retificadas. De acordo com Malkin (1989), estudar as causas e efeitos do desgaste do rebolo é essencial para reduzir gastos de ferramental desnecessários e controlar as características especificadas no projeto do componente.

4.1.3. Dressagem

Também conhecida como dressamento, diamantação ou retificação do rebolo, é o processo em que o rebolo tem sua face de trabalho usinada com o uso de uma ferramenta, chamada de dressador. A dressagem de um rebolo tem três finalidades principais: a obtenção de concentricidade da superfície de trabalho com o eixo de rotação, o perfilamento da

superfície de trabalho para uma operação de forma e o arrancamento dos grãos abrasivos gastos para melhorar a agressividade da face de trabalho (OLIVEIRA, 1998).

A operação de dressagem divide-se em dois grupos principais: dressadores estáticos e rotativos. Os dressadores estáticos não se movimentam na direção da velocidade tangencial do rebolo durante a afiação, enquanto que os rotativos, além do movimento de translação, também rodam quando em contato com o rebolo.

As condições de dressagem têm grande influência no desempenho do processo de retificação. De acordo com Dahmus e Gutowski (2004), a seleção de ferramentas apropriadas não pode ser negligenciada, pois interfere na condição de operação da máquina, e.g. taxa de remoção do material.

4.1.4. Ciclo de retificação

Denomina-se ciclo de retificação o conjunto de tarefas cumpridas desde a colocação da peça na máquina até a saída desta dentro de especificações predeterminadas (Figura 4.2). A soma de todos os tempos das diferentes fases resulta no tempo de ciclo, parâmetro importante na produção de grandes e médios lotes.

Um diagrama de ciclo pode representar qualquer tipo de operação de retificação. Tal diagrama possui no eixo das abscissas o tempo e nas ordenadas à posição Z em que estaria o rebolo, senão houvesse deformação da peça, além da posição real da superfície de contato peça/rebolo.

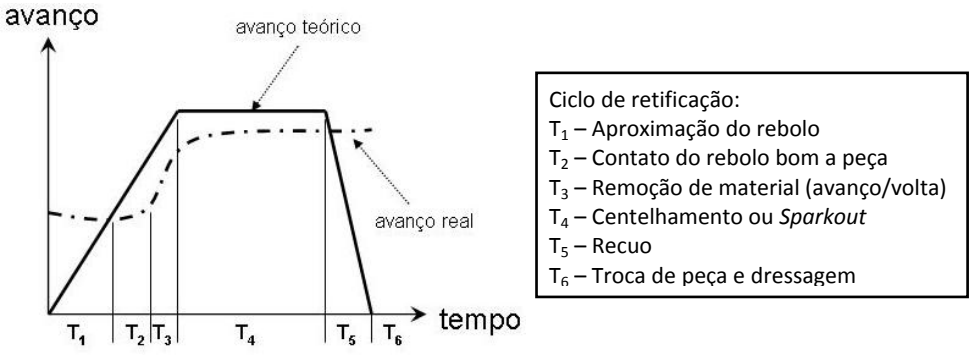


Figura 4.2 – Ciclo de retificação cilíndrica de mergulho.
Fonte – OLIVEIRA, 1998.

Conforme ilustrado na Figura 4.2, durante a primeira etapa ocorre à aproximação do rebolo na peça, sem existir ainda a operação de corte. Na fase dois, passa a existir o contato do rebolo com a peça, com o conseqüente aumento da força de contato. Durante a etapa 2

ocorrem deformações elásticas da peça, rebolo e máquina. Na etapa seguinte, acontece uma elevação da profundidade de corte ajustado ao avanço da ferramenta, acompanhada de remoção de material da peça. Depois de cumprida a fase três, vem à fase de centelhamento ou *spark-out*, onde a peça e alcança, finalmente, a sua dimensão final. Nessa etapa, o rebolo e a peça continuam girando sem haver deslocamento radial. A fase do centelhamento é responsável por remover as deformações da operação e promover melhores qualidades dimensionais e superficiais à peça. Por fim, nas etapas cinco e seis ocorre o afastamento do rebolo e em seguida, a troca de peça, sendo possível dressar o rebolo.

4.1.5. Parâmetros de retificação

Durante o ciclo de retificação, é importante monitorar os parâmetros tecnológicos e operacionais de forma precisa, para que as informações coletadas possam ser utilizadas na otimização do rendimento do processo. A seguir serão listados parâmetros para o processo de retificação. Foi usado o processo de retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho[23] como exemplo para ilustrar as grandezas. A seguir, na Figura 4.3, está ilustrado o processo de retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho.

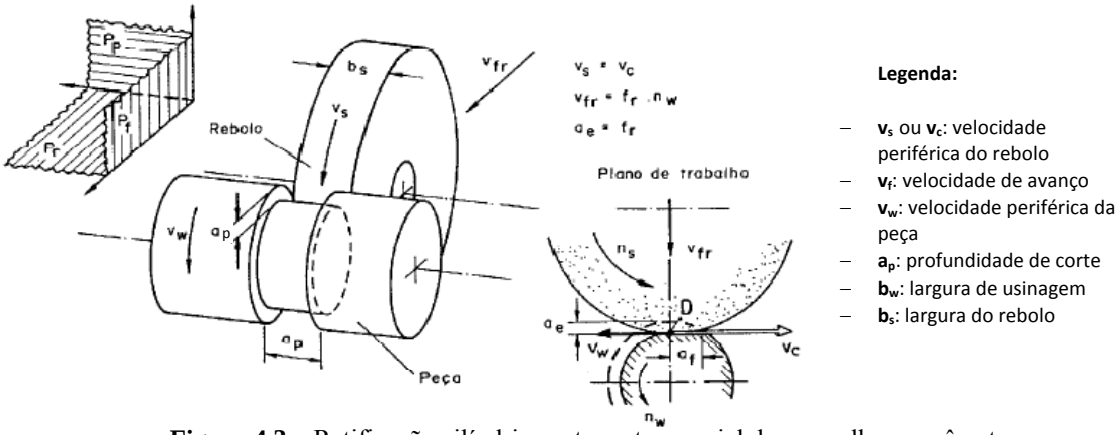


Figura 4.3 – Retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho e parâmetros.

Fonte – ABNT 6162, 1989.

Outros parâmetros de retificação incluem (OLIVEIRA, 1998):

- b_{se} - Largura de corte efetiva do rebolo (mm);
- b_w - Comprimento ou largura de corte da peça (mm).

[23] A retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho consiste em efetuar avanço do rebolo perpendicularmente a superfície da peça sendo que ambas, peça e ferramenta, possuem movimento de rotação. Diferente do processo de retificação tangencial de passagem, não há deslocamento longitudinal entre a peça e a ferramenta abrasiva (MALKIN, 1989).

Para a retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho, o tempo total é calculado pela seguinte adição de tempos de processamento (FERRARESI, 1995):

$$t_{tr} = t_c + t_a + t_s + \frac{t_d}{PPd} + \frac{t_p}{Z} + \frac{n_R \times T_{tR}}{Z} \quad \text{(min)} \qquad (4.1)$$

Sendo:

t_{tr} = tempo total de retificação (min)

t_a = tempo de aproximação e de afastamento (min)

t_c = tempo de corte (min)

t_s = tempo secundário (colocação e retirada da peça) (min)

t_d = tempo de dressagem (min)

PPd = Número de peças por dressagem

t_p = tempo de preparo de máquina (min)

Z = lote de peças fabricadas

n_R = número de trocas de rebolo

T_{tR}= tempo de troca de rebolo (min)

4.2. Torneamento

O torneamento é um processo de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Neste processo a peça gira em torno do eixo principal da máquina e a ferramenta desloca-se numa trajetória no mesmo plano do referido eixo (ABNT 6175, 1971). Na Figura 4.4 abaixo está representado um tipo específico de processo de torneamento, o torneamento retilíneo cilíndrico externo.

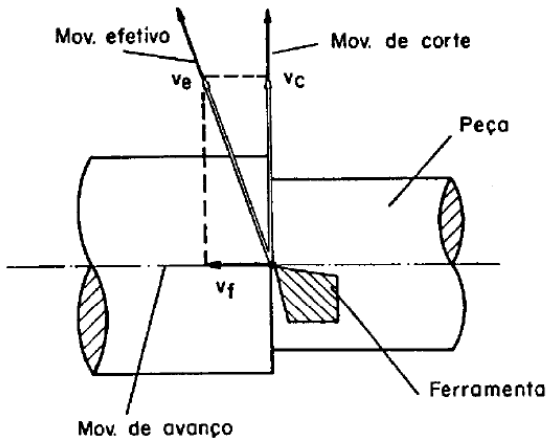


Figura 4.4 – Exemplo de processo de torneamento retilíneo cilíndrico externo e suas forças.

Fonte – ABNT 6162, 1989.

4.2.1. Tipos de processo de torneamento

É possível classificar os processos de torneamento de acordo com a sua finalidade: torneamento de acabamento ou torneamento de desbaste. O primeiro tipo é destinado a obter peça próxima as dimensões finais, ou um acabamento superficial especificado, ou ambos. As condições de acabamento são leves, com profundidade de usinagem bastante reduzidas e avanços tão pequenos quanto os necessários para a obtenção da especificação. O segundo caso, torneamento de desbaste, corresponde à operação de usinagem a ser executada antes do torneamento de acabamento, visando obter na peça a forma e dimensões próximas das finais. A condição de desbaste deve ser tão severa quanto permitem a espessura do cavaco, a vida da ferramenta, a potência do motor e a própria peça (FERRARESI, 1995).

O processo de torneamento pode realizar diferentes operações. No Quadro 4.2, estão listados os tipos de processos de torneamento, dependendo da trajetória definida para a ferramenta de corte. O processo de torneamento, dependendo do tipo de fixação da peça na máquina, também pode ser dividido em duas classes. A primeira classe corresponde às peças que permanecem durante a operação entre dois centros. No outro grupo, estão as peças presas ou fixadas em um único ponto (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1997).

Quadro 4.2 – Classificação dos processos de torneamento quanto a trajetória da ferramenta.

Trajetória	Superfície	Tipo
Retilíneo	Cilíndrico	Externo
		Interno
		Sangramento axial
	Cônico	Externo
		Interno
	Radial	Faceamento
		Sangramento radial
Curvilíneo		

Fonte – FERRARESI, 1995.

4.2.2. Parâmetros de torneamento

Um importante parâmetro para o processo de torneamento corresponde ao tempo total de processamento. Seu cálculo é dado da seguinte forma (FERRARESI, 1995):

$$t_{tt} = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \frac{n_t}{Z} \times t_{ft} \quad \text{(min)} \qquad (4.2)$$

Sendo:

t_{tt} = tempo total de torneamento por peça (min)

t_c = tempo de corte (min)

t_s = tempo secundário (colocação e retirada da peça) (min)

t_a = tempo de aproximação e afastamento da ferramenta (min)

t_p = tempo de preparo da máquina (min)

t_{ft} = tempo de troca da ferramenta (min)

n_t = número de trocas da ferramenta para um lote Z

Z = lote de peças produzidas

O valor do tempo de corte pode ser obtido da seguinte fórmula (FERRARESI, 1995):

$$t_c = \frac{bw * \pi * d}{1000 * f * v} \qquad (4.3)$$

Sendo:

b_w = largura ou comprimento da peça (mm)

f = velocidade de avanço (mm/volta)

v = velocidade de corte (mm/min)

4.3. Custos de produção

Nessa seção, serão apresentadas fórmulas simples para o cálculo do custo de produção de peças produzidas por ambos os processos. Os custos envolvidos na produção de uma peça dividem-se em dois grupos: o primeiro associado ao processo e o segundo, as atividades de suporte, p.ex., controle de qualidade. Para efeito do objetivo do estudo, a mensuração do primeiro grupo somente será suficiente. Assim, os custos diretamente envolvidos com a produção de uma peça por usinagem são (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 1999, p.136):

$$K_p = K_{us} + K_{um} + K_{uf} \qquad (4.4)$$

Sendo:

K_p: Custo de produção por peça

K_{us}: Custo da mão-de-obra da usinagem ((R$/tempo total de confecção por peça)

K_{uf}: Custo das ferramentas (troca, afiação, etc.) (R$/peça)

K_{um}: Custo da máquina (manutenção, depreciação, energia consumida, etc.) (R$/tempo total de confecção por peça)

Cada um destes elementos pode ser desdobrado em outras fórmulas de cálculo:

$$K_{us} = t_t \times \frac{S_h}{60} \qquad (4.5)$$

Sendo:

t_t: Tempo total de confecção por peça (min)

S_h: Salário e encargos do operador (R$/hora)

$$K_{um} = \frac{t_t}{H \times 60}\left[\left(V_{mi} \times \frac{1}{10}\right) \times (1+i) + \frac{V_{mi}}{m} + K_{mc}\right] \qquad (4.6)$$

Sendo:

V_{mi}: Valor inicial de aquisição da máquina

m: Vida prevista para a máquina em anos

i: Taxa de juros por ano

K_{mc}: Custo anual de manutenção da máquina.

H: Número de horas trabalhadas por ano

O custo da ferramenta por peça pode ser calculado da seguinte forma:

$$K_{uf} = \frac{K_{ft}}{Z_t} \qquad (4.7)$$

Sendo:

K_{ft}: Custo da ferramenta (R$)

Z_t: Número de peças usinadas por vida T da ferramenta

4.4. Comparação dos processos de retificação e de *hard turning*

Inovações nos processos levaram a uma sobreposição nas áreas de aplicação das operações de retificação e de torneamento de metais endurecidos, também conhecido como *hard turning*. Hoje em dia, operações de *hard turning* podem proporcionar a peça uma qualidade comparável a aquelas obtidas no processo de retificação. Tradicionalmente, as operações de acabamento eram feitas por processos de retificação, mas as operações de *hard turning* têm se tornado mais e mais capazes frente aos padrões de rugosidade e de tecnologia. Adicionalmente, esses processos ofereceram maior flexibilidade, maiores taxas de remoção de material e até a possibilidade de usinagem a seco (Klocke *et al.*, 2005).

Uma avaliação comparativa dos atributos de ambos os processos elaborada por Klocke *et al.* (2005) está ilustrada na Figura 4.5. Esse tipo de avaliação não é simples, devendo ser realizada considerando as diferentes condições de processo e também de uso da peça. Por esse motivo, os autores optaram por realizar uma avaliação qualitativa dos atributos de ambos os processos, mostrando quais vantagens e desvantagens existem.

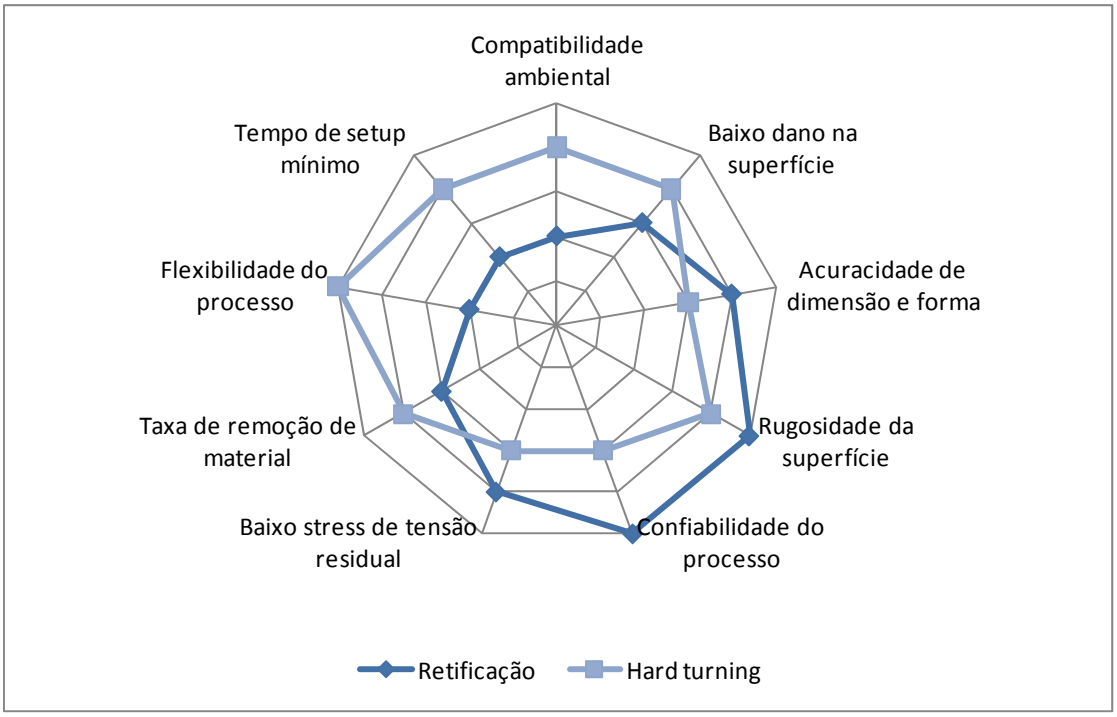


Figura 4.5 – Avaliação qualitativa do potencial dos processos de retificação e *hard turning.*

Fonte – KLOCKE, BRINKSMEIER e WEINERT, 2005, p.21.

Como está ilustrado na Figura 4.5, o processo de *hard turning* é melhor em atributos como taxa de remoção de material ou flexibilidade de operação. No entanto, a menor confiabilidade dos processos de *hard turning* é ainda um assunto importante.

Os atributos de qualidade da peça são muito próximos para os processos de retificação e de *hard turning*. A rugosidade da peça é um exemplo de atributo com desempenho muito próximo. Logo, o desempenho em qualidade dos dois processos são compatíveis e não representam uma grande diferencial competitivo.

O processo de *hard turning* apresenta a vantagem de não utilizar fluido de corte em suas operações. Um dos grandes problemas do processo de retificação é a geração de resíduos. Devido à necessidade de utilizar emulsões ou óleos no processo, há a ocorrência de uma névoa em suspensão no ambiente de fabricação, que é altamente prejudicial à saúde, além de produzir um cavaco difícil de separar, conhecido como lodo, o que cria dificuldades a empresa para se desfazer destes resíduos.

Em complemento a análise qualitativa apresentada acima, deverá ser realizada na seção 7.6 uma avaliação quantitativa dos dois processos considerando diferentes atributos relacionados manufatura sustentável, cumprindo assim um escopo mais amplo que o definido por Klocke *et al.* (2005).

5. Metodologia de Pesquisa

Ao longo do capítulo é apresentada a metodologia de pesquisa referente ao trabalho científico. Para tanto, é abordado inicialmente o método de pesquisa que mais se ajusta a proposta do estudo e depois, os procedimentos metodológicos que foram selecionados para proceder com a coleta e tratamento dos dados. Finalmente, são apresentadas as etapas que compõem o desenvolvimento da pesquisa.

5.1. Método de pesquisa

Antes de abordar o método de pesquisa, é adequado apresentar a definição do que seria conhecimento científico: "Conhecimento científico corresponde à observação minuciosa e objetiva dos fatos, de modo a permitir uma compreensão de sua natureza e de suas causas, sem que as interpretações do observado sejam influenciadas pelos desejos ou preconceitos do observador" (REY, 1993, p. 23). Portanto, para se criar conhecimento científico é preciso dispensar grande atenção ao método para o desenvolvimento das atividades de pesquisa.

O método[24] de pesquisa pode ser encarado como uma explicação minuciosa, detalhada, rigorosa e exata de toda ação desenvolvida ao longo do trabalho de pesquisa. Gil (1999) acrescenta que o método de pesquisa pode ser entendido como o conjunto de procedimentos intelectuais e técnicos adotados para se atingir o conhecimento. Assim, é a explicação do tipo de pesquisa, do instrumental utilizado (p.ex., questionário e entrevista), do tempo previsto, da equipe de pesquisadores e da divisão do trabalho, das formas de tabulação e tratamento dos dados, enfim, de tudo aquilo que se utilizou no trabalho de pesquisa.

Já a atividade de pesquisa, pode ser considerada como o meio de se encontrar respostas para questões propostas, utilizando métodos científicos. Lakos e Marconi (1992, p.43) definem pesquisa como "um procedimento formal, com um método de pensamento reflexivo que requer um tratamento científico e se constitui no caminho para se conhecer a realidade ou para descobrir verdades parciais".

De acordo com Pádua (2004, p.31), pesquisa pode ser definida da seguinte forma:

> Tomada num sentido amplo, pesquisa é toda atividade voltada para a solução de problemas; como atividade de busca, indagação, investigação, inquirição da realidade, é a atividade que vai nos permitir, no âmbito da ciência, elaborar um conhecimento, ou um conjunto de conhecimentos, que nos auxilie na compreensão desta realidade e nos oriente em nossas ações.

[24] A palavra método deriva do grego *methods* que significa o caminho ou a maneira de se chegar a determinado fim ou objetivo (DELAI, 2006).

Assim, o método científico deve ter por base a observação rigorosa e imparcial dos fatos. Essa observação deve ser capaz de distinguir, dentre os muitos fenômenos que possam ocorrer em determinadas circunstâncias, aqueles que são relevantes para o estudo do problema em causa (REY, 1993). Ainda de acordo com o autor, pode ser necessário usar diversos métodos em conjunto: "Os métodos a empregar variam com o campo da investigação, a natureza dos fatos ou fenômenos estudados e as circunstâncias em que se vai trabalhar. Uma conjugação de diversos métodos pode ser necessária" (REY, 1993, p.9).

O método de pesquisa pode ser classificado de diferentes maneiras. Inicialmente, a pesquisa pode ser separada em pura ou aplicada. O primeiro tipo objetiva gerar conhecimentos novos e úteis para o avanço da ciência sem aplicação prática prevista. Envolve verdades e interesses universais. Já a pesquisa aplicada, objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos. Envolve verdades e interesses locais (SILVA; MENEZES, 2005). A presente tese de doutorado se caracteriza por ser uma pesquisa **aplicada**, uma vez que visa desenvolver um método para a avaliação da sustentabilidade de processos de produção que apoiará a tomada de decisão em atividades envolvendo o gerenciamento de tecnologias de manufatura. É um objetivo do trabalho de pesquisa aplicar o conhecimento gerado em processos de fabricação de empresas.

Outra classificação do método de pesquisa advém do ponto de vista da abordagem do problema, i.e. considera que tudo pode ser quantificado, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Neste caso, a pesquisa é definida como sendo quantitativa. Em outra hipótese, o método considera que existe uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito, isto é, um vínculo indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito que não pode ser traduzido em números. Esta pesquisa é definida como sendo qualitativa. O trabalho de doutorado possui uma abordagem **quantitativa**, representada por dados quantitativos, i.e. indicadores numéricos de desempenho em sustentabilidade.

Outra classificação do método surge da natureza do objetivo da pesquisa. Nesse sentido, Gil (1999) classifica as pesquisas em três tipos diferentes: exploratórias, descritivas e explicativas. As pesquisas exploratórias têm como objetivo "proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses" (p.41). O aprimoramento de idéias ou a descoberta de intuições são os objetivos principais desse tipo de pesquisa. Na maioria dos casos, essas pesquisas envolvem: (a) levantamento bibliográfico; (b) entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado; e (c) análise de exemplos que estimulem a compreensão.

No caso das pesquisas descritivas, o objetivo principal é a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis. Gil (1999, p.42) faz uma importante observação sobre esse tipo de pesquisa:

> Algumas pesquisas descritivas vão além da simples identificação da existência de relações entre variáveis, e pretendem determinar a natureza dessa relação. Nesse caso, tem-se uma pesquisa descritiva que se aproxima da explicativa. Há, porém, pesquisas que, embora definidas como descritivas com base em seus objetivos, acabam servindo mais para proporcionar uma nova visão do problema, o que se aproxima das pesquisas exploratórias.

Em último lugar temos as pesquisas explicativas, que têm como preocupação central identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos. "Esse é o tipo de pesquisa que mais aprofunda o conhecimento da realidade, porque explica a razão, o porquê das coisas" (GIL, 1999, p.42). Uma pesquisa explicativa pode ser a continuação de outra descritiva, posto que a identificação dos fatores que determinam um fenômeno exige que este esteja suficientemente descrito e detalhado. As pesquisas explicativas valem-se quase exclusivamente do método experimental.

A presente pesquisa de doutorado pode ser classificada ao mesmo tempo como sendo uma **pesquisa descritiva** e também **explicativa**. Em um primeiro estágio do trabalho foi obtida uma quantidade suficiente de informações sobre medição de desempenho em sustentabilidade, acompanhado da análise dos requisitos para a avaliação de sistemas de produção. Após essa fase, o conhecimento adquirido sobre o assunto foi aplicado em uma análise experimental. Foram avaliados dois processos de usinagem, que dividem uma mesma faixa de mercado produzindo produtos com especificações próximas.

5.2. Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos correspondem ao planejamento da pesquisa em sua dimensão mais ampla, que envolve tanto a coleta quanto a interpretação de dados. Durante a fase de planejamento foi escolhida a pesquisa **bibliográfica** e em seguida, a **experimental,** como método para a coleta de dados.

A escolha da pesquisa **bibliográfica** como técnica para a coleta de dados foi importante para a fase inicial do projeto de pesquisa. Isso porque foi realizada a consulta de uma grande quantidade de fontes de informações sobre os sistemas de medição de desempenho em sustentabilidade para se chegar a um conjunto suficiente de métricas para a avaliação de sistemas de produção.

Conforme Gil (1999) explica, a principal vantagem da pesquisa bibliográfica reside no fato de permitir ao investigador a cobertura de uma gama de fenômenos muito mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente. Essa vantagem torna-se particularmente importante quando o problema de pesquisa requer dados muito dispersos pelo espaço. Pádua (2004), por sua vez, explica que a principal vantagem da pesquisa bibliográfica é colocar o pesquisador em contato com o que já se produziu e registrou a respeito do seu tema de pesquisa.

Com a pesquisa bibliográfica foi cumprido o objetivo de determinar o verdadeiro "estado da arte" nos assuntos investigados ao longo da pesquisa de doutorado. Foi à intenção demonstrar pela literatura já publicada e pesquisada o que já se sabe sobre o tema, quais as lacunas existentes e onde se encontram os principais entraves teóricos ou metodológicos.

Lakos e Marconi (1992, p. 44) realizaram uma interessante descrição sobre a função da pesquisa bibliográfica: "A pesquisa bibliográfica pode ser considerada também como o primeiro passo de toda a pesquisa científica". Por esse motivo, a realização de extensa pesquisa bibliográfica durante o desenvolvimento da tese de doutorado é um passo necessário para a consecução da próxima etapa, que corresponde à pesquisa experimental.

As bases de dados escolhidas para a pesquisa bibliográfica foram:

- Compendex (http://www.engineeringvillage2.org/): base de dados que abrange todas as áreas de engenharia e tecnologia em mais de 2600 revistas, conferências selecionadas, relatórios e livros;
- ISI *Web of Science* (http://scientific.thomson.com/products/wos/): proporciona acesso a informações multidisciplinares de aproximadamente 8700 revistas de maior impacto do mundo;
- Scholar Google (http://scholar.google.com): pesquisa de literatura acadêmica em artigos, teses, livros, organizações profissionais, entre outras fontes;
- *Science Direct* (http://www.sciencedirect.com): proporciona acesso a mais de 2000 revistas conceituadas e a centenas de livros;

Sobre a pesquisa **experimental**, esta consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. Trata-se, portanto, de uma pesquisa em que o "pesquisador é um agente ativo, e não um observador passivo" (GIL, 1999, p.48).

Durante a pesquisa experimental foram manipuladas as variáveis independentes de uma dada tecnologia de fabricação, i.e., condições de produção para os processos de

usinagem, com o objetivo de avaliar o desempenho de outras variáveis (medidas de desempenho em sustentabilidade). Ao final, foram realizadas avaliações comparativas dos dois processos considerando a sustentabilidade de suas operações. Como meio para viabilizar a comparação de dados quantitativos e qualitativos foi aplicada uma ferramenta de **análise multicritério** (Análise Hierárquica de Processos). Essa ferramenta permitiu integrar diferentes medidas de desempenho em índices para as três dimensões da sustentabilidade.

5.2.1. Análise Hierárquica de Processos (AHP)

Os métodos de análise multicritério são indicados para processos de decisão em que muitos fatores intangíveis estão envolvidos. Como é explicado por Gomes *et al.* (2002, p.69), "a análise multicritério pressupõe ser necessário aceitar que a subjetividade esteja sempre presente nos processos de decisão". Nesse sentido, buscam-se construir modelos que legitimem a elaboração de juízos de valor, juízos estes necessariamente subjetivos.

Os julgamentos que antecedem as decisões podem ser inconsistentes. Tornar mínima essas inconsistências e melhorar a lógica das informações é o objetivo do método AHP (KRAJNC; GLAVIC, 2005). O método AHP talvez seja um dos primeiro métodos dedicados ao ambiente decisional multicritério e é hoje, provavelmente, o mais extensivamente usado em todo o mundo (GOMES *et al.*, 2002). Esse método foi criado por Thomas L. Saaty em meados da década de 70. Sua proposta é decompor o problema de decisão em vários níveis hierárquicos, facilitando, assim, sua compreensão e avaliação (Figura 5.1).

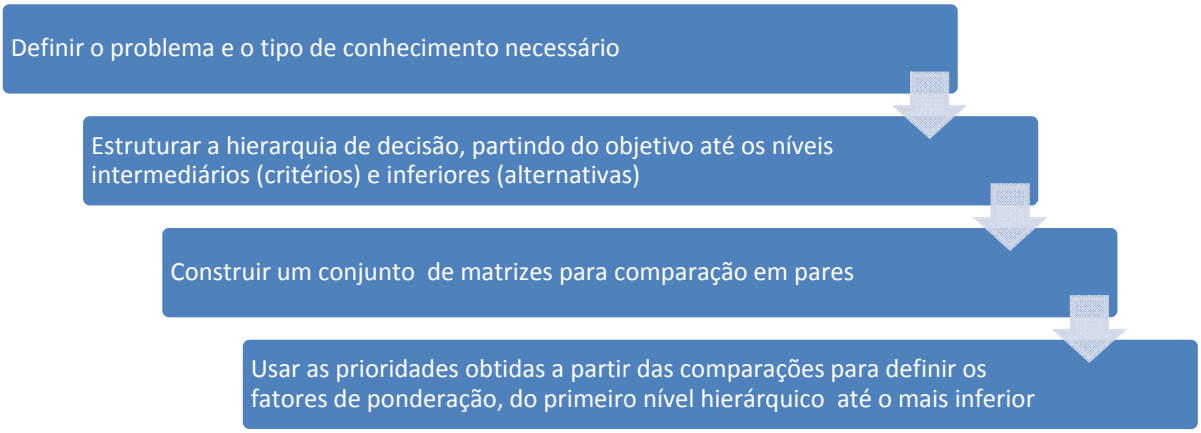


Figura 5.1 – Seqüência de passos para a tomada de decisão de forma organizada.

Fonte: Saaty, 2008, p.85.

O método AHP baseia-se em análises em pares e na visão de especialistas para derivar fatores de prioridade. São essas escalas que medem os fatores intangíveis em termos relativos.

As comparações são realizadas usando uma escala de julgamentos absolutos que representa o quanto um elemento domina outro com respeito a um atributo dado (Quadro 5.1).

A atribuição de pesos aos critérios no método AHP é feita por meio das perguntas: Qual destes critérios é o mais importante? Quanto este critério é mais importante que o outro? (SAATY, 2008). O decisor responderá a essa pergunta com o número que relata a expressão verbal. Nesse método, é utilizada a escala 1 a 9, proposta pelo autor do método. O método AHP tem como origem a escala da razão.

Quadro 5.1 – A escala fundamental de números absolutos.

Importância	Definição	Explicação
1	Importância igual	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
2	Pouca ou fraca	
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem levemente uma atividade sobre a outra
4	Moderada para cima	
5	Importância forte	Experiência e julgamento favorecem grandemente uma atividade sobre a outra
6	Importância forte para cima	
7	Muito importante	Experiência e julgamento favorecem muito grandemente uma atividade sobre a outra
8	Muito importante para cima	
9	Extremamente importante	A evidência de favorecer uma atividade sobre a outra é do mais alto grau de afirmação
Recíproco aos valores acima	A importância da atividade *i* comparada a atividade *j*, também deve ser a mesma quando *j* é comparado com *i*	

Fonte: SAATY, 2008, p.86.

As respostas das perguntas devem ser colocadas em matrizes para cada nível hierárquico. Nessa matriz estão presentes todos os critérios de avaliação das alternativas. Para calcular o peso de cada critério, é necessário fazer a divisão entre o resultado individual de cada critério e a soma de todos os resultados.

5.3. Etapas do desenvolvimento da pesquisa

As etapas do desenvolvimento da pesquisa foram detalhadas logo adiante na Figura 5.2.

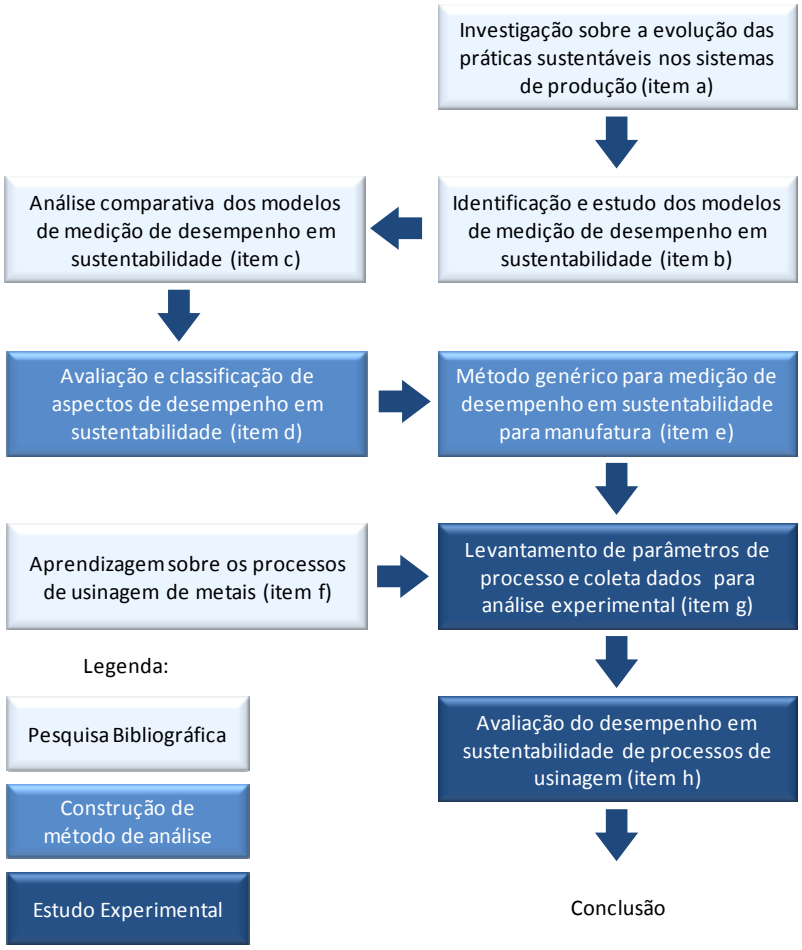


Figura 5.2 – Etapas do desenvolvimento da pesquisa.

a. Investigação sobre a evolução das práticas sustentáveis nos sistemas de produção

Durante essa fase do projeto de pesquisa foram investigadas as diferentes abordagens propagadas nas últimas décadas visando melhorar a sustentabilidade dos sistemas de produção. Realizou-se pesquisa bibliográfica em artigos científicos, livros, teses, dissertações, relatórios de organismos internacionais e sítios da internet. Inicialmente foram estudadas as características dos tipos de controle de *end-of-pipe*. Em seguida, foi abordado o conceito de produção mais limpa. Em terceiro lugar, foi estudada a abordagem de eco-eficiência. Em último lugar, foram analisados os preceitos do desenvolvimento sustentável aplicados a sistemas de produção. A produção sustentável visa impulsionar a criação de valor juntamente com o desenvolvimento social e respeito ao meio-ambiente.

b. Identificação e estudo dos modelos de medição de desempenho em sustentabilidade para sistemas de produção

Inicialmente, foi realizada uma ampla pesquisa bibliográfica em artigos científicos, livros, teses, dissertações, relatórios de organismos internacionais e sítios da internet para se encontrar modelos de medição de desempenho em sustentabilidade. Posteriormente, esses modelos foram estudados para auxiliar na formulação de método para avaliação da sustentabilidade de sistemas de produção.

Os critérios utilizados na seleção dos métodos de medição de desempenho em sustentabilidade foram:

- Abordagem de pelo menos uma das três dimensões do desenvolvimento sustentável, econômica, social ou ambiental;
- Foco empresarial, com forte ênfase na avaliação de sistemas de produção;
- Serem amplamente citados na literatura;
- Terem sido usados em alguma avaliação prática de desempenho em sustentabilidade.

Ao todo, foram selecionados quatorze modelos de medição de desempenho em sustentabilidade. Os termos principais, ou palavras-chaves, que formaram a pesquisa bibliográfica foram: sustentabilidade, avaliação de desempenho, medição de desempenho, métodos, metodologia, sistemas de produção e manufatura.

c. Análise comparativa dos principais modelos de medição de desempenho em sustentabilidade para empresas

Foram elaborados quadros comparativos para cada uma das dimensões da sustentabilidade. Os aspectos em sustentabilidade dos diferentes modelos de medição de desempenho foram comparados com o objetivo de assinalar as diferenças de cada abordagem. A análise comparativa dos principais modelos é valiosa para a identificação dos principais aspectos em sustentabilidade.

d. Avaliação e classificação de aspectos de desempenho em sustentabilidade

Em qualquer modelo de medição de desempenho em sustentabilidade, uma fase importante reside na investigação dos principais aspectos de avaliação. Somente depois de conhecidos os aspectos “mais relevantes”, é possível identificar e selecionar os indicadores principais, ou *core indicators*.

Durante o trabalho foi escolhido o Diagrama de Pareto[25] como ferramenta para auxiliar na avaliação e classificação dos aspectos em sustentabilidade. O objetivo é apontar os aspectos em sustentabilidade mais principais que devem compor o *framework* de avaliação da sustentabilidade de processos de manufatura. O uso dessa ferramenta de suporte a decisão deve proporcionar maior consenso e coerência entre os *stakeholders* sobre o conjunto de aspectos de desempenho em sustentabilidade que devem ser avaliados.

e. Método genérico para medição de desempenho em sustentabilidade para manufatura

Na Figura 6.1, é possível visualizar as diferentes etapas do método. O método apresentado foi adaptado de procedimento desenvolvido por Tugnoli *et al.* (2008). Também foi elaborado por eles procedimento para a comparação quantitativa da sustentabilidade de processos alternativos. O cálculo realizado contou com a normalização e agregação dos indicadores de desempenho. Entretanto, o método de Tugnoli *et al.* (2008) apresentava a intenção de avaliar somente processos alternativos de tratamento de resíduos sólido e não podiam ser usados na avaliação de sistemas de produção em geral. Além disso, não contava com um conjunto bem descrito de atividades, não sendo por isso um método estruturado de avaliação.

f. Aprendizagem sobre os processos de usinagem de metais

Durante essa fase do projeto de pesquisa, foi valorizada a aprendizagem sobre os processos de usinagem de metais. Essa fase foi importante para a realização da atividade experimental, fundamental para a validação do método proposto e para comparar a sustentabilidade de dois diferentes processos, torneamento e retificação.

g. Levantamento de parâmetros de processo e coleta dados para análise experimental

Dois processos de usinagem de metais foram avaliados por meio de indicadores de desempenho. Para a tarefa de coleta de dados foi utilizada a infra-estrutura do laboratório de Otimização de Processos de Fabricação (OPF/NUMA/SEP/EESC/USP), além de outras referências, como empresas e manuais de máquinas.

[25] O uso do Gráfico de Pareto permite realizar a priorização de temas, concentrando esforços na melhoria de áreas onde os maiores ganhos podem ser obtidos (Werkema, 1995).

h. Avaliação do desempenho em sustentabilidade dos processos de usinagem

Durante essa fase, foram calculados e refinados os indicadores de sustentabilidade de ambos os processos de usinagem. A avaliação contou com o uso de diferentes tipos de indicadores de sustentabilidade, como por exemplo, os indicadores absolutos ou relativos. Além disso, foi realizada a normalização dos dados para se obter os índices agregados de sustentabilidade.

6. Método proposto para a avaliação de desempenho em sustentabilidade

Como pode ser visto na Figura 6.1, o método proposto para a avaliação de desempenho em sustentabilidade está dividido em diferentes fases. Uma característica dos modelos estudados é a ausência de um método claro e estruturado para identificar e avaliar os principais aspectos de desempenho em sustentabilidade. Outro ponto corresponde ao detalhamento do procedimento para se obter um indicador agregado de sustentabilidade a partir das diferentes medidas de desempenho. Alguns modelos oferecem orientação de como se desenvolver indicadores bidimensionais, porém nenhuma orientação foi obtida para indicadores tridimensionais. O método apresentado na Figura 6.1 visa preencher tais demandas propondo um conjunto estruturado de passos para a medição de desempenho em sustentabilidade.

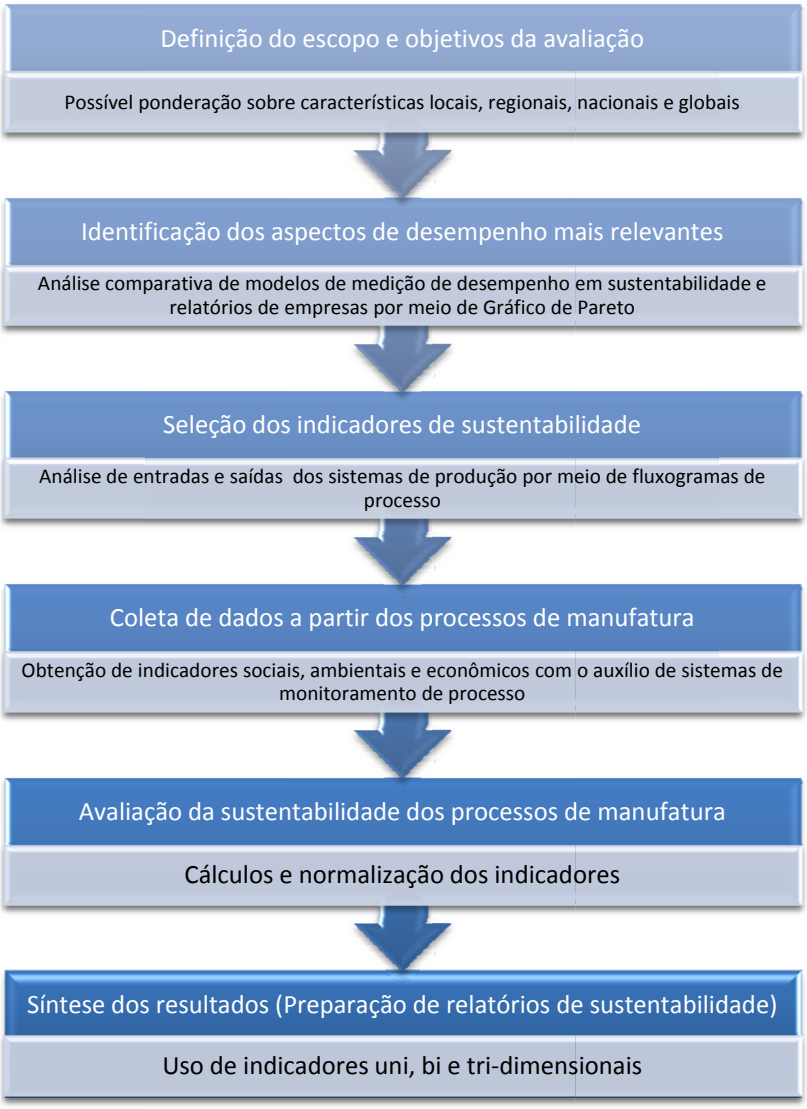


Figura 6.1 – Método proposto para a avaliação de desempenho em sustentabilidade.

Fonte - Autor

Serão detalhadas a seguir as diferentes etapas do procedimento proposto.

6.1. Definição do objetivo e escopo de avaliação

Nesse momento é preciso definir o objetivo e o escopo da avaliação de desempenho em sustentabilidade. Uma base de referência de aspectos em sustentabilidade listada nos Quadros 3.14, 3.15 e 3.16, criada a partir do estudo de diferentes modelos de desempenho em sustentabilidade, serve como ponto de partida para essa fase do modelo.

Como o objetivo do trabalho é avaliar o desempenho em sustentabilidade de processos de manufatura, foi feita uma seleção dos aspectos de sustentabilidade voltados prioritariamente para esse tipo de escopo. A pré-seleção dos aspectos de desempenho em sustentabilidade foi realizada com o auxílio das informações sobre produção sustentável apresentadas na seção 2.4 e resumidas logo a seguir no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Principais aspectos de desempenho para manufatura sustentável.

Aspectos de desempenho	Princípios e boas práticas em produção sustentável
A. Materiais tóxicos B. Resíduos, Emissões e Efluentes C. Saúde e segurança dos funcionários D. Obediência a leis e regulações E. Custos de garantias e obrigações F. Materiais G. Energia H. Perdas e by-products I. Relações trabalhistas J. Treinamento e educação K. *Stakeholder* enpowerment L. Estímulos sensoriais M. Ruídos e radiação N. Custos de produção O. Investimentos ambientais P. Produtos e serviços Q. Embalagens R. Transporte S. Uso da terra T. Fornecedores U. Impactos de terceiros V. Saúde e segurança do consumidor W. Ganhos de receita advindos de boas práticas em sustentabilidade X. Visão perante as partes externas	• Substâncias químicas e agentes físicos que representam ameaças a saúde humana e ao meio-ambiente devem ser controlados • A segurança e bem estar dos funcionários é uma prioridade • Produtos e serviços devem ser produzidos e empacotados com uma quantidade mínima de materiais e energia • Os desperdícios e co-produtos devem ser eliminados, reduzidos ou reciclados. Aumentar a reciclabilidade de materiais • As formas de energia e materiais usadas devem ser mais apropriadas ao objetivo final • As ações dos funcionários devem ser organizadas para conservar e melhorar a sua eficiência e criatividade • Os trabalhadores são encorajados e auxiliados para continuamente desenvolver seus talentos e capacidade • A participação dos funcionários no processo de decisão deve ser incentivada • Produtos e serviços devem ser benignos ao meio-ambiente e seguros durante o seu ciclo de vida • Produtos e serviços devem ser desenhados para serem duráveis, reparáveis, recicláveis, compostáveis e facilmente biodegradáveis • Substâncias químicas e agentes físicos que representam ameaças a saúde humana e ao meio-ambiente devem ser eliminados • Aumentar o uso de recursos materiais renováveis • Novas maneiras de gerar e obter valor, sem os desdobramentos negativos de um sistema de produção ultrapassado

Fonte - Autor

Assim, as informações no Quadro 6.1 servem como guia para a definição do escopo da análise e conseqüentemente, para a escolha dos aspectos em sustentabilidade. Os princípios e práticas em produção sustentável compõem uma etapa chave do procedimento. Com tais conhecimentos é possível selecionar os aspectos de desempenho que se restringem ao escopo de avaliação de processos de manufatura. Sendo assim, os aspectos foram separados em dois grupos distintos, aqueles mais ajustados a processos de manufatura e aqueles voltados a avaliações corporativas, ou multifuncionais. Em outras palavras, foram priorizados os aspectos relacionados diretamente a função produção, sem uma correlação direta com o desempenho de outras áreas da empresa. Avaliações e planejamentos de outras áreas da empresa precisariam ser realizados de acordo com uma nova seqüência lógica de indicadores. Logo a seguir, no Quadro 6.2 estão listados todos os aspectos de desempenho para a dimensão ambiental.

Quadro 6.2 – Escopo de avaliação para os aspectos ambientais.

Aspectos ambientais	Escopo		Justificativa
	Manufatura	Corporação	
Materiais	●	●	Item fundamental dos programas de produção mais limpa e ecoeficiência
Energia	●	●	Item fundamental dos programas de produção mais limpa e ecoeficiência
Água	●	●	Item fundamental dos programas de produção mais limpa e ecoeficiência
Emissões	●	●	Item fundamental dos programas de produção mais limpa e ecoeficiência
Efluentes	●	●	Item fundamental dos programas de produção mais limpa e ecoeficiência
Resíduos	●	●	Item fundamental dos programas de produção mais limpa e ecoeficiência
Fornecedores	●	●	Item fundamental dos programas de produção mais limpa e ecoeficiência
Produtos e serviços	●	●	Item colabora para o novo foco na cadeia de suprimentos e no produto (visão de ciclo de vida)
Embalagens	●	●	Item fundamental dos programas de produção mais limpa e ecoeficiência
Transporte	●	●	Item colabora para o novo foco na cadeia de suprimentos e no produto (visão de ciclo de vida)
Materiais tóxicos	●	●	Item fundamental dos programas de produção mais limpa e ecoeficiência
Ruídos e radiação	●	●	Item colabora para o novo foco na cadeia de suprimentos e no produto (visão de ciclo de vida)
Uso da terra	●	●	Item colabora para o novo foco na cadeia de suprimentos e no produto (visão de ciclo de vida)
Impactos de terceiros	●	●	Item colabora para o novo foco na cadeia de suprimentos e no produto (visão de ciclo de vida)
Sistemas de gestão ambiental	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Obediência a leis e regulações	●	●	Item fundamental dos programas de produção mais limpa e ecoeficiência
Infra-estrutura criada	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Impactos regionais	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Biodiversidade	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Acidificação	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Destruição da camada de ozônio	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Efeito estufa	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Photochemical ozone depletion	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Recursos energéticos e minerais	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa

Legenda: ● Aplicável; ○ Não aplicável

Fonte - Autor

Fatores como monitoramento, controle e diminuição na quantidade de poluentes produzidos, além da melhor eficiência dos recursos de produção, são fatores básicos para a sustentabilidade em manufatura. Outros fatores ainda, como transporte e uso de embalagens, ou a obediência a leis e regulações, também são apontados como importantes por diferentes autores (WBCSD, 2001; HAY; NOONAN, 2005; VDI 4070, 2006; VELEVA *et al.*, 2001).

Em seguida, foi a vez de selecionar os aspectos sociais. A dimensão social apresenta dois possíveis focos de análise: interno ou externo. O foco interno trata da saúde e do bem

estar dos funcionários, práticas disciplinares, equidade, treinamento e oportunidades. Já o foco externo está preocupado com o público externo a empresa, estando dividido em três níveis: comunidade local, regional e população em geral. O foco a ser adotado na avaliação dos processos de manufatura será exclusivamente o interno.

Como está descrito no Quadro 6.3, os aspectos sociais que se relacionam diretamente com a manufatura estão quase que exclusivamente ligados aos recursos humanos internos da empresa. Tais medidas buscam avaliar o bem estar e a qualificação dos funcionários, itens fundamentais para conservar e melhorar a sua eficiência e criatividade. Outros aspectos ligados aos *stakeholders* em geral envolvem mais áreas e funções da empresa, não estando por esse motivo dentro do objetivo do sistema de KPI para processos de manufatura.

Quadro 6.3 – Escopo de avaliação para os aspectos sociais.

Aspectos sociais	Escopo		Justificativa
	Manufatura	Corporação	
Relações trabalhistas	●	●	O bem estar e qualificação dos funcionários devem ser uma prioridade
Saúde e segurança	●	●	O bem estar e qualificação dos funcionários devem ser uma prioridade
Treinamento e educação	●	●	O bem estar e qualificação dos funcionários devem ser uma prioridade
Diversidade e igualdade de oportunidades	●	●	A diversidade favorece o desenvolvimento de novos talentos
Práticas justas de trabalho e obediência a leis	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Liberdade de associação e barganha coletiva	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Número de empregados, trainnes e turnover	●	●	O bem estar e qualificação dos funcionários devem ser uma prioridade
Respeito a criança	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Respeito aos direitos indígenas	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Meios para lidar com direitos humanos no trabalho	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Cultura, saúde e educação oferecida a comunidade	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Serviços oferecidos a comunidade	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Respeito às leis e regulações locais e amplas	○	●	Item fundamental para a obediência as leis e regulações trabalhistas
Incentivos a competição	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Estímulos sensoriais junto a comunidade	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Impactos sobre a segurança local	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Prosperidade econômica a comunidade	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Contribuição para a coesão social	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Criação de políticas para os impactos gerados	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Meios para combater suborno e corrupção	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Ações de P&D para produtos sustentáveis	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Desempenho de produtos e serviços	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Saúde e segurança do consumidor	●	●	Manufatura deve garantir o desempenho de projeto do produto
Certificados de adequação obtidos, ou labels	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Atendimento de padrões de propaganda	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Ações voltadas a privacidade do consumidor	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Influência negativa de terceiros nas decisões	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Acesso a informações	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Stakeholder enpowerment	●	●	A participação dos funcionários no processo de decisão deve ser incentivada

Legenda: ● Aplicável; ○ Não aplicável

Fonte - Autor

Em último lugar foram separados os aspectos econômicos. No caso da dimensão econômica, as medidas também podem ser resultado de agentes internos e externos. Na análise realizada ao longo desse trabalho, direcionada a manufatura, o desempenho econômico deverá ser avaliado por meio de medidas exclusivamente internas (financeiras). Assim, aspectos como, doações a comunidade, não participam do escopo de análise. Os aspectos econômicos para manufatura estão selecionados no Quadro 6.4.

Quadro 6.4 – Escopo de avaliação para os aspectos econômicos.

Aspectos econômicos	Escopo		Justificativa
	Manufatura	Corporação	
Custos de produção	●	●	Item fundamental do programas de ecoeficiência
Custos de capital	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Custos end-of-life	●	●	Item fundamental do programas de ecoeficiência
Custos da ausência de funcionários	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Custos associados a garantias e obrigações	●	●	Item fundamental do programas de ecoeficiência
Custo do tratamento de emissões e resíduos	●	●	Item fundamental do programas de ecoeficiência
Custos equivalentes dos impactos ambientais	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Custos para mitigar impactos ambientais	●	●	Item fundamental do programas de ecoeficiência
Ganhos de receita de boas práticas	●	●	Item fundamental do programas de ecoeficiência
Intervenção dos *stakeholders*	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Valor adicionado ao produto	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Resultado operacional	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Resultado líquido	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Retorno sobre o capital social	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Retorno sobre capital de terceiros	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Investimentos ambientais	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Retorno sobre investimentos	●	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Despesas administrativas e de venda	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Despesas com treinamento	●	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Liquidez e solvência	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Benefícios em potencial de boas praticas	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Capital social	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Utilização da capacidade	●	●	Item fundamental do programas de ecoeficiência
Taxa de falhas e defeitos	●	●	Item fundamental do programas de ecoeficiência
Despesas com pesquisa e desenvolvimento	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Desenvolvimento do capital corrente	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Desenvolvimento do capital fixo	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Visão perante as partes externas	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Participação de Mercado	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Contribuição ao GDP	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Total de taxas pagas por região e país	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa
Doações a comunidade	○	●	Item demanda uma análise integrada com outras áreas/funções da empresa

Fonte - Autor

6.2. Seleção dos principais aspectos de desempenho em sustentabilidade

A segunda etapa do modelo de avaliação envolve a seleção dos principais aspectos de desempenho em sustentabilidade. Depois de pré-selecionados anteriormente, é preciso refinar esta lista e identificar o grupo de aspectos mais relevantes para a tarefa de avaliação e comunicação do desempenho em sustentabilidade. Essa etapa pode ser feita com o possível auxílio de alguma ferramenta não integrada de avaliação de desempenho social, econômico ou ambiental, p.ex. o GaBi software[26]. No entanto, o objetivo desse trabalho não é desempenhar uma análise detalhada de indicadores de potencial de impacto. A avaliação de desempenho deverá usar prioritariamente indicadores presentes em relatórios sustentabilidade de empresas.

Com o intuito de auxiliar na escolha dos aspectos de desempenho principais, foram elaborados dois estudos comparativos para orientar os usuários do método proposto. Inicialmente, foi realizada uma análise comparativa dos modelos de medição de desempenho em sustentabilidade, com o objetivo de tornar evidente os aspectos que são mais freqüentes

[26] Ver mais detalhes sobre o software de avaliação do ciclo de vida no site www.gabi-software.com.

entre os diferentes modelos. Em seguida, foram avaliados relatórios de sustentabilidade de diferentes empresas para o ano de 2008. Após essa análise comparativa, foi possível avaliar quais aspectos estão sendo mais monitorados por tais empresas e assim, valorizar os indicadores que estão, no momento, mais alinhados com a gestão de sustentabilidade de negócios e seus planos de diretrizes estratégicas. Logo a seguir, estão detalhadas as duas análises comparativas.

6.2.1. Análise comparativa dos modelos de medição de desempenho

Os aspectos de desempenho empregados com maior freqüência pelos modelos foram considerados os mais relevantes. Esse critério induz, adicionalmente, maior consenso e coerência entre os diferentes *stakeholders* sobre o grupo de indicadores de sustentabilidade a serem verificados e monitorados. O objetivo não é "reinventar a roda", mas incluir os indicadores mais comumente usados pelas organizações em seus relatórios de sustentabilidade, fornecendo instruções de como calcular e usar essas medidas nas atividades de manufatura. Uma nota deve ser feita sobre os aspectos de desempenho em sustentabilidade inicialmente classificados como principais. Esses não podem ser considerados como melhores ou mais importantes que os demais. Refinamentos subseqüentes podem demonstrar que outras medidas de desempenho também são relevantes e devem ser incorporados ao método de avaliação para um caso específico.

A escolha dos aspectos de desempenho principais foi conduzida com o auxílio de uma das diversas ferramentas da qualidade, o Diagrama de Pareto[27]. O Gráfico de Pareto é um gráfico de barras verticais que dispõe a informação de forma a tornar evidente e visual a priorização de temas. Ele permite concentrar esforços na melhoria de áreas onde os maiores ganhos podem ser obtidos (WERKEMA, 1995).

Melhorias mais significativas podem ser obtidas quando os problemas considerados críticos são priorizados. A atenção deve ser concentrada, primeiramente, na direção dos poucos problemas vitais e logo a seguir, de acordo com a relação de causa efeito, na direção de causas para estes problemas.

A consideração sobre quais aspectos de desempenho ambientais seriam mais relevantes e comuns apresenta relativa concordância entre os grupos de *stakeholders*. Como é

[27] "O princípio de Pareto foi inicialmente estabelecido por J.M. Juran, que adaptou os problemas da qualidade a teoria para modelar a distribuição de renda desenvolvida pelo sociólogo e economista italiano Vilfredo Pareto (1843-1923). Pareto mostrou, em 1897, que a distribuição de renda é muito desigual, com a maior parte da riqueza pertencendo a poucas pessoas" (WERKEMA, 1995, p.76).

comentado pelo guia de relatórios de sustentabilidade GRI, "a dimensão ambiental é aquela que atingiu o maior nível de consenso entre os *stakeholders* para a elaboração de relatórios de sustentabilidade" (GRI, 2006, p.48).

Ainda assim, novas análises podem incorporar, futuramente, outros aspectos ambientais identificados como importantes para aplicações específicas. Embora alguns modelos de medição de desempenho, p.ex., GRI, incorporem medidas de condição ambiental, ou *mid-point indicators*[28], tais medidas deverão ser abordadas somente adiante. Os dados para a elaboração do Gráfico de Pareto para a dimensão ambiental foram calculados e dispostos no Quadro 6.5.

Quadro 6.5 – Freqüência de uso dos aspectos de desempenho ambientais.

Categorias de desempenho	Aspectos de desempenho	Freqüência	Percentual	Acumulado
Aspectos ambientais	Energia	14	11,8%	11,8%
Aspectos ambientais	Materiais	13	10,9%	22,7%
Aspectos ambientais	Água	13	10,9%	33,6%
Aspectos ambientais	Emissões	13	10,9%	44,5%
Aspectos ambientais	Efluentes	11	9,2%	53,8%
Aspectos ambientais	Resíduos	11	9,2%	63,0%
Aspectos ambientais	Materiais tóxicos	10	8,4%	71,4%
Aspectos ambientais	Produtos e serviços	8	6,7%	78,2%
Aspectos ambientais	Embalagens	6	5,0%	83,2%
Gestão ambiental	Obediência a leis e regulações	5	4,2%	87,4%
Aspectos ambientais	Transporte	4	3,4%	90,8%
Aspectos ambientais	Uso da terra	4	3,4%	94,1%
Aspectos ambientais	Fornecedores	3	2,5%	96,6%
Aspectos ambientais	Ruídos e radiação	3	2,5%	99,2%
Aspectos ambientais	Impactos de terceiros	1	0,8%	100,0%

Fonte - Autor

[28] "Embora esses termos não tenham sido apropriadamente definidos, indicador *mid-point* é considerado um ponto na cadeia de relação causa-efeito (mecanismo ambiental) de uma categoria particular de impacto, antes do *endpoint* [...] A saúde humana e os impactos no ecossistema podem ser avaliados no *endpoint* como um resultado que pode ocorrer da mudança do clima, destruição da camada de Ozônio, assim como outras categorias tradicionalmente avaliadas usando categorias de indicadores *mid-point*" (BARE *et al.*, 2000, p.319).

Diagrama de Pareto para a dimensão ambiental está representado na Figura 6.2.

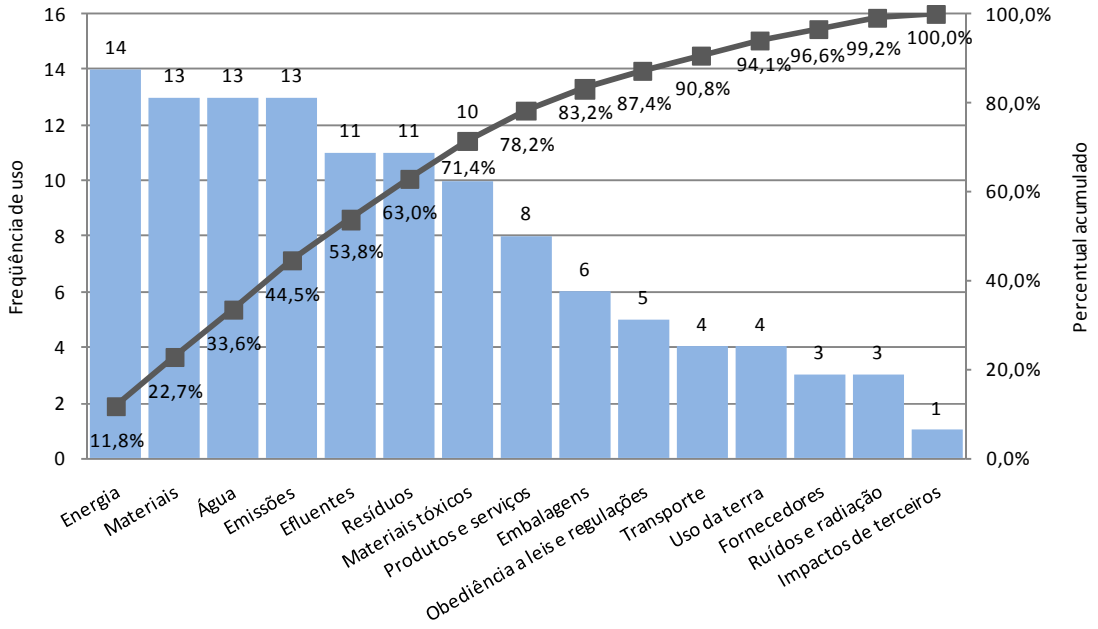


Figura 6.2 – Diagrama de Pareto para os aspectos de desempenho ambientais.

Fonte - Autor

Como está na Figura 6.2, alguns aspectos ambientais são usados com maior freqüência pelos diferentes modelos de medição de desempenho. Conseqüentemente, uma maneira de refinar a lista de aspectos ambientais seria justamente aplicar tal critério. A lista de aspectos principais em sustentabilidade deverá ser selecionada de acordo com uma freqüência de uso no Diagrama de Pareto estipulada como sendo igual ou superior a 70%. Acredita-se que um valor superior a esse estipulado não traria ganhos de precisão ou relevância para as análises de sustentabilidade.

Como pode ser visto, os aspectos ambientais mais avaliados e monitorados pelos modelos de medição de desempenho são: energia, materiais, água, emissões, efluentes, resíduos e materiais tóxicos. Ao todo, 71,4 % das medidas de desempenho ambiental surgem desses aspectos. O uso dos demais aspectos de desempenho, como ruídos e radiação, ou impactos de terceiros, não acontece na mesma medida e dependerá do tipo específico de atividade e de grupos de interesse.

A dimensão social é aquela para a qual parece existir maior quantidade de categorias de desempenho, levando com isso, a um consenso inferior entre os diferentes *stakeholders* sobre os tipos de indicadores a serem aplicados: “a avaliação do desempenho social desfruta de um consenso inferior a dimensão ambiental” (GRI, 2006, p.51). No entanto, baseado na etapa anterior do método de avaliação de desempenho (seção 6.1), os aspectos sociais a serem

avaliados foram reduzidos e direcionados para o interior da empresa. Com isso, a quantidade disponível de aspectos passou a ser inferior, viabilizando assim, o estudo da sustentabilidade social de processos de manufatura.

Assim como para a dimensão ambiental, também foi construído um Diagrama de Pareto para todos os aspectos de desempenho para a dimensão social. No Quadro 6.6, foram separados os diversos aspectos sociais de acordo com a sua freqüência de uso pelos modelos de medição de desempenho.

Quadro 6.6 – Freqüência de uso dos aspectos de desempenho sociais.

Categorias de desempenho	Aspectos de desempenho	Freqüência	Percentual	Acumulado
Recursos Humanos Internos	Relações trabalhistas	7	25,9%	25,9%
Recursos Humanos Internos	Saúde e segurança	7	25,9%	51,9%
Recursos Humanos Internos	Treinamento e educação	7	25,9%	77,8%
Responsabilidade Produto	Produtos e serviços	2	7,4%	85,2%
Responsabilidade Produto	Saúde e segurança do consumidor	2	7,4%	92,6%
Sociedade	Respeito às leis e regulações	1	3,7%	96,3%
Sociedade	Estímulos sensoriais	1	3,7%	100,0%

Fonte - Autor

De acordo com a Figura 6.3, elaborada a partir do Quadro 6.6, três aspectos totalizam aproximadamente 78% dos indicadores sociais usados pelos modelos de medição de desempenho para avaliação de atividades de manufatura. Relações trabalhistas, saúde e segurança e treinamento e educação são os aspectos que mais integram os modelos.

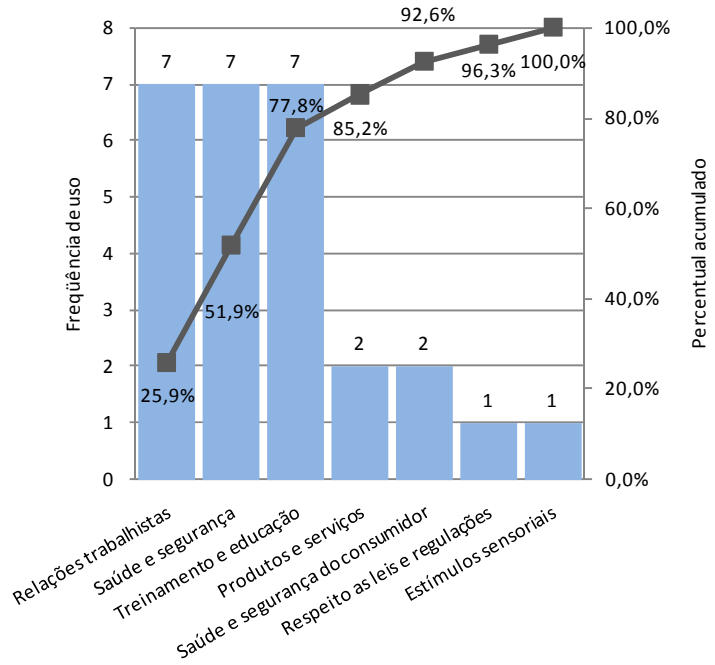


Figura 6.3 – Diagrama de Pareto para os aspectos sociais.

Fonte - Autor

Com relação à dimensão econômica, os aspectos de desempenho estão representados no Quadro 6.7.

Quadro 6.7 – Freqüência de uso de aspectos de desempenho econômicos.

Categorias de desempenho	Aspectos de desempenho	Freqüência	Percentual	Acumulado
Desempenho Financeiro	Custos de produção	6	18,8%	18,8%
Desempenho Financeiro	Custos associados a garantias e obrigações	5	15,6%	34,4%
Desempenho Financeiro	Investimentos ambientais	4	12,5%	46,9%
Desempenho Financeiro	Retorno sobre investimentos	3	9,4%	56,3%
Desempenho Financeiro	Custos de fim de vida	2	6,3%	62,5%
Desempenho Financeiro	Ganhos de receita de boas práticas	2	6,3%	68,8%
Desempenho Financeiro	Custos para mitigar impactos ambientais	2	6,3%	75,0%
Desempenho Financeiro	Taxa de falhas e defeitos	2	6,3%	81,3%
Desempenho Financeiro	Custo do tratamento de emissões, efluentes e resíduos	2	6,3%	87,5%
Desempenho Financeiro	Benefícios em potencial de boas praticas	2	6,3%	93,8%
Desempenho Financeiro	Despesasa com treinamento	1	3,1%	96,9%
Desempenho Financeiro	Utilização da capacidade	1	3,1%	100,0%

Fonte - Autor

Uma quantidade maior de aspectos econômicos, comparativamente a dimensão social e ambiental, foi selecionada na fase anterior do *framework*. A partir dos dados acima foi elaborado o gráfico da Figura 6.4.

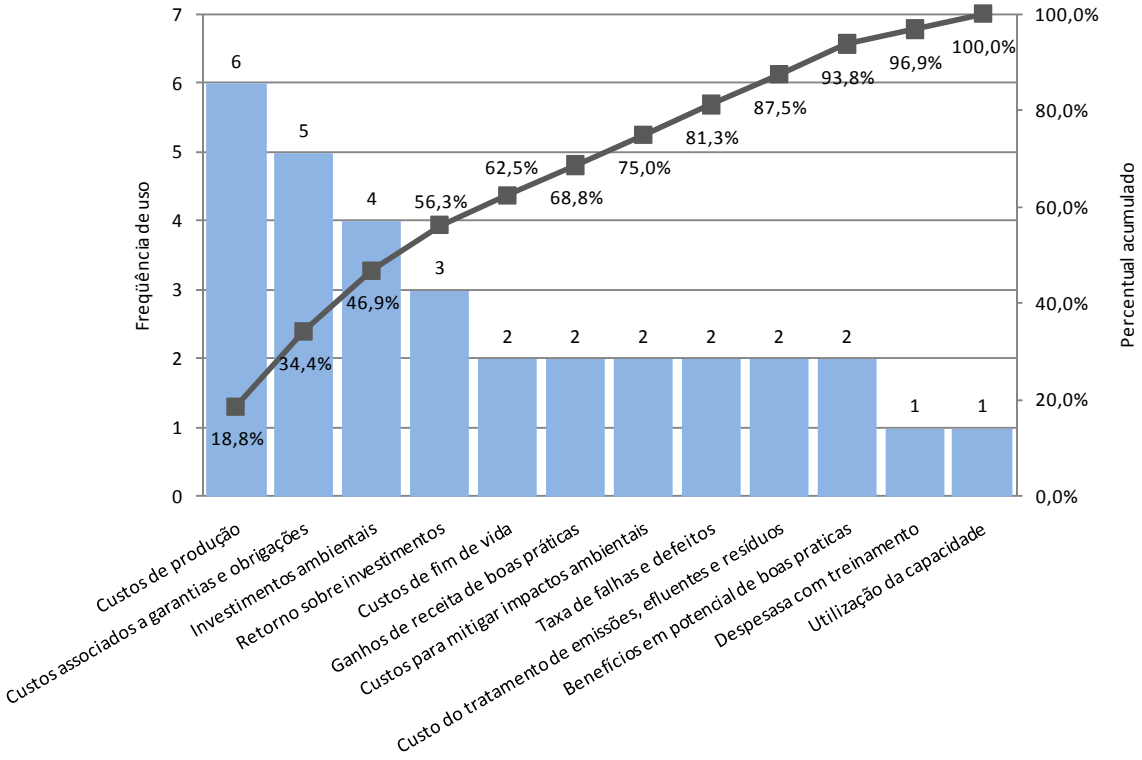


Figura 6.4 – Diagrama de Pareto para os aspectos econômicos.

Fonte - Autor

Dentre os modelos estudados, os aspectos econômicos usados com maior freqüência pelo modelos seriam: custos de produção, custos associados a garantias e obrigações, investimentos ambientais, retorno sobre investimentos, custos de fim de vida e ganhos de receita advindos de boas práticas. Estes aspectos totalizaram 68,8% de freqüência de uso pelos modelos de medição de desempenho.

De acordo com Woodward (1997), é salutar que a avaliação econômica de projetos incorpore a abordagem de custo do ciclo de vida, ou *life-cycle-costing*. Com ela, é feita uma estimativa dos custos de um projeto em todo o seu ciclo de vida, uma vez que o custo de investimento pode ser muito inferior ao verdadeiro custo do ciclo de vida.

6.2.2. Análise comparativa de relatórios de sustentabilidade de empresas-modelo

Para a análise comparativa entre relatórios de sustentabilidade de empresas, foi utilizado levantamento do Guia Exame de Sustentabilidade 2008. Nessa publicação, foram escolhidos entre 177 empresas de médio e grande porte de todo o país – consideradas as mais atuais referências em levantamentos sobre sustentabilidade empresarial no Brasil – 20

empresas-modelo. Dentre as 20 empresas-modelo, foram selecionadas aquelas que adotam o guia GRI para a elaboração de seus relatórios. Veja a lista no Quadro 6.8.

Quadro 6.8 – Lista de empresas-modelo.

Empresa	Setor de atuação
AES Tietê - Eletropaulo	Infra-estrutura
Amanco Brasil	Infra-estrutura
Anglo American Brasil	Financeiro
Banco Bradesco	Financeiro
Banco Itaú Holding Financeira	Financeiro
BASF	Química
CPFL Energia	Infra-estrutura
Elektro Eletricidade e Serviços	Infra-estrutura
EDP – Energias do Brasil	Infra-estrutura
Masisa do Brasil	Painéis de Madeira
Natura	Cosméticos
Perdigão	Alimentos
Philips do Brasil	Eletrônicos
Serasa	Financeiro
Suzano Papel e Celulose	Papel e celulose
Usiminas Siderúrgica	Aço
Wal-Mart Brasil	Varejo

Fonte – EXAME, 2008.

A opção por escolher as empresas que adotam o guia GRI foi importante para viabilizar a análise comparativa entre os diferentes relatórios de sustentabilidade. Como o guia GRI utiliza uma lista de indicadores numerados e divididos por categorias, torna-se possível rastrear e comparar as diferentes medidas de desempenho publicadas pelas empresas. De outra forma, seria difícil fazer uma correlação entre os parâmetros de desempenho, uma vez que a nomenclatura para indicadores semelhantes seria diferente em cada relatório, mesmo apresentando o mesmo significado.

O mesmo tipo de análise estatística realizado anteriormente na seção 6.2.1 foi aplicado para os dados colhidos dos relatórios de sustentabilidade referentes as 17 empresas estudadas. Foram separados os indicadores de acordo com a sua dimensão, categoria e freqüência de uso pelas empresas. Os valores para a dimensão ambiental estão separados no Quadro 6.9.

Quadro 6.9 – Freqüência de uso de indicadores ambientais por empresas-modelo.

Aspecto de desempenho	%	Acumulado
Energia	23%	23%
Emissões	21%	43%
Água	13%	56%
Efluentes	10%	66%
Materiais	10%	76%
Produtos e serviços	9%	85%
Resíduos	8%	93%
Obediência a leis e regulações	4%	97%
Transporte	3%	100%

Fonte – *Adaptado de* EXAME, 2008.

A partir dos dados referentes ao Quadro 6.9 foi elaborado gráfico de freqüência de uso dos indicadores ambientais, assim como Diagrama de Pareto. Como está ilustrado na Figura 6.5, cinco aspectos de desempenho representam exatamente 76% dos indicadores ambientais avaliados pelas empresas-modelo em sustentabilidade. Assim, os aspectos ambientais que podem ser classificados como prioritários seriam: energia; emissões, água; efluentes; materiais. Esses valores estão de acordo com os resultados apresentados na seção 6.2.1, com exceção dos resíduos.

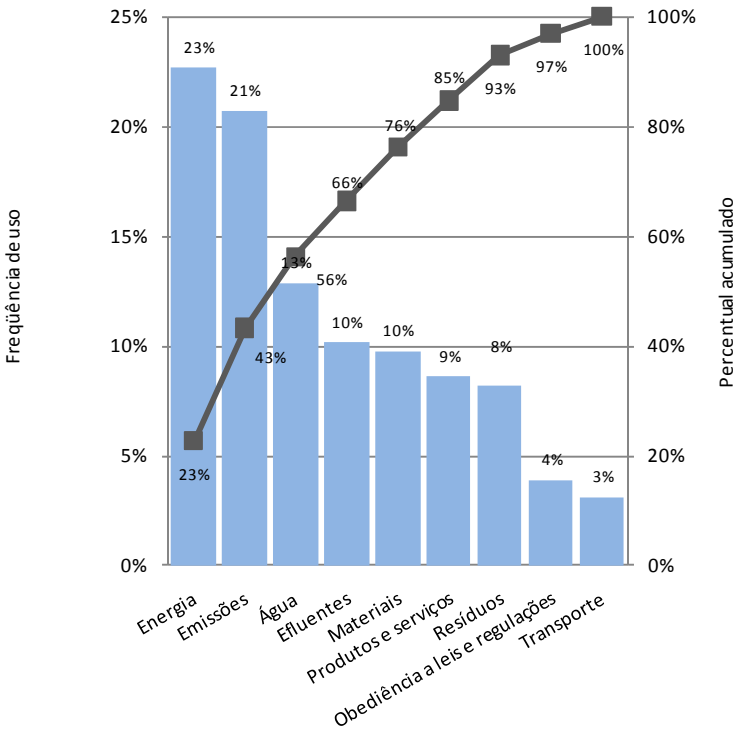


Figura 6.5 –Freqüência de uso dos indicadores ambientais e Diagrama de Pareto.

Fonte – *Adaptado de* EXAME, 2008.

Análise semelhante foi realizada para a dimensão social. Os aspectos sociais estão separados conforme a sua categoria de desempenho (Quadro 6.10).

Quadro 6.10 – Freqüência de uso de indicadores ambientais por empresas-modelo.

Aspecto de desempenho	%	Acumulado
Saúde e segurança	24%	24%
Relações trabalhistas	20%	44%
Treinamento e educação	20%	64%
Produtos e serviços	15%	79%
Respeito as leis e regulações	11%	90%
Saúde e segurança do consumidor	10%	100%
Estímulos sensoriais	0%	100%

Fonte – *Adaptado de* EXAME, 2008.

Com os dados do Quadro 6.10 foi elaborado Diagrama de Pareto (Figura 6.6). Assim como para a dimensão ambiental, os resultados da análise estatística também proporcionaram resultados convergentes com os apresentados na seção 6.2.1. Os indicadores relacionados a saúde, segurança, treinamento, emprego e educação também foram monitorados com maior freqüência pelas empresas-modelo, somando 64% de freqüência de uso.

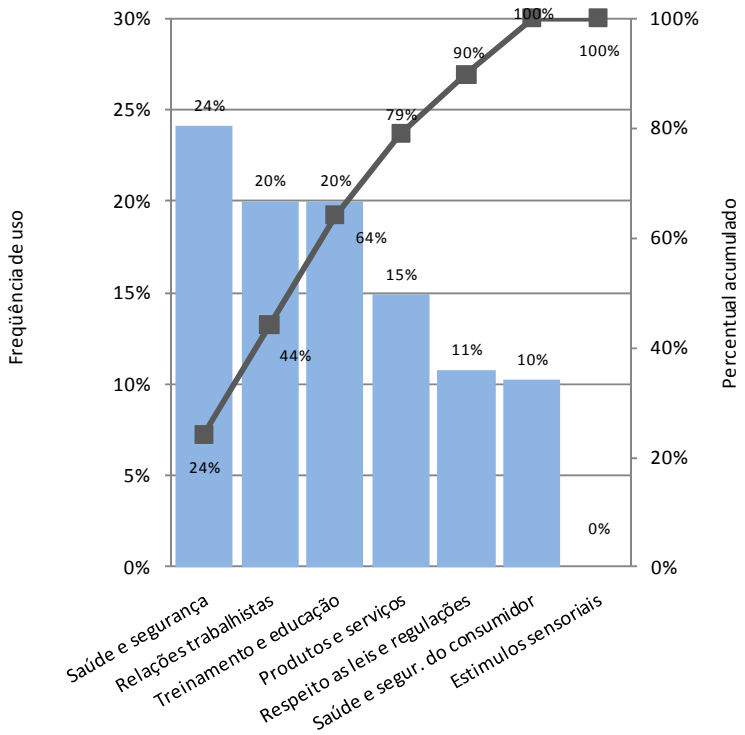


Figura 6.6 –Freqüência de uso dos indicadores sociais e Diagrama de Pareto.

Fonte – *Adaptado de* EXAME, 2008.

Somente no caso dos aspectos econômicos a análise não pode ser realizada a partir dos relatórios de empresa, devido ao menor detalhamento de medidas financeiras e econômicas pelo guia GRI. O guia GRI separa as medidas econômicas em três aspectos de desempenho somente: desempenho econômico, presença no mercado e impactos econômicos indiretos.

6.2.3. Lista de aspectos de desempenho principais obtidos das análises estatísticas

Após a construção das figuras de freqüência de uso dos indicadores, tais dados foram tomados para definir o seu grau de importância (Quadro 6.11).

Quadro 6.11 – Lista de aspectos de desempenho principais.

Dimensão	Aspecto	Freqüência de uso		Valor médio	Prioridade
		Análise 1	Análise 2		
Ambiental	Energia	11,8%	22,7%	17,3%	Alta
Ambiental	Emissões	10,9%	20,7%	15,8%	Alta
Ambiental	Água	10,9%	12,9%	11,9%	Alta
Ambiental	Efluentes	9,2%	10,2%	9,7%	Alta
Ambiental	Materiais	10,9%	9,8%	10,4%	Alta
Ambiental	Produtos e serviços	6,7%	8,6%	7,6%	Variável
Ambiental	Resíduos	9,2%	5,9%	7,7%	Alta
Ambiental	Obediência a leis e regulações	4,2%	3,9%	4,1%	Variável
Ambiental	Transporte	3,4%	3,1%	3,3%	Variável
Ambiental	Materiais tóxicos	8,4%	2,3%	5,4%	Variável
Social	Saúde e segurança	22,6%	23,9%	23,3%	Alta
Social	Relações trabalhistas	22,6%	19,8%	21,3%	Alta
Social	Treinamento e educação	22,6%	19,8%	21,3%	Alta
Social	Diversidade e igualdade de oportunidade	16,1%	13,7%	15,1%	Variável
Social	Valorização dos *stakeholders*	9,7%	12,7%	11,4%	Variável
Social	Saúde e segurança do consumidor	6,5%	10,2%	8,2%	Variável
Econômico	Custos de produção	18,8%	—	18,8%	Alta
Econômico	Custos associados a garantias e obrigações	15,6%	—	15,6%	Alta
Econômico	Investimentos ambientais	12,5%	—	12,5%	Variável
Econômico	Retorno sobre investimentos	9,4%	—	9,4%	Alta
Econômico	Custos de fim de vida	6,3%	—	6,3%	Alta
Econômico	Ganhos de receita de boas práticas	6,3%	—	6,3%	Variável
Econômico	Custos para mitigar impactos ambientais	6,3%	—	6,3%	Variável
Econômico	Taxa de falhas e defeitos	6,3%	—	6,3%	Variável
Econômico	Custo do tratamento de emissões, efluentes e resíduos	6,3%	—	6,3%	Variável
Econômico	Benefícios em potencial de boas praticas	6,3%	—	6,3%	Variável
Econômico	Despesas com treinamento	3,1%	—	3,1%	Variável
Econômico	Utilização da capacidade	3,1%	—	3,1%	Variável

Fonte – Autor.

Dessa maneira, foi possível orientar a priorização dos aspectos de desempenho em sustentabilidade. Os aspectos com, incontestavelmente, maior freqüência de uso foram classificados como de prioridade alta, enquanto as demais têm prioridade variável, dependendo do tipo e do objetivo da avaliação de desempenho em sustentabilidade. Por exemplo, um tipo de gestão que tenha interesse em rastrear a quantidade de produtos defeituosos oriundos de seus processos, deve conceder maior prioridade aos indicadores

advindos do aspecto Produtos ou Serviços. Outras medidas, embora reconhecidamente importantes, não foram citadas com maior freqüência por estarem ligadas, tipicamente, a práticas de gestão reativas, como seria o caso de indicadores para obediência a leis e regulações. Diferentes autores estão mais preocupados com práticas de prevenção e melhoria e acreditam que as leis e regulações já correspondem a um nível inicial de desenvolvimento em sustentabilidade. Esse fato está de acordo com o conteúdo da Figura 2.

Entre as medidas econômicas, aquelas que tratam de relacionar os ganhos econômicos advindos de boas práticas socioambientais merecem um maior destaque, pois tratam de pavimentar um caminho factível de inserção de modelos sustentáveis de desenvolvimento no ambiente de negócios. Aspectos do tipo, "Ganhos de receita de boas práticas", mesmo com baixa adesão por parte de modelos de medição de desempenho e empresas, representam uma abordagem de vanguarda, um caminho a ser seguido futuramente pela gestão de sustentabilidade.

Assim, os principais aspectos de desempenho estão ilustrados na Figura 6.7.

Figura 6.7 –Principais aspectos de desempenho em sustentabilidade para manufatura.

Fonte – Autor.

Ao todo, foram selecionados treze aspectos de desempenho em sustentabilidade. Esses aspectos de desempenho são fundamentais para a etapa seguinte do método, a identificação dos indicadores de sustentabilidade. O aspecto econômico relativo aos Investimentos Ambientais não foram acrescentados ao escopo de aspectos prioritários, já que não seriam relevantes para o objetivo específico da análise experimental.

6.3. Identificação dos indicadores de sustentabilidade

Uma vez definido os aspectos principais, será dada seqüência selecionando-se os indicadores de desempenho. Existe uma grande diversidade de indicadores de desempenho, sendo cada grupo mais adequado a um dado contexto ou universo de análise. Por isso, a sua escolha é complexa e envolve algumas considerações. De forma geral, o número de indicadores de desempenho dependerá da natureza e da escala do processo de manufatura (EN ISO 14031, 1999).

Para auxiliar na tarefa de escolha dos indicadores de sustentabilidade deverá ser construído diagramas de fluxo de processos para os processos de manufatura. De acordo com o guia elaborado pela EPA US (2003, p.2) para a identificação dos aspectos de desempenho, "o uso de fluxogramas de processo permite que a organização visualize e entenda como o trabalho é realizado". Os fluxogramas de processo são capazes de fornecer uma visão integrada de todas as partes que compõem os sistemas de produção.

O uso dessa ferramenta para identificar os indicadores de desempenho envolve uma lista de tarefas. Primeiramente, é necessário dividir o sistema de produção em unidades principais. Em seguida, é necessário elaborar diagramas de fluxo de processo, capazes de demonstrar todas as entradas e saídas das atividades. Diagramas de fluxo de processo são considerados planilhas de balanço de massa por representarem todas as entradas e saídas (EPA US, 2003). O terceiro passo consiste em transferir todas as informações de entrada e saída obtidas a partir dos diagramas de fluxo de processo para as matrizes de correlação de aspectos em sustentabilidade. O último passo envolve a investigação e a seleção dos indicadores propriamente ditos. Essa fase necessita de um conhecimento prévio do tipo de atividade em estudo. Logo a seguir, na Figura 6.8, estão ilustradas as etapas do processo de seleção de indicadores de desempenho em sustentabilidade.

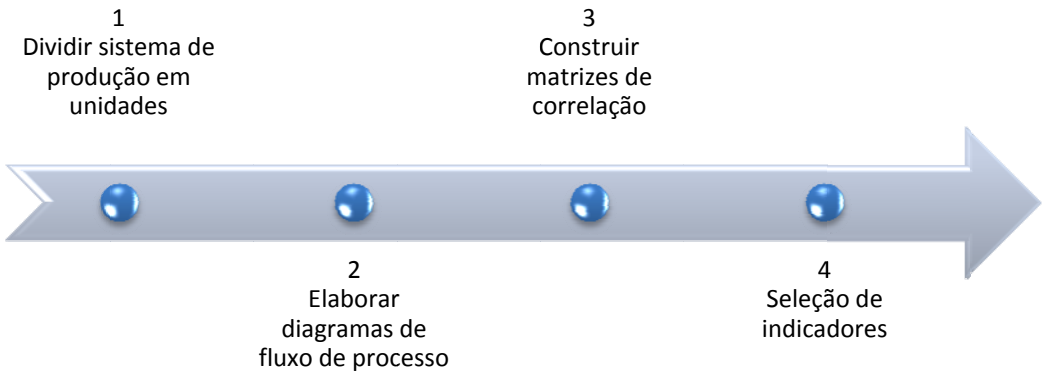


Figura 6.8 – Fases do processo de seleção de indicadores de sustentabilidade.

Fonte – Autor.

A matriz de correlação de aspectos em sustentabilidade para a escolha dos indicadores de desempenho deve ser feita com o auxílio do esquema ilustrado na Figura 6.9. Para cada uma das dimensões da sustentabilidade é necessária a construção de, pelo menos, uma matriz, dependendo da quantidade e complexidade de unidades de processo.

	Unidades do Processo de Manufatura	
Aspectos	Correlação	Indicador
	(+)	IND
	(-)	N/A

Legenda:
(+) Correlação Positiva, escolher indicador (IND)
(-) Correlação Negativa, não se aplica indicador (N/A)

Figura 6.9 – Matriz de correlação para a escolha dos indicadores de desempenho.

Fonte – Autor.

A construção da matriz deve ser feita utilizando os aspectos e as unidades do processo de manufatura. Uma correlação das duas partes deve ser feita separadamente, considerando os impactos gerados sobre a sustentabilidade do processo de manufatura. A correlação é realizada de acordo com a avaliação dos tomadores de decisão da empresa e de especialistas nos sistemas de produção. Uma correlação positiva significa que indicadores de desempenho são adequados para a mensuração do respectivo aspecto. Já uma correlação negativa indica que o acompanhamento desse aspecto para a unidade do processo em questão não é prioritário.

6.4. Definição de metas de desempenho

Depois de definidos os aspectos principais e selecionados os indicadores de sustentabilidade, deve-se escolher as metas de desempenho para o curto e longo prazo. Enquanto os aspectos fornecem as dimensões do desempenho, os indicadores provêm meios para quantificá-los. As metas, por sua vez, provêm os meios para rastrear e identificar as melhorias alcançadas, servindo como marco para projetos de curto e longo prazo da empresa.

Fiksel, McDaniel e Mendelhall (1999) chamam a atenção para a importância da definição de metas de desempenho para a melhoria da sustentabilidade de uma empresa. Mesmo os gerentes adotando ações que visam à sustentabilidade, sem a definição de metas, os resultados alcançados a partir dos programas de melhoria não seriam representativos e não alterariam significamente o seu desempenho. Dessa forma, as metas permitem planejar o nível de desempenho para as diferentes categorias de indicadores e como conseqüência, priorizar as principais melhorias a serem adotadas.

Uma dificuldade que pode existir é a ausência de dados prévios sobre o nível de desempenho da empresa. Normalmente, as melhorias são mensuradas a partir dos dados históricos da empresa. Quando não existem dados prévios sobre o nível de desempenho, as empresas fazem a opção de, inicialmente, não formular metas de desempenho. Contudo, essa realidade não pode se estender indefinidamente, já que tais informações são fundamentais para os tomadores de decisão, além de fornecer suporte à comunicação junto aos *stakeholders*. Os *stakeholders* avaliam melhor o desempenho da empresa fundamentado na habilidade da empresa em atingir as metas propostas.

Veleva e Ellenbecker (2001) concordam que a definição de metas é um passo chave nas avaliações desempenho em sustentabilidade. Quando são estabelecidas pela gerência metas do tipo, “reduzir os produtos químicos tóxicos por produto em 20% em cinco anos” ou “alcançar uma quantidade zero de problemas de saúde relacionados ao trabalho”, fica demonstrado o comprometimento da administração da empresa em promover a sustentabilidade. A mensuração do desempenho, ou *accountability*, é um passo fundamental nesse sentido.

Duas considerações importantes são necessárias a respeito das metas de desempenho. Primeiramente, é fundamental que as empresas estabeleçam metas que sejam realizáveis, diminuindo assim, o risco de super avaliar as suas capacidades atuais. Em segundo lugar, após realizar as metas planejadas, não significa, entretanto, que a empresa tornou-se sustentável.

Isso só enfatiza a necessidade de definir novos objetivos ou metas dentro do processo de melhoria contínua visando uma sustentabilidade superior.

Uma importante meta para a empresa pode ser a comparação, ou *benchmark*, do seu desempenho. Os valores a serem superados podem ser derivados de processos específicos, de médias da indústria, de regulações ou regras técnicas, ou ainda, de autodeterminações de associação de indústrias (VDI 4070, 2006).

6.5. Coleta de dados de desempenho

A fase cinco envolve a coleta dos dados diretamente do processo ou a partir de bancos de dados existentes em sistemas de informação. Como foi comentado na seção 3.4, juntamente com a fase seguinte (avaliação da sustentabilidade), são as etapas que mais consomem tempo e requerem maior participação de profissionais de diferentes áreas da empresa ou mesmo, de grupos externos.

Uma organização deve coletar os dados regularmente com a finalidade de alimentar os indicadores selecionados para a avaliação de sustentabilidade. Durante esse processo de obtenção de informações, é necessário garantir a confiabilidade dos dados. Nesse sentido, fatores como, disponibilidade, adequação, validação científica e estatística, além da verificabilidade, serão cruciais para a sua confiabilidade (ISO 14031, 1999).

Obrigatoriamente, as informações devem ser acuradas e confiáveis para permitir o seu uso em processos que envolvem decisões. A acuracidade envolve o nível de exatidão e a margem de erro nas informações fornecidas aos tomadores de decisão. Outro princípio chave para garantir a qualidade dos dados é a transparência e a facilidade de acesso as diferentes fontes de dados. “Acessibilidade aos processos, procedimentos e transparência são essenciais para a sua credibilidade” (GRI, 2006, p.24).

Para proceder com a coleta de dados, os seguintes pontos devem estar bem claros (VELEVA *et al.*, 2001):

a. Qual tipo de sistema de informação será usado para gerenciar os dados?
b. Qual tipo de software será utilizado para reportar os dados?
c. Quem irá coletar cada tipo de dado?
d. Como o pessoal será treinado para coletar cada tipo de informação?
e. Como a acuracidade dos dados será verificada?

O uso de sistemas computacionais junto às atividades de manufatura para a aquisição de dados em tempo real, gerando relatórios simultâneos de sustentabilidade, é capaz de

proporcionar maior rapidez e confiabilidade aos relatórios de sustentabilidade. Os dados coletados diretamente do processo de fabricação são mais precisos, seguros e atualizados do que aqueles provenientes dos apontamentos manuais e/ou com auxilio de mecanismos externos (ARAUJO *et al.*, 2009).

Alguns exemplos de fontes de dados incluem: leituras de equipamentos, diário de bordo/anotações de equipamentos, relatórios de indústrias, bases de dados, consultores, resultados de testes de laboratórios, ou mesmo, o julgamento de especialistas em engenharia. Já os tipos de dados utilizados podem ser: medidas, dados modelados, dados amostrais e dados substitutos de outras fontes.

6.6. Avaliação do desempenho em sustentabilidade

O processo de avaliação da sustentabilidade de operações está dividido em um conjunto de medidas, como está ilustrado na Figura 6.10. O procedimento para obter esses indicadores é composto por diferentes partes, começando com a comunicação dos indicadores absolutos e terminando com o cálculo dos indicadores do tipo *cross-cutting* (relação entre dois tipos de indicadores unidimensionais) e índices agregados. Logo a seguir será detalhado o procedimento para obter tais tipos de medidas.

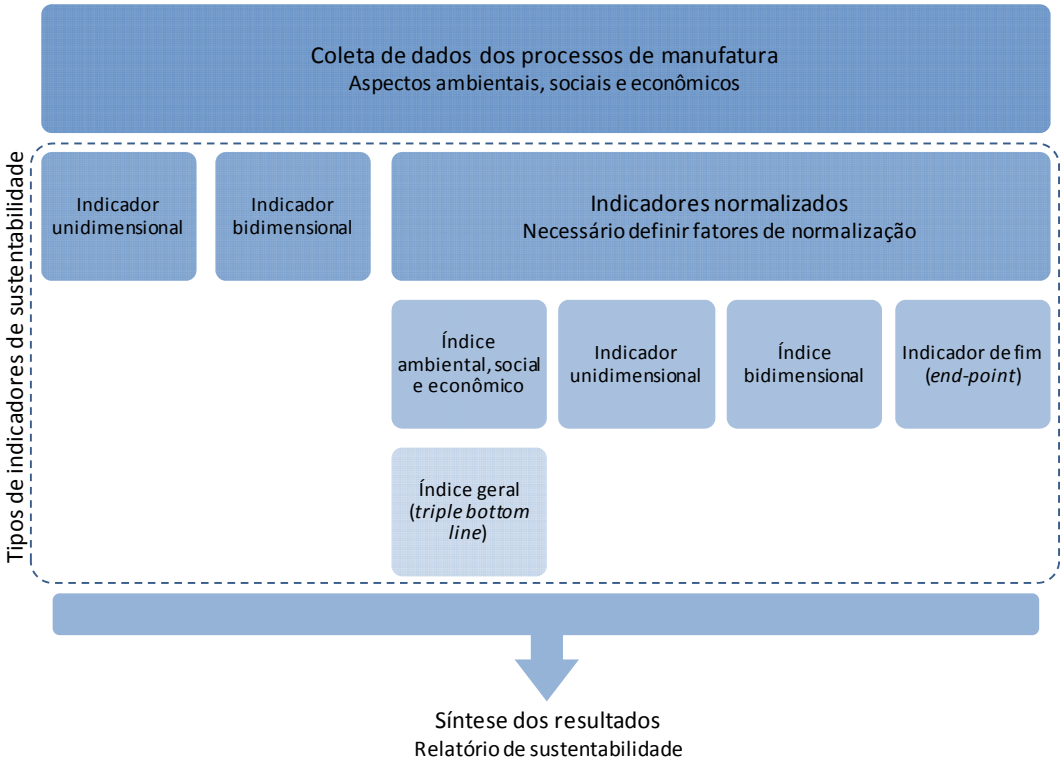


Figura 6.10 –Tipos de medidas de desempenho em sustentabilidade.

Fonte – Autor.

Após a coleta de dados, os indicadores de sustentabilidade obtidos permanecem agrupados em três grupos: dimensão ambiental, social e econômica. Tais indicadores são representados por meio de valores absolutos (indicadores de entrada), os quais fornecem uma boa compreensão da magnitude do rendimento do parâmetro de controle. Os indicadores de entrada são importantes para a avaliação da capacidade de teto ou de limite para a expansão de uma atividade qualquer – um princípio fundamental da sustentabilidade. Os indicadores ambientais, sociais e econômicos por estarem representados separadamente, representam somente uma das dimensões da sustentabilidade e, por isso, são chamados de medidas unidimensionais.

Um tipo específico de indicador unidimensional a ser aplicado na avaliação dos processos de manufatura é a medida de potencial de impacto ambiental. Essa medida é importante para visualizar a condição atual do ambiente e o possível impacto futuro das atividades da empresa[29]. Tais informações podem ajudar a empresa a entender melhor o seu impacto ou potencial de impacto de seu tipo de negócio.

Para mensurar esse tipo de indicador é preciso tratar os dados coletados, realizando dois procedimentos conhecidos como, classificação e caracterização (ISO 14031, 1999). A primeira etapa consiste em designar as informações obtidas do processo, conhecido com inventário, às respectivas categorias de impacto ambiental. Algumas categorias de impacto ambiental mais amplamente medidas podem ser vistas no Quadro 6.12. Após essa fase, é feita a modelagem dos impactos ambientais por meio do uso de fatores de conversão baseados na ciência. A medida de impacto deve ser obtida do produto do dado de processo pelo fator de caracterização (EPA, 2006).

Quadro 6.12 – Algumas categorias de impacto ambiental.

Escopo geográfico	Categorias	Exemplos de impactos
Impactos globais	Consumo de recursos não renováveis	Combustíveis fósseis, metais
	Impactos ambientais	Aquecimento global, destruição da camada de ozônio
Impactos regionais	Impactos ambientais	Acidificação, toxicidade humana
Impactos locais	Impactos ambientais	Ecotoxicidade, disposição de resíduos
	Consumo de recursos renováveis	Água, biomassa
	Ambiente de trabalho	Problemas de audição devido a ruídos

Fonte - WENZEL *et al.*, 1997.

[29] Indicador de condição ambiental é uma medida específica que fornece informação sobre o meio-ambiente no lugar, região, país ou globo (ISO 14031, 1999).

Os indicadores de potencial de impacto ambiental são denominados em ferramentas de avaliação do ciclo de vida (ACV) como indicadores de meio, ou *mid-point indicators.* Bare *et al.* (2000, p.319) explica que embora esse termo não tenha sido apropriadamente definido, "*mid-point* é considerado um ponto na cadeia de relação causa-efeito (mecanismo ambiental) de uma categoria particular de impacto, antes do *end-point*".

Quando indicadores unidimensionais de sustentabilidade são integrados, um novo tipo de medida de desempenho é produzido. A relação entre dois tipos diferentes de indicadores unidimensionais produz uma medida bidimensional, também conhecida como indicador *cross-cuting*. Essas métricas podem ser classificadas como indicadores sócio-econômicos, indicadores de eco-eficiência ou indicadores sócio-ambientais. A vantagem oferecida pelas medidas do tipo *cross-cuting* aparece da avaliação precisa do desempenho em sustentabilidade após mudanças incrementais em fatores distintos (SIKDAR, 2003).

Após essas etapas iniciais do processo de avaliação da sustentabilidade, é iniciada a fase de normalização dos dados obtidos. A normalização é necessária para fornecer uma imagem de boa qualidade da magnitude relativa dos impactos gerados (OLSTHOORN *et al.*, 2001). Outra importante função é possibilitar o passo seguinte da ponderação final, ou *final weighting*, das diferentes categorias de indicadores em uma medida comum para a tomada de decisão.

A normalização permite a comparação direta entre diferentes categorias de desempenho. Para isso, realiza a comparação entre o valor de impacto coletado dos processos e um fator de referência da literatura, também denominado de fator de normalização. Uma representação da fórmula de cálculo do indicador normalizado pode ser vista logo a seguir (WENZEL *et al.*, 1997):

$$NP(j) = P(j) \times \frac{1}{T \times R(j)} \qquad (6.1)$$

Sendo que, R(j) é o fator de normalização, T é o tempo de serviço do objeto em análise, P(j) é o indicador do processo e, finalmente, NP(j) é o indicador normalizado. Normalmente, a referência de normalização é calculada pelo inventário de todas as atividades da sociedade. Contudo, o valor de R(j) também pode basear-se em valores internos, calculado a partir de valores de P(j) obtidos dentro da própria empresa, grupo de empresas, ou setores (TUGNOLI *et al.*, 2008).

Outra medida importante de desempenho em sustentabilidade pode ser obtida da integração dos indicadores normalizados. Essa integração possibilita captar integralmente o desempenho dos sistemas de produção, facilitando, assim, a comparação do nível de

maturidade de diferentes empresas em sustentabilidade. O objetivo de um índice agregado de sustentabilidade é permitir analisar os indicadores de maneira conjunta, levando em conta os avanços realizados para cada uma das categorias de desempenho nas três dimensões da sustentabilidade (GRI, 2006). Um problema para conduzir essa integração dos indicadores de desempenho é a diferença de unidade entre as medidas. Portanto, é fundamental efetuar a normalização dos indicadores antes do cálculo. Na Figura 6.11 foi ilustrada a estrutura de cálculo do índice geral de sustentabilidade.

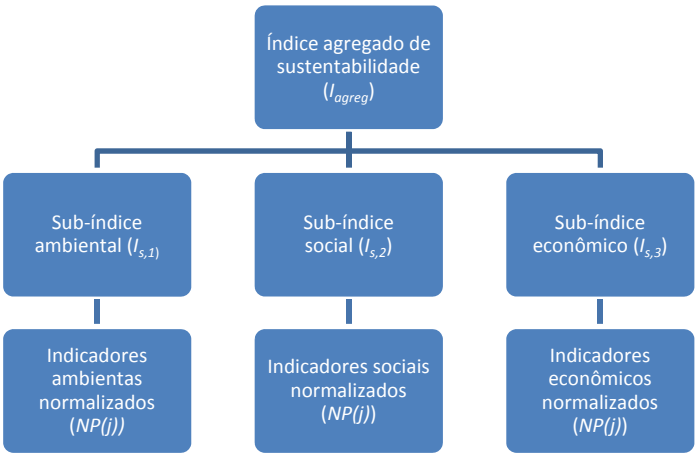


Figura 6.11 – Estrutura de cálculo do índice agregado de sustentabilidade.

Fonte – Autor.

Para se realizar a integração dos indicadores é sugerido o uso de um método de análise multicritério (KRAJNC; GLAVIC, 2005; TUGNOLI *et al.*, 2008). A estrutura de agregação pode ser representada da seguinte forma:

$$I_s = \sum_j W_j NP(j) \qquad (6.2)$$

Sendo que, W_j é o fator de peso para o potencial de impacto ou indicador de entrada j, NP(j) é o indicador normalizado e I_s é o sub-índice de impacto. Para se obter o índice geral de sustentabilidade (I_{agreg}) é sugerido procedimento semelhante. Um obstáculo existente para a integração dos indicadores é a dificuldade em definir fatores de peso adequados. De acordo com Tugnoli *et al.* (2008), os fatores de peso devem ser dependentes das condições do local onde opera o negócio e também do tipo de política de sustentabilidade implementado pela empresa. É recomendado que os fatores de ponderação representem os objetivos estratégicos da empresa, que visam diminuir os efeitos críticos das suas operações em diferentes espaços geográficos e comunidades.

Em resumo, um índice de sustentabilidade permitiria uma comparação mais fácil do desempenho de diferentes empresas e seus processos ou produtos. Krajnc e Glavic (2005)

confirmam a tendência das empresas trabalharem com indicadores agregados de sustentabilidade. No entanto, ainda é preciso desenvolver metodologia suficientemente robusta e confiável para realizar a integração dos indicadores.

> Embora um princípio comum de agregar indicadores para a avaliação de companhias tenha ganhado importância, também se tornou evidente que métodos para a agregação dos indicadores ainda não estão suficientemente estabelecidos, ou não estão disponíveis com respeito a todos os aspectos da sustentabilidade (KRAJNC; GLAVIC, 2005, p.192).

Outro tipo de medida que pode ser útil para o diagnóstico e melhoria da sustentabilidade de empresas é o indicador de fim, ou também chamado de *end-point indicator*. Tais indicadores vêm ganhando popularidade nos últimos tempos, pois permitiriam avaliar diferentes objetos de acordo com uma mesma visão. Bare *et al.* (2000) explicam que essas tais metodologias avaliam conjuntamente os impactos resultantes da mudança climática, destruição da camada de ozônio, assim como outras categorias tradicionalmente definidas como indicadores *mid-point*.

Acredita-se que o bem estar da sociedade seja o melhor tipo de indicador *end-point* a ser aplicado em avaliações de sustentabilidade. Diferentes vantagens são esperadas do uso desse indicador. Primeiramente, ele reflete as preocupações principais em sustentabilidade. Em segundo lugar, ele é capaz de considerar ao mesmo tempo as três dimensões da sustentabilidade – dimensão ambiental, social e econômica. Finalmente, os indicadores de fim podem ser facilmente comparados e rastreados para identificar e mitigar distorções (JIN; HIGH, 2004). O cálculo de indicadores de fim é um projeto a ser mais desenvolvido futuramente, pois representa uma excelente oportunidade e é capaz de facilitar a comunicação do real significado de sustentabilidade junto aos *stakeholders.*

Uma visão holística durante a construção dos indicadores de sustentabilidade também é salutar. Como já foi dito, deve ser aplicada uma visão ampla na avaliação de sustentabilidade para que as empresas não adotem soluções que transfiram o impacto ambiental para outra parte da cadeia. No entanto, por ser um processo complexo e longo, que envolve algumas ferramentas e bases de dados para o seu cálculo e análise, foi dado ênfase, nesse momento, na construção de indicadores de sustentabilidade restritos aos processos de usinagem. A expansão desse método para um escopo mais amplo surge como um possível desdobramento do trabalho e projeto futuro.

6.7. Elaboração de relatórios de sustentabilidade

Após a avaliação das informações de desempenho da empresa e a sua comparação com as metas traçadas anteriormente, os resultados devem ser comunicados prontamente aos *stakeholders*. Esse procedimento garante o suporte adequado à tarefa de melhoria da sustentabilidade, demonstrando, ainda, o comprometimento e os esforços da empresa nesse processo.

Todos os funcionários devem estar envolvidos na comunicação interna. No caso da comunicação externa, ela envolve clientes, fornecedores, competidores, parceiros, proprietários/*shareholders*, autoridades, comunidade próxima, além do público em geral (ISO 14031, 1999). Uma boa comunicação pode melhorar a aceitação social da empresa e diferenciá-la dos competidores. Outros benefícios aparecem para a parte interna da empresa, como, por exemplo, melhor satisfação dos funcionários.

Schaltegger *et al.* (2002) identificam os indicadores de desempenho como sendo um importante instrumento de gestão da sustentabilidade de empresas, capazes de ajudar na tarefa de elaboração dos relatórios de sustentabilidade. Relatórios de sustentabilidade buscam alcançar a documentação integrada dos vários aspectos do desenvolvimento sustentável, fornecendo dados de desempenho as partes internas e externas interessadas, como parte do objetivo de maior transparência e credibilidade. Ainda de acordo com os autores, os relatórios regulares demonstram integralmente a eficácia das melhorias trazidas pela gestão para o desempenho ambiental, social e econômico.

6.8. Ações visando à melhoria da sustentabilidade

Essa é uma fase crítica para o uso de indicadores de desempenho no processo de avaliação e melhoria da sustentabilidade de uma empresa. Como é explicado por Veleva e Ellenbecker (2001), nessa etapa, a gestão toma medidas corretivas e demonstra que os indicadores de desempenho não são simplesmente um exercício de "relações públicas", mas sim, um processo contínuo de melhoria do desempenho ambiental, social e econômico da organização.

Algumas medidas que as empresas devem tomar incluem a melhoria da qualidade, disponibilidade e confiabilidade dos dados. A revisão da legitimidade dos critérios de desempenho também é uma tarefa importante a ser cumprida. O acompanhamento das ações tomadas pela empresa visando cumprir os critérios de desempenho não pode ser deixado de

lado. Em último lugar, é crucial avaliar a possibilidade de acrescentar ou subtrair indicadores de desempenho na avaliação da sustentabilidade (ISO 14031, 1999).

7. Aplicação do método em análise experimental

O objetivo da análise experimental é aplicar o método proposto para a avaliação da sustentabilidade de processos de manufatura, a partir da investigação de processos de usinagem, mais especificamente, os processos de retificação e torneamento. A seqüência do capítulo obedece ao modelo proposto para a avaliação de sustentabilidade. Inicia-se com a definição dos indicadores de sustentabilidade, partindo para a coleta de dados, até ser realizada a avaliação de desempenho.

Outro objetivo é avaliar o desempenho em sustentabilidade dos processos de retificação e torneamento. Como foi mencionado na seção 4.3, em determinadas faixas de operação, os processos de retificação e torneamento podem concorrer entre si, tornando difícil a decisão sobre qual destas tecnologias é ideal para um dado produto. A escolha sobre a rota tecnológica mais eficiente será viabilizada por meio dos dados apresentados nesse capítulo. As informações colhidas ao longo do desenvolvimento experimental serão usadas para a avaliação da sustentabilidade de tecnologias de usinagem (seção 7.5).

Parte dos dados deve ser obtida de manuais de operação de máquinas e de ferramentas. Outras informações serão obtidas da consulta a especialistas e a bancos de dados de empresas. O conjunto restante das informações deve ser retirado diretamente dos experimentos realizados no laboratório de otimização de processos de fabricação (OPF/EESC/USP).

Foi realizado no dia 29/10/2009 visita a uma empresa do setor de autopeças. Após reunião com o supervisor de produto e processo da empresa, foi possível realizar a coleta de alguns indicadores de desempenho para ambos os processos. Essa empresa utiliza os processos de torneamento e retificação para a produção de válvulas para motores automotivos.

O experimento consiste na usinagem de peças em operação de retificação cilíndrica de mergulho e em operação de torneamento retilíneo cilíndrico externo, em condições pré-definidas de usinagem. Nas próximas seções encontram-se detalhadas a montagem utilizada para a condução dos experimentos, as condições de usinagem, as condições de aquisição e medição dos dados, e, finalmente, o processo de avaliação da sustentabilidade dos processos de retificação e torneamento.

7.1. Banco de ensaios e bases de referência

Os ensaios foram realizados em uma retificadora cilíndrica externa CNC Zema modelo G800 e em torno modelo CNC INDEX GU – 600 (comando Siemens 810 D). As duas máquinas estão representadas na Figura 7.1 e 7.4.

Figura 7.1 – Torno modelo CNC INDEX.

Fonte – Autor.

O banco de ensaios para ambos os processos está detalhado no Quadro 7.1.

Quadro 7.1 – Banco de ensaios utilizados nos experimentos.

Processo	Equipamentos e ferramentas usados
Retificação	– Retificadora cilíndrica externa CNC Zema modelo G800 – Rebolo de Óxido de Alumínio (Al_2O_3) Saint-Gobain código ART 38A60 LVHB – Ferramenta de ponta única para dressagem – Wattímetro Minima ET4050 – Paquímetro – Decibelímetro Modelo DEC-460 Instrutemp
Torneamento	– Torno modelo CNC INDEX GU – 600 (comando Siemens 810 D) – Inserto SNMG 12 04 08-QM H13A Sandvik – Suporte PSDNN 2020K12 – Wattímetro Minima ET4050 – Paquímetro – Decibelímetro Modelo DEC-460 Instrutemp

Fonte – Autor.

7.2. Condições de usinagem

As condições de usinagem para os processos de retificação e torneamento estão representadas no Quadro 7.2 e no Quadro 7.3. Nesse estudo, foi usado o aço SAE 4340 temperado e revenido como corpo de prova, com dureza igual a 50HRc. As peças foram usinadas a partir de uma mesma barra de aço. Adotou-se a rugosidade da peça como

parâmetro de qualidade em ambos os processos. A representação do corpo de prova pode ser vista na Figura 7.2.

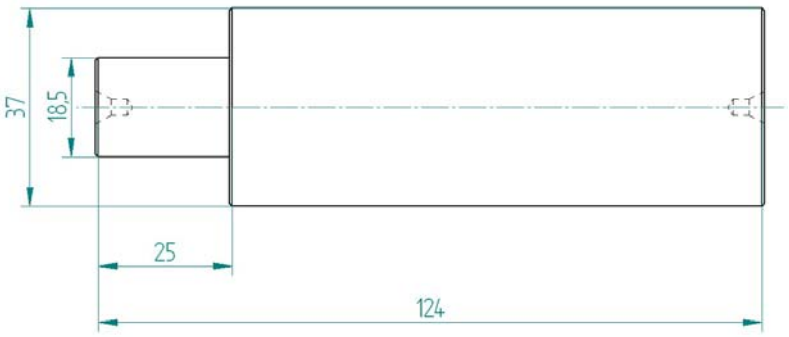


Figura 7.2 – Corpo de prova utilizada nos ensaios.

Fonte – Autor.

O corpo de prova da Figura 7.2 simula a geometria e o material usados na produção de eixos de transmissão para veículos de grande porte.

Logo a seguir são apresentadas as condições de ensaio definidas para o processo de retificação e torneamento. Essas condições de ensaio foram estabelecidas para que as peças produzidas por ambos os processos tenham os mesmos atributos, tornando-os assim, processos substitutos.

- Retificação

  O processo escolhido para ser avaliado é a retificação cilíndrica em mergulho. Como foi mencionado na seção 4.1, o processo de retificação é influenciado por fatores como características do rebolo, condições de dressagem e condições de usinagem. As condições de usinagem definidas para a condução dos experimentos estão descritas no Quadro 7.2.

Quadro 7.2 – Condições de usinagem para o processo de retificação.

Condição	Avanço do rebolo V_f (mm/min)	Sobremetal usinado a_e (mm)	Grau de recobrimento de dressagem (U_d)	Profundidade de dressagem a_d (µm)	Avanço de dressagem (mm/min)	Tempo de *sparkout* t_{so} (s)	Rotação da peça (rpm)	Velocidade de corte (m/seg)
1	0,5	0,25	1	10	228	5	130	30

Fonte – Autor.

- Torneamento

Foi realizada operação de torneamento retilíneo cilíndrico externo de material endurecido (*hard turning*). O Quadro 7.3 mostra as condições de usinagem utilizadas nos ensaios de torneamento. A operação de torneamento foi realizada a seco. Todos os parâmetros de usinagem estão de acordo com o avanço e profundidade de corte recomendados pelo fabricante do inserto.

Quadro 7.3 – Condições de usinagem para o processo de torneamento.

Condição	Velocidade de corte V_c (m/min)	Velocidade de avanço V_f (mm/volta)	Profundidade de corte diametral a_p (mm)	Comprimento de corte (mm)
1	45	0,1	0,25	100

Fonte – Autor.

7.3. Matriz de correlação para seleção dos indicadores de sustentabilidade

O processo de usinagem, por ser um processo que remove material, pode apresentar uma pegada ecológica significativa, como o desperdício de materiais e energia (DAHMUS; GUTOWSKI, 2004). Baniszewski (2005) compartilha a mesma visão, tendo comprovado a baixa eficiência energética do processo após realizar estudo que analisa parcialmente os impactos ambientais originários do processo de retificação na indústria dos EUA. Entre os resultados apresentados, identificou que somente 57% da energia consumida pelas máquinas é usada efetivamente para a remoção de material, além de não serem tratados parte dos resíduos produzidos. Essas conclusões servem para reafirmar a necessidade de serem conduzidas análises amplas durante o processo de avaliação e seleção de tecnologias de usinagem, que incluam além da dimensão econômica, o desempenho ambiental e social.

Esta etapa do desenvolvimento experimental corresponde às fases 1, 2 e 3 do procedimento proposto para medição de desempenho em sustentabilidade. Como consta na seção 6, essas fases tratam de definir o objetivo e o escopo da avaliação. Deverão ser selecionados os principais aspectos de sustentabilidade para depois apontar quais indicadores de desempenho devem ser aplicados. Será utilizado o resultado da análise realizada nas seções 6.2.1 e 6.2.2 para compor a lista de aspectos de sustentabilidade da avaliação.

7.3.1. Processo de retificação

Um diagrama de fluxo de processo para a operação de retificação pode ser visto na Figura 7.3. Como está representado, o processo foi dividido em uma unidade de produção e quatro sistemas auxiliares[30]:

i. Preparação do rebolo;
ii. Coletores de névoa;
iii. Remoção de material (unidade de produção);
iv. Tratamento de fluído de usinagem;
v. Sistema hidráulico da máquina.

Essas unidades apresentam elementos de entrada e de saída característicos. Com base nos dados da Figura 7.3 foi construída a matriz de correlação para a identificação dos indicadores de desempenho em sustentabilidade para o processo de retificação, considerando três grupos distintos de indicadores. Primeiramente, os indicadores de desempenho associados estritamente ao processo de remoção de material. Em seguida, os indicadores para o processo de dressagem. Finalmente, o último grupo, referente aos sistemas auxiliares ii, iv e v do processo de retificação. As diferentes unidades do processo de retificação podem ser visualizadas na Figura 7.4.

[30] Ainda pode existir o processo de limpeza da peça. O processo de limpeza é sempre citado quando se discute impactos ambientais. No entanto, esse processo á altamente dependente do tipo de produto que está sendo feito, dificultando a sua análise (DAHMUS; GUTOWSKI, 2004). Para a presente análise experimental, essa atividade não é necessária para a qualidade da peça, sendo dessa forma eliminada do escopo de avaliação de sustentabilidade.

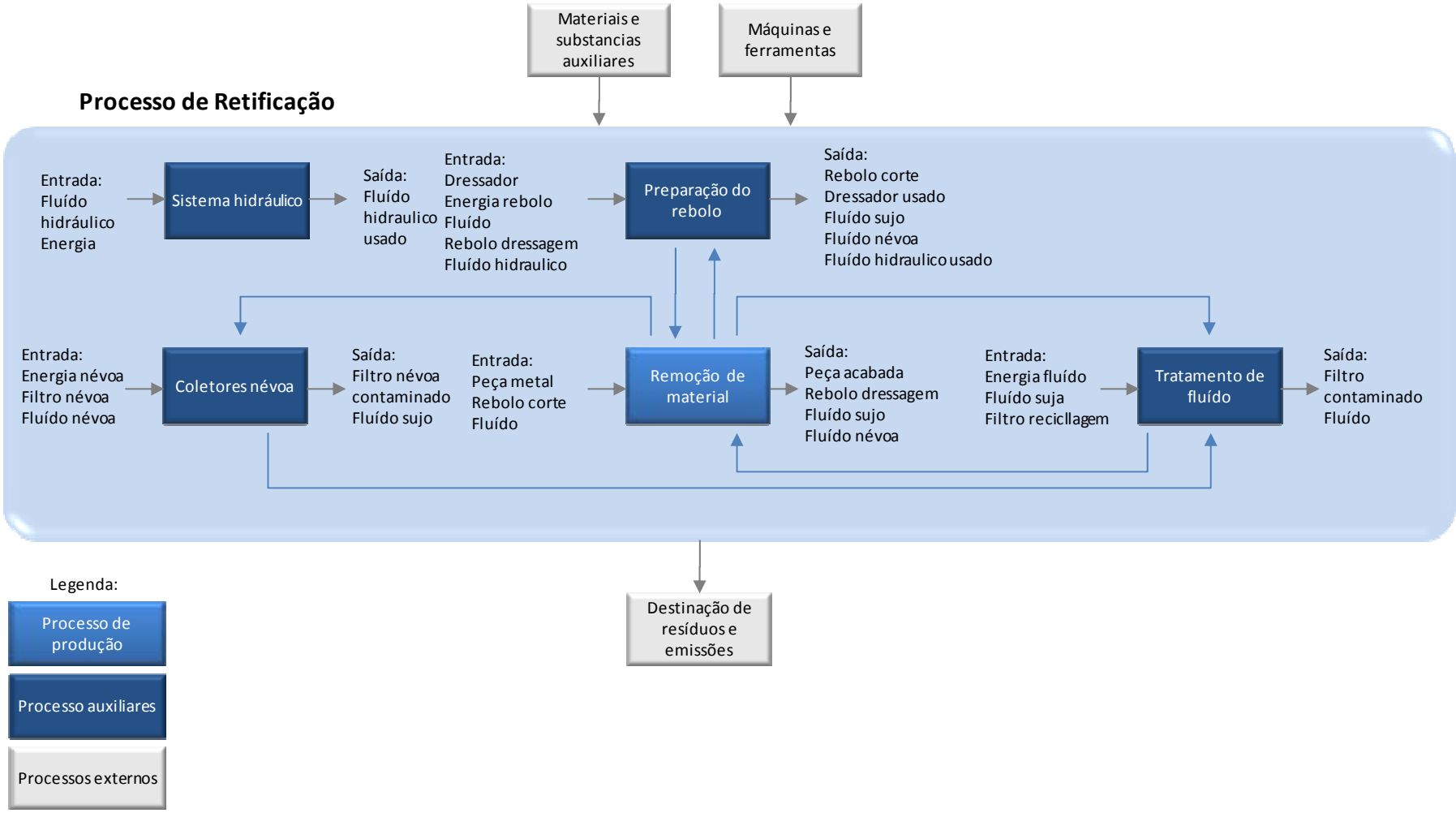
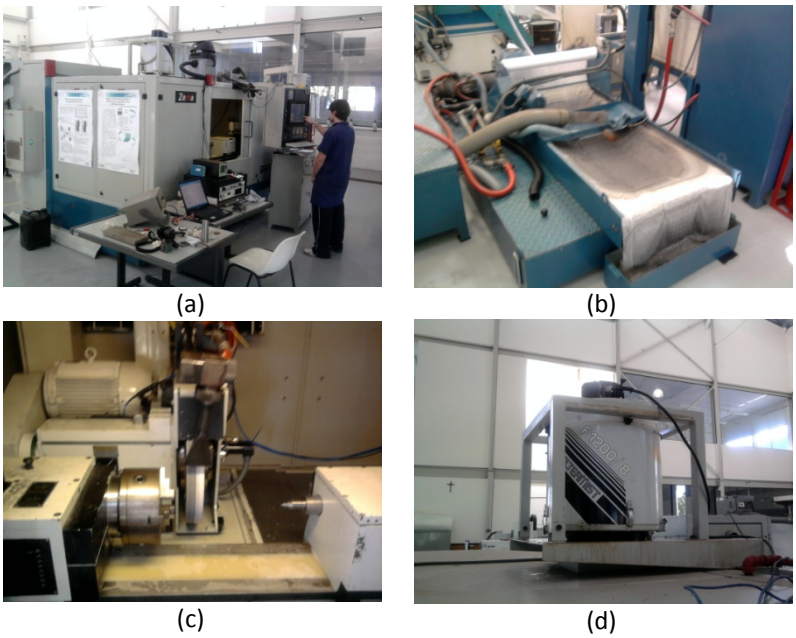


Figura 7.3 – Diagrama de fluxo de produção para o processo de retificação.

Fonte – Autor.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 7.4 – Subsistemas do processo de retificação.

Legenda: a. Máquina de Retificação; b. Tratamento de fluído de corte; c. Sistema para Remoção de Material; d. Coletores de Névoa.

Fonte – Autor.

Considerando cada uma das diferentes unidades do processo de retificação, foram levantadas todas as trocas ambientais existentes no processo (Quadro 7.4).

Quadro 7.4 – Trocas ambientais para o processo de retificação.

	Preparação do rebolo		Tratamento de fluído de corte, coletores de névoa, sistema hidráulico		Remoção de material	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Energia	ENERGIA DRESSAGEM	–	ENERGIA SEM REMOÇÃO DE MATERIAL	–	ENERGIA REMOÇÃO DE MATERIAL	–
Materiais e substâncias auxiliares	DRESSADOR REBOLO SEM CORTE	–	FILTRO NÉVOA FILTRO RECICLAGEM FLUÍDO HIDRÁULICO	–	CORPO DE PROVA REBOLO DRESSADO FLUÍDO DE CORTE	–
Emissões e Resíduos	–	REBOLO DRESSADO	–	FILTRO NÉVOA CONTAMINADO FILTRO RECICLAGEM CONTAMINADO FLUÍDO HIDRÁULICO USADO	–	PEÇA ACABADA REBOLO SEM CORTE FLUÍDO DE CORTE CONTAMINADO

Fonte – Autor.

Depois de conhecidas as trocas ambientais do processo de retificação, foi possível elaborar quadro com todos os indicadores ambientais (Quadro 7.5). Ao todo foram

identificados quatorze indicadores ambientais para cada uma das unidades da máquina que compõem o processo. Lembrando que tais indicadores serão analisados na seção 7.5.

Quadro 7.5 – Matriz de correlação com os indicadores ambientais de retificação.

	Preparação do rebolo	Tratamento de fluído de corte, coletores de névoa, sistema hidráulico	Remoção de material
Energia	1. ENERGIA DRESSAGEM	2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	3. ENERGIA COM REMOÇÃO DE MATERIAL
Materiais e substâncias auxiliares	4. DRESSADOR	5. FILTRO NÉVOA 6. FILTRO RECICLAGEM 7. FLUÍDO HIDRÁULICO	8. REBOLO 9. FLUÍDO DE CORTE
Emissões e Resíduos	–	10. FILTRO NÉVOA CONTAMINADO 11. FILTRO RECICLAGEM CONTAMINADO 12. FLUÍDO HIDRÁULICO USADO	13. REBOLO USADO 14. FLUÍDO DE CORTE USADO

Fonte – Autor.

Antes de passar para a seleção dos indicadores sociais é interessante listar algumas funções dos sistemas auxiliares na máquina de retificação. O sistema para a coleta de névoa, ou *mist collectors*, impede que o operador inale o fluído, ou então, que este seja disperso na atmosfera. Já a unidade de resfriamento existe para manter a integridade e a condição de uso do fluído. Um dos papéis do fluído é absorver o calor gerado, melhorando a superfície da peça e a acuracidade dimensional. Estes fluídos podem ser fabricados a partir de óleo ou água, dependendo da aplicação. Durante a operação da máquina, ocorre progressivamente o acúmulo de cavaco junto ao fluído. Dessa forma, os sistemas de reciclagem tratam de recuperar o fluído de corte, prolongando a sua vida útil (KALPAKJIAN, 2001).

Depois de definidos os indicadores ambientais, agora é a vez de selecionar os indicadores sociais. Os indicadores para a dimensão social estão compreendidos em três aspectos de grande relevância para as empresas: relações trabalhistas; saúde e segurança; treinamento e educação (Quadro 7.6).

Quadro 7.6 – Matriz de correlação com os indicadores sociais de retificação.

	Processo de Retificação
Relações trabalhistas	15. REMUNERAÇÃO POR HORA
Saúde e segurança	16. NÚMERO DE ACIDENTES OCUPACIONAIS 17. NÍVEL DE RUÍDO 18. NÍVEL DE RISCO PARA O OPERADOR
Treinamento e educação	19. NÚMERO MÉDIO DE HORAS DE TREINAMENTO POR FUNCIONÁRIO

Fonte – Autor.

No total, foram identificados cinco indicadores sociais para o processo de retificação. No caso da dimensão econômica, também foi elaborada matriz de correlação, tendo sido escolhidos indicadores para quatro aspectos econômicos: custos de produção; custos associados a garantias e obrigações; retorno sobre investimentos; e por fim, custo de fim-de-vida (Quadro 7.7).

Quadro 7.7 – Matriz de correlação com os indicadores econômicos de retificação.

	Processo de Retificação
Custos de produção	20. CUSTO MÃO-DE-OBRA 21. CUSTO MÁQUINA 22. CUSTO DE FERRAMENTA 23. CUSTO TOTAL DE PRODUÇÃO 24. TEMPO DE PRODUÇÃO
Custos associados a garantias e obrigações	25. CUSTO DE TRATAMENTO DE FLUÍDO DE CORTE 26. CUSTO DE TRATAMENTO DE FLUÍDO HIDRÁULICO 27. CUSTO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS
Retorno sobre investimentos	28. PAYBACK[31]
Custos de fim de vida	29. CUSTO DE RECONDICIONAMENTO DE MÁQUINA

Fonte – Autor.

7.3.2. Processo de torneamento

As entradas e saídas resultantes do processo de torneamento, assim como uma visão integrada de todas as partes que compõem o processo, podem ser vistas na Figura 7.5.

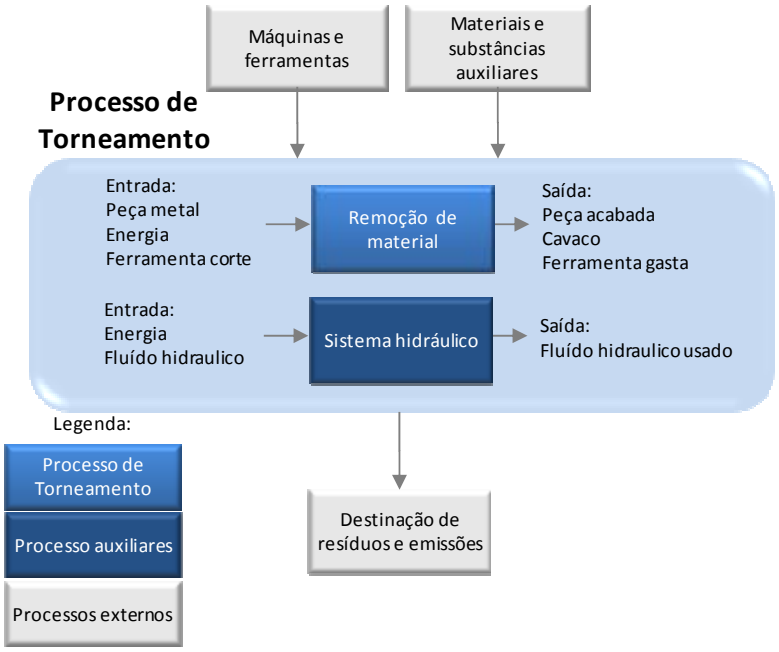


Figura 7.5 – Diagrama de fluxo de produção para o processo de torneamento.

Fonte – Autor.

[31] O indicador utilizado para calcular o tempo envolvido na recuperação do investimento foi o Payback.

Com base no diagrama da Figura 7.5, o próximo passo foi identificar as trocas ambientais existentes para o processo remoção de material e o sistema hidráulico da máquina. Essas informações estão disponíveis no Quadro 7.8.

Quadro 7.8 – Trocas ambientais para o processo de torneamento.

	Remoção de material		Sistema hidráulico	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Energia	ENERGIA COM REMOÇÃO	–	ENERGIA SEM REMOÇÃO	–
Materiais e substâncias auxiliares	FERRAMENTA CORTE	–	FLUÍDO HIDRAULICO	–
Emissões e Resíduos	–	PEÇA ACABADA FERRAMENTA GASTA	–	FLUÍDO HIDRAULICO USADO

Fonte – Autor.

Todas as entradas e saídas que compõem o processo de torneamento serviram de base para a construção da matriz de correlação com os indicadores ambientais. Foram selecionados no total seis indicadores ambientais (Quadro 7.9).

Quadro 7.9 – Matriz de correlação com os indicadores ambientais de torneamento.

	Remoção de material	Sistema hidráulico
Energia	1. ENERGIA COM REMOÇÃO DE MATERIAL	2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
Materiais e substâncias auxiliares	3. FERRAMENTA CORTE	4. FLUÍDO HIDRÁULICO
Emissões e Resíduos	5. FERRAMENTA USADA	6. FLUÍDO HIDRAULICO USADO

Fonte – Autor.

Analisando agora a dimensão social, foram identificados com o auxílio da matriz de correlação cinco indicadores sociais relevantes para o processo de torneamento (Quadro 7.10).

Quadro 7.10 – Matriz de correlação com os indicadores sociais de torneamento.

	Processo de Torneamento
Relações trabalhistas	7. REMUNERAÇÃO POR HORA
Saúde e segurança	8. NÚMERO DE ACIDENTES OCUPACIONAIS 9. NÍVEL DE RUÍDO 10. NÍVEL DE RISCO PARA OPERADOR
Treinamento e educação	11. NÚMERO MÉDIO DE HORAS DE TREINAMENTO POR FUNCIONÁRIO

Fonte – Autor.

Em último lugar, foram identificados os indicadores econômicos para o processo de torneamento (Quadro 7.11).

Quadro 7.11 – Matriz de correlação com os indicadores econômicos de torneamento.

	Processo de Torneamento
Custos de produção	12. CUSTO MÃO-DE-OBRA 13. CUSTO MÁQUINA 14. CUSTO DE FERRAMENTA 15. CUSTO DE PRODUÇÃO 16. TEMPO DE PRODUÇÃO
Custos associados a garantias e obrigações	17. CUSTO DE TRATAMENTO DE FLUÍDO HIDRÁULICO 18. CUSTO DE TRATAMENTO DE FERRAMENTA DE CORTE
Retorno sobre investimentos	19. PAYBACK
Custos de fim de vida	20. CUSTO DE RECONDICIONAMENTO DE MÁQUINA

Fonte – Autor.

Ao ser feita uma comparação entre a quantidade de possíveis indicadores de sustentabilidade identificados para ambos os processos, verifica-se que a quantidade de indicadores para o processo de retificação superou o processo de torneamento, somando trinta contra vinte indicadores, respectivamente.

7.4. Coleta de dados para os processos de retificação e torneamento

Essa seção do desenvolvimento experimental corresponde à fase 5 do procedimento proposto para a medição de desempenho em sustentabilidade[32]. O processo de coleta de dados foi realizado de acordo com diferentes fontes de referência, i.e., bases de dados eletrônicas, dados de literatura, dados não publicados, e por fim, medições e/ou cálculos. Os dados podem, ainda, apresentar características distintas. Podem ser mensurados tendo em vista o próprio processo, como também podem ser extrapolados de outros processos. Outra opção viável é estimar os dados de desempenho na ausência de fontes de informação confiáveis. Logo a seguir está estruturado o processo de coleta de dados para ambos os processos de usinagem, retificação e torneamento.

[32] Como comentado na seção 6.4, "quando não existem dados prévios sobre o nível de desempenho, as empresas fazem a opção de, inicialmente, não formular metas de desempenho". Dessa forma, na avaliação de sustentabilidade dos processos de usinagem, não foram definidas metas de desempenho dentro do objetivo do trabalho, sendo desconsiderada nesse contexto, a fase quatro do procedimento proposto para medição de desempenho em sustentabilidade.

7.4.1. Processo de retificação

Os dados coletados para o processo de retificação estão estruturados de acordo com as diferentes dimensões da sustentabilidade.

7.4.1.1. Dimensão ambiental

Os indicadores ambientais foram obtidos em sua maioria de estimativas fornecidas por fabricantes de ferramentas e máquinas ou obtidas no laboratório OPF (EESC). Os indicadores de energia foram obtidos diretamente das máquinas por meio de equipamento de leitura de potência, ou wattímetro. As fontes para obtenção de dados estão detalhadas no Quadro 7.12.

Quadro 7.12 – Indicadores ambientais de retificação e fontes para obtenção de dados.

Aspectos	Indicador	Caracterização dos dados	Tipo de referência
ENERGIA	1. ENERGIA DRESSAGEM	[1]	[D]
	2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	[1]	[D]
	3. ENERGIA COM REMOÇÃO DE MATERIAL	[1]	[D]
ÁGUA, MATERIAIS E SUBSTÂNCIAS AUXILIARES	4. DRESSADOR	[5]	[C]
	5. FILTRO NÉVOA	[5]	[C]
	6. FILTRO RECICLAGEM	[1]	[D]
	7. FLUÍDO HIDRÁULICO	[5]	[C]
	8. REBOLO	[5]	[D]
	9. FLUÍDO DE CORTE	[5]	[C]
EMISSÕES, EFLUENTES E RESÍDUOS	10. FILTRO NÉVOA CONTAMINADO	[5]	[C]
	11. FILTRO RECICLAGEM CONTAMINADO	[1]	[D]
	12. FLUÍDO HIDRÁULICO USADO	[5]	[C]
	13. REBOLO USADO	[5]	[D]
	14. FLUÍDO DE CORTE USADO	[5]	[C]

Legenda:

Caracterização dos dados: [1] Medições envolvendo o atual produto/processo; [2] Cálculos envolvendo o produto/processo; [3] Extrapolação de dados provenientes dos mesmos processos ou tecnologias; [4] Extrapolação de dados provenientes de outros processos ou tecnologias; [5] Estimativa.

Tipos de referência: [A] Bases de dados eletrônicas; [B] Dados de literatura (artigos científicos, relatórios públicos, análises ACV); [C] Dados não publicados (empresas, laboratórios, autoridades, outros); [D] Medições e/ou cálculos.

Fonte – Autor.

No Quadro 7.13, estão os dados de desempenho coletados diretamente do processo de retificação ou a partir de outras fontes de referência. Todas as medidas foram obtidas levando-se em conta a produção de uma unidade do corpo de prova, segundo padrões de qualidade e desempenho previamente definidos para a peça. A composição química para os materiais também foi identificada quando possível.

Quadro 7.13 – Valores de desempenho para os indicadores ambientais de retificação.

Indicadores	Unidade	Quantidade
Energia		
1. Medida de energia durante a dressagem	kWh por Peça	0,0009
2. Eficiência energética	%	35%
3. Medida de energia a) Com remoção de material b) Sem remoção de material	kWh por Peça	a) 0,3536 b) 0,0459
Água, materiais e substâncias auxiliares		
4. Dressador Dressador de ponta única com diamante natural para rebolo de 500mm de diâmetro. Peso igual a 1 quilate (200 mg).	Peso por Peça	3,98E-07
5. Filtro névoa Para 1000 horas de operação♣ Empresa Filtermist FX4000, Modelo 3008PAD Poliuretano tratado ($C_{25}H_{42}N_2O_6$)	Gramas por Peça	0,003794
6. Filtro reciclagem Tecido de polipropileno. Consumo de 5mm de tecido por peça. Empresa ACETEC i. C_3H_6	m^2 por Peça	0,109700
7. Fluído hidráulico – Tipo RANDO HD ISO 32 Texaco Óleo mineral derivado do petróleo e aditivos (elementos como propriedade industrial) Densidade de 0,08807 kg/ litro (a 20º C) Para 2200 horas de operação ou 1 ano de prazo♥	Litros por Peça	0,001568
8. Rebolo – Norton 38A60 LVHB Peso do Rebolo igual a 30 kg. Óxido de Alumínio Branco i. Al_2O_3	Gramas por Peça	0,059700
9. Fluído de corte - tipo BIO G 1004, 3 a 5% em água♦ Densidade de 1,06 kg/ litro (a 20º C). Para seis meses de uso ou 2200 horas de operação Composição da mistura (% em peso como propriedade industrial): i. 2,2',2"-nitrilotrietanol ii. 2-hidroxietilamina (C_2H_7NO) iii. Amida borada iv. 1,3,5-hexahidrotriazina-1,3,5-trietanol	Litros por Peça	0,005226
Emissões, efluentes e resíduos		
10. Filtro névoa contaminado	Gramas por Peça	0,015200
11. Filtro reciclagem contaminado	Gramas por Peça	0,362000
12. Fluído hidráulico usado	Litros por Peça	0,001570
13. Rebolo usado	Gramas por Peça	0,029250
14. Fluído de corte usado	Litros por Peça	0,005230

Fonte: ♣Manual de instalação do produto fornecido por Rollmatic Ltda, ♦MICRO-QUÍMICA, 2008 (Ficha de informação de segurança de produtos químicos), ♥Manual ZEMA G800, ♠Consulta a empresa Neboluz, Autor.

A medida de eficiência energética foi obtida do consumo de energia da máquina com remoção de material e sem remoção de material, bastando realizar a razão de ambos os valores.

7.4.1.2. Dimensão social

Os dados de desempenho para a dimensão social foram coletados a partir de dados de literatura, dados de empresa, ou ainda, de cálculos e medições (Quadro 7.14).

Quadro 7.14 – Indicadores sociais de retificação e fontes para obtenção de dados.

Aspectos	Indicador	Caracterização dos dados	Tipo de referência
RELAÇÕES TRABALHISTAS	15. REMUNERAÇÃO POR HORA	[5]	[A]
SAÚDE E SEGURANÇA	16. NÚMERO DE ACIDENTES OCUPACIONAIS	[5]	[B]
	17. NÍVEL DE RUÍDO	[1]	[D]
	18. NÍVEL DE RISCO PARA OPERADOR	[2]	[D]
TREINAMENTO E EDUCAÇÃO	19. HORAS DE TREINAMENTO POR FUNCIONÁRIO	[3]	[A]

Legenda:

Caracterização dos dados: [1] Medições envolvendo o atual produto/processo; [2] Cálculos envolvendo o produto/processo; [3] Extrapolação de dados provenientes dos mesmos processos ou tecnologias; [4] Extrapolação de dados provenientes de outros processos ou tecnologias; [5] Estimativa.

Tipos de referência: [A] Bases de dados eletrônicas; [B] Dados de literatura (artigos científicos, relatórios públicos, análises ACV); [C] Dados não publicados (empresas, laboratórios, autoridades, outros); [D] Medições e/ou cálculos.

Fonte – Autor.

Diferentemente da dimensão ambiental, os dados obtidos para a dimensão social não estão referenciados de acordo com a produção de uma única peça. As unidades dos diferentes indicadores sociais estão definidas de acordo com a literatura especializada (Quadro 7.15).

Quadro 7.15 – Valores de desempenho para os indicadores sociais de retificação.

Indicadores	Unidade	Quantidade
Relações trabalhistas		
15. Remuneração por hora♣ Salário médio igual a R$1.617,00	R$/h	10,11
Saúde e segurança		
16. Número de acidentes ocupacionais♥	No. acidentes por h de trabalho	0,094
17. Nível de ruído	dB	75,1
18. Nível de risco para operador	Índice de risco (veja na seção 7.5)	-
Treinamento e educação		
19. Número médio de horas de treinamento♦	Horas	120

Fonte: ♥GARDNER *et al.*, 1999, ♦SENAI, 2009, ♣DATAFOLHA, 2007, Autor.

7.4.1.3. Dimensão econômica

A dimensão econômica conta com medidas de desempenho financeiras e também medidas associadas a custos de tratamento de efluentes e resíduos (Quadro 7.16).

Quadro 7.16 – Indicadores econômicos de retificação e fontes para obtenção de dados.

Aspectos	Indicador	Caracterização dos dados	Tipo de referência
CUSTOS DE PRODUÇÃO	20. CUSTO MÃO-DE-OBRA	[2]	[C]
	21. CUSTO MÁQUINA	[2]	[C]
	22. CUSTO DE FERRAMENTA	[2]	[C]
	23. CUSTO TOTAL DE PRODUÇÃO	[2]	[D]
	24. TEMPO DE PRODUÇÃO	[1]	[D]
CUSTOS ASSOCIADOS A GARANTIAS E OBRIGAÇÕES	25. CUSTO DE TRATAMENTO DE FLUÍDO DE CORTE	[3]	[C]
	26. CUSTO DE TRATAMENTO DE FLUÍDO HIDRÁULICO	[3]	[C]
	27. CUSTO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS	[3]	[C]
RETORNO SOBRE INVESTIMENTOS	28. PAYBACK	[2]	[A]
CUSTOS DE FIM DE VIDA	29. CUSTO DE RECONDICIONAMENTO DE MÁQUINA	[5]	[C]

Legenda:

Caracterização dos dados: [1] Medições envolvendo o atual produto/processo; [2] Cálculos envolvendo o produto/processo; [3] Extrapolação de dados provenientes dos mesmos processos ou tecnologias; [4] Extrapolação de dados provenientes de outros processos ou tecnologias; [5] Estimativa.

Tipos de referência: [A] Bases de dados eletrônicas; [B] Dados de literatura (artigos científicos, relatórios públicos, análises ACV); [C] Dados não publicados (empresas, laboratórios, autoridades, outros); [D] Medições e/ou cálculos.

Fonte – Autor.

Depois de definidas as fontes de referência para os dados de desempenho o próximo passo foi realizar os cálculos necessários para encontrar o custo de produção para o corpo de prova (Quadro 7.17).

Quadro 7.17 – Valores de desempenho para os indicadores econômicos de retificação.

Indicadores	Unidade	Valor
Custos de produção		
20. Custo mão-de-obra	R$ por Peça	0,291
21. Custo máquina (2 turnos diários/16 horas) a) Custo de energia b) Custo de manutenção c) Custo de depreciação (linear em 10 anos)	R$ por Peça	a) 0,120 b) 0,014 c) 0,676
22. Custo de ferramenta a) Custo do rebolo b) Custo do dressador	R$ por Peça	a) 0,002 b) 0,002
23. Custo total de produção	R$ por Peça	1,051
24. Tempo de produção a) Tempo com remoção de material b) Tempo sem remoção de material (20% ociosa) c) Tempo de dressagem	Segundos por Peça	a) 86,0 b) 17,2 c) 0,28
Custos associados a garantias e obrigações		
25. Custo de tratamento de fluído de corte♦	R$ por Litro	0,40
26. Custo de tratamento de fluído hidráulico♥	R$ por Litro	-0,30
27. Custo de tratamento de resíduos (rebolo)♠	R$ por kg	-0,06
Retorno sobre investimentos		
28. Payback♣ Valor de uma máquina G800 nova igual a R$ 900.000,00	Anos	3
Custos de fim de vida		
29. Custo de recondicionamento de máquina♣	R$	600.000,00

Fonte: ♥Brazão Lubrificantes Ltda (Nota Fiscal N°1387), ♦Orçamento junto a Brazão Lubrificantes Ltda, ♣Orçamento junto ao fabricante Zema, ♠Visita a TRW automotive, Autor.

7.4.2. Processo de torneamento

O mesmo procedimento foi realizado para o processo de torneamento, estando os dados coletados também separados de acordo com as dimensões da sustentabilidade.

7.4.2.1. Dimensão ambiental

A quantidade de indicadores ambientais para o processo de torneamento é inferior ao processo de retificação. Como pode ser visto no Quadro 7.18, parte dos indicadores foi obtida de medições diretas e a outra parte de estimativas obtidas a partir de fabricantes de máquinas e ferramentas. Os dados de desempenho referem-se a produção de um único corpo de prova.

Quadro 7.18 – Indicadores ambientais de torneamento e fontes para obtenção de dados.

Aspectos	Indicador	Caracterização dos dados	Tipo de referência
ENERGIA	1. ENERGIA COM REMOÇÃO DE MATERIAL	[1]	[D]
	2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	[1]	[D]
ÁGUA, MATERIAIS E SUBSTÂNCIAS AUXILIARES	3. FERRAMENTA CORTE	[5]	[C]
	4. FLUÍDO HIDRÁULICO	[5]	[C]
EMISSÕES, EFLUENTES E RESÍDUOS	5. FERRAMENTA USADA	[5]	[D]
	6. FLUÍDO HIDRÁULICO USADO	[5]	[C]

Legenda:

Caracterização dos dados: [1] Medições envolvendo o atual produto/processo; [2] Cálculos envolvendo o produto/processo; [3] Extrapolação de dados provenientes dos mesmos processos ou tecnologias; [4] Extrapolação de dados provenientes de outros processos ou tecnologias; [5] Estimativa.

Tipos de referência: [A] Bases de dados eletrônicas; [B] Dados de literatura (artigos científicos, relatórios públicos, análises ACV); [C] Dados não publicados (empresas, laboratórios, autoridades, outros); [D] Medições e/ou cálculos.

Fonte – Autor.

Os indicadores ambientais coletados estão listados no Quadro 7.19.

Quadro 7.19 – Valores de desempenho para os indicadores ambientais de torneamento.

Indicadores	Unidade	Quantidade
Energia		
1. Medida de energia a) Com remoção de material b) Sem remoção de material	kWh	 a) 0,0818 b) 0,0095
2. Eficiência energética	%	42%
Água, materiais e substâncias auxiliares		
3. Ferramenta corte: Composição da mistura (% em peso é propriedade industrial)♣: a. Carboneto de Tungstênio – WC b. Cobalto – Co c. Carbonetos de Titânio – CH_4Ti d. Carboneto do tântalo – TaC e. Carbeto de nióbio – NbC	Unidade por Peça	0,043100
4. Fluído hidráulico – Tipo RANDO HD ISO 68 Texaco♠ Densidade de 0,8786 kg/ litro (a 20º C)	Litros por Peça	0,001550
Emissões, efluentes e resíduos		
5. Ferramenta usada	Gramas por Peça	0,409450
6. Fluído hidráulico usado (Descartar após 5000 horas de trabalho)	Litros por Peça	0,001550

Fonte: ♣SANDVIK, 2007; ♠INDEX, 1997, Autor.

7.4.2.2. Dimensão social

Para a dimensão social, os dados foram obtidos a partir de fontes de dados semelhantes ao processo de retificação (Quadro 7.20).

Quadro 7.20 – Indicadores sociais de torneamento e fontes para obtenção de dados.

Aspectos	Indicador	Caracterização dos dados	Tipo de referência
RELAÇÕES TRABALHISTAS	7. REMUNERAÇÃO POR HORA	[5]	[A]
SAÚDE E SEGURANÇA	8. NÚMERO DE ACIDENTES OCUPACIONAIS	[5]	[B]
	9. NÍVEL DE RUÍDO	[1]	[D]
	10. NÍVEL DE RISCO PARA OPERADOR	[2]	[D]
TREINAMENTO E EDUCAÇÃO	11. HORAS DE TREINAMENTO POR FUNCIONÁRIO	[5]	[A]

Legenda:

Caracterização dos dados: [1] Medições envolvendo o atual produto/processo; [2] Cálculos envolvendo o produto/processo; [3] Extrapolação de dados provenientes dos mesmos processos ou tecnologias; [4] Extrapolação de dados provenientes de outros processos ou tecnologias; [5] Estimativa.

Tipos de referência: [A] Bases de dados eletrônicas; [B] Dados de literatura (artigos científicos, relatórios públicos, análises ACV); [C] Dados não publicados (empresas, laboratórios, autoridades, outros); [D] Medições e/ou cálculos.

Fonte – Autor.

No Quadro 7.21 estão representados os dados de desempenho encontrados para esse tipo de processo de manufatura.

Quadro 7.21 – Valores de desempenho para os indicadores sociais de torneamento.

Indicadores	Unidade	Quantidade
Relações trabalhistas		
7. Remuneração por hora♦ Salário médio igual a R$1.347,00	R$/h	8,42
Saúde e segurança		
8. Número de acidentes ocupacionais♥[33]	No. acidentes por h de trabalho	0,065
9. Nível de ruído	dB	68,5
10. Nível de risco para operador	Índice de risco (veja na seção 7.5)	-
Treinamento e educação		
11. Número médio de horas de treinamento♣	Horas	120

Fonte: ♥GARDNER *et al.*, 1999, ♣SENAI, 2009, ♦DATAFOLHA, 2007, Autor.

7.4.2.3. Dimensão econômica

O último grupo de dados a ser coletado corresponde a dimensão econômica. As fontes de dados usadas para a coleta de dados estão representadas no Quadro 7.22.

[33] O indicador de número de acidentes foi contabilizado levando em conta as seguintes ocorrências: lesões abertas, amputação, contusão, choque, fratura, traumatismo intracraniano, medula espinhal, estirpes e entorses, queimaduras, e, por fim, em caso extremo, morte (GARDNER, D. *et al.*, 1999, p.4).

Quadro 7.22 – Indicadores econômicos de torneamento e fontes para obtenção de dados.

Aspectos	Indicador	Caracterização dos dados	Tipo de referência
CUSTOS DE PRODUÇÃO	12. CUSTO MÃO-DE-OBRA	[2]	[C]
	13. CUSTO MÁQUINA	[2]	[C]
	14. CUSTO DE FERRAMENTA	[2]	[C]
	15. CUSTO TOTAL DE PRODUÇÃO	[2]	[D]
	16. TEMPO DE PRODUÇÃO	[1]	[D]
CUSTOS ASSOCIADOS A GARANTIAS E OBRIGAÇÕES	17. CUSTO DE TRATAMENTO DE FLUÍDO HIDRÁULICO	[3]	[C]
	18. CUSTO DE TRATAMENTO DE FERRAMENTA DE CORTE	[2]	[C]
RETORNO SOBRE INVESTIMENTOS	19. PAYBACK	[5]	[A]
CUSTOS DE FIM DE VIDA	20. CUSTO DE RECONDICIONAMENTO DE MÁQUINA	[5]	[C]

Legenda:

Caracterização dos dados: [1] Medições envolvendo o atual produto/processo; [2] Cálculos envolvendo o produto/processo; [3] Extrapolação de dados provenientes dos mesmos processos ou tecnologias; [4] Extrapolação de dados provenientes de outros processos ou tecnologias; [5] Estimativa.

Tipos de referência: [A] Bases de dados eletrônicas; [B] Dados de literatura (artigos científicos, relatórios públicos, análises ACV); [C] Dados não publicados (empresas, laboratórios, autoridades, outros); [D] Medições e/ou cálculos.

Fonte – Autor.

A composição do quadro de indicadores econômicos foi realizada considerando-se como uma unidade do corpo de prova como valor de referência.

Quadro 7.23 – Valores de desempenho para os indicadores econômicos de torneamento.

Indicadores	Unidade	Quantidade
Custos de produção		
12. Custo mão-de-obra	R$ por Peça	0,435
13. Custo máquina (2 turnos diários/16 horas) a) Custo de energia b) Custo de manutenção c) Depreciação (linear em 10 anos)	R$ por Peça	a) 0,027 b) 0,014 c) 0,540
14. Custo de ferramenta[34]	R$ por Peça	1,380
15. Custo total de produção	R$ por Peça	2,347
16. Tempo de produção a) Tempo com remoção de material b) Tempo sem remoção de material (20% ociosa)	Segundos por Peça	a) 155 b) 31
Custos associados a garantias e obrigações		
17. Custo de tratamento de fluído hidráulico♥	R$ por Litro	-0,3
18. Custo de tratamento de ferramenta de corte♠	R$ por Kg	-14,00
Retorno sobre investimentos		
19. Payback Valor de uma máquina nova igual a R$ 400.000,00♦. Fora alguns acessórios como Luneta, Suporte, Porta automática, Exaustor de névoa, etc.	Anos	5
Custos de fim de vida		
20. Custo de recondicionamento de máquina♦	R$	240.000,00

Fonte: ♠Sandvik Coromant, ♦Orçamento junto a fabricante Index, ♥Brazão Lubrificantes Ltda (Nota Fiscal Nº1387), Autor.

[34] Calculado a partir de dado de fabricante. Uma ferramenta de corte apresenta quatro arestas, sendo que cada uma dura um tempo mínimo de 15 minutos. Cada ferramenta custa R$ 32,00 e produz um total de 32 peças (SANDVIK COROMANT, 2007).

7.5. Avaliação do desempenho em sustentabilidade

A avaliação do desempenho em sustentabilidade atende a fase 6 do método proposto. Essa etapa do método foi desdobrada em duas partes complementares, a primeira, correspondendo a análises dos indicadores de entrada, e a segunda, relativa a produção de indicadores agregados para as três dimensões do *triple bottom line*. A última seção aborda as medidas de potencial de impacto ou indicadores de meio.

7.5.1. Análise dos indicadores de sustentabilidade

Como foi visto acima, os indicadores de desempenho em sustentabilidade foram obtidos de bases de dados eletrônicas, dados de literatura (artigos científicos, relatórios públicos, análises ACV), dados não publicados (empresas, laboratórios, autoridades, outros), ou então, medições e/ou cálculos. Os indicadores foram agrupados ao todo em dez parâmetros de controle, que atendem a todos os treze aspectos de desempenho em sustentabilidade sugeridos como de alta prioridade (seção 6.2.3). Esses dados são resultados de cálculos, medições, extrapolações ou estimativas.

Todos os dados foram referenciados para a produção de uma peça com especificação e critérios de qualidade previamente estabelecidos. A seguir estão os dados de desempenho para ambos os processos. Indicadores de entrada e de meio compõem o quadro de indicadores de sustentabilidade.

7.5.1.1. Energia

O consumo de energia foi obtido para duas situações distintas de operação de ambas as máquinas. Os indicadores de energia referem-se aos gastos incorridos durante a operação de remoção de material da peça pela ferramenta de corte e também, para os gastos de energia sem remoção de material. Quando não existe remoção de material, energia continua a ser gasta para manter sistemas auxiliares das máquinas, como por exemplo, o sistema hidráulico ou o sistema de resfriamento para o fluído de corte no processo de retificação. A seguir, no Quadro 7.24, estão representados as medidas de consumo de energia obtidas no laboratório de Otimização de Processos de Fabricação. O consumo de energia do processo de retificação acabou sendo várias vezes superiores ao do processo de torneamento.

Quadro 7.24 – Indicadores de consumo de energia em kWh.

	Torneamento	Retificação
Energia com remoção de material	0,0818	0,3536
Energia sem remoção de material	0,0095	0,0459
Energia durante dressagem		0,0009
Energia consumida	0,0913	0,4003

Fonte – Autor.

Outro indicador relevante pode ser obtido das medidas de consumo de energia, considerando o quanto foi gasto efetivamente para a remoção de material. Foi calculado um índice de eficiência energética para ambos os processos. Como está representado na Figura 7.6, o processo de Torneamento, além de ter um menor consumo de energia, também apresenta uma eficiência energética superior ao processo de Retificação.

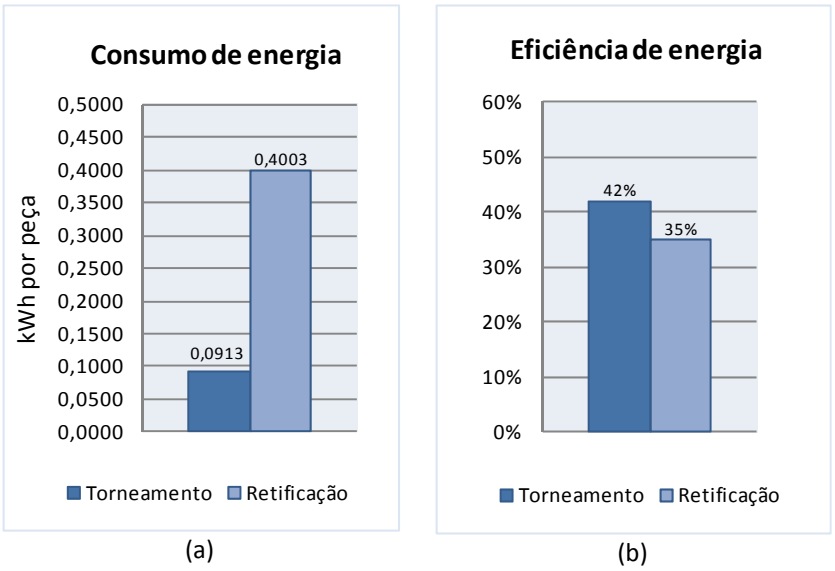


Figura 7.6 – Representação gráfica para os indicadores de consumo de energia.

Legenda: a. Consumo de Energia; b. Eficiência Energética.

Fonte – Autor.

7.5.1.2. Materiais e substâncias auxiliares

O consumo de recursos é diferente em caráter e em quantidade para ambos os processos. Em resumo, o processo de retificação necessita de mais materiais e substâncias auxiliares para produzir a mesma quantidade de peças que o processo de torneamento. O consumo do processo de retificação é três vezes maior do que o processo de torneamento. Vários materiais consumidos pelo processo de retificação não foram necessários para o processo de torneamento, como é o caso do fluído de corte. Todos os indicadores de consumo de materiais estão representados graficamente na Figura 7.7.

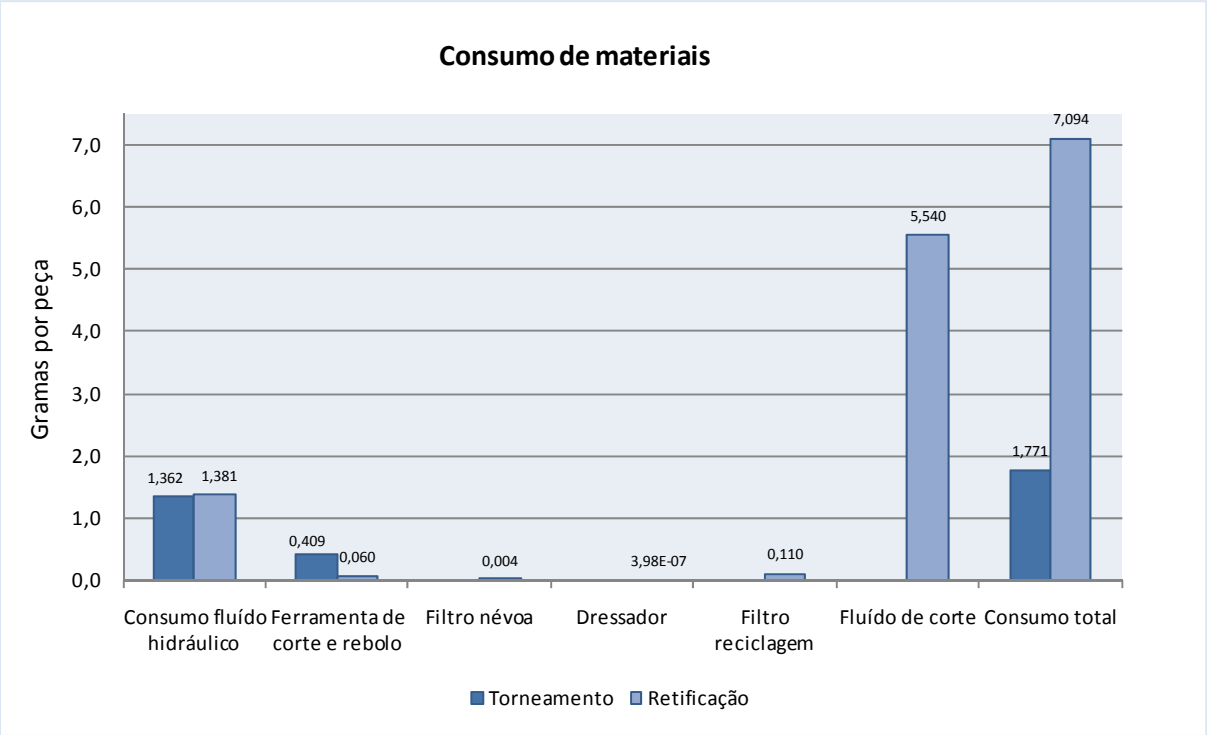


Figura 7.7 – Representação gráfica para os indicadores de consumo de materiais.

Fonte – Autor.

7.5.1.3. Emissões, efluentes e resíduos

O processo de retificação também apresenta valores superiores para os indicadores de emissões, efluentes e resíduos (Figura 7.8).

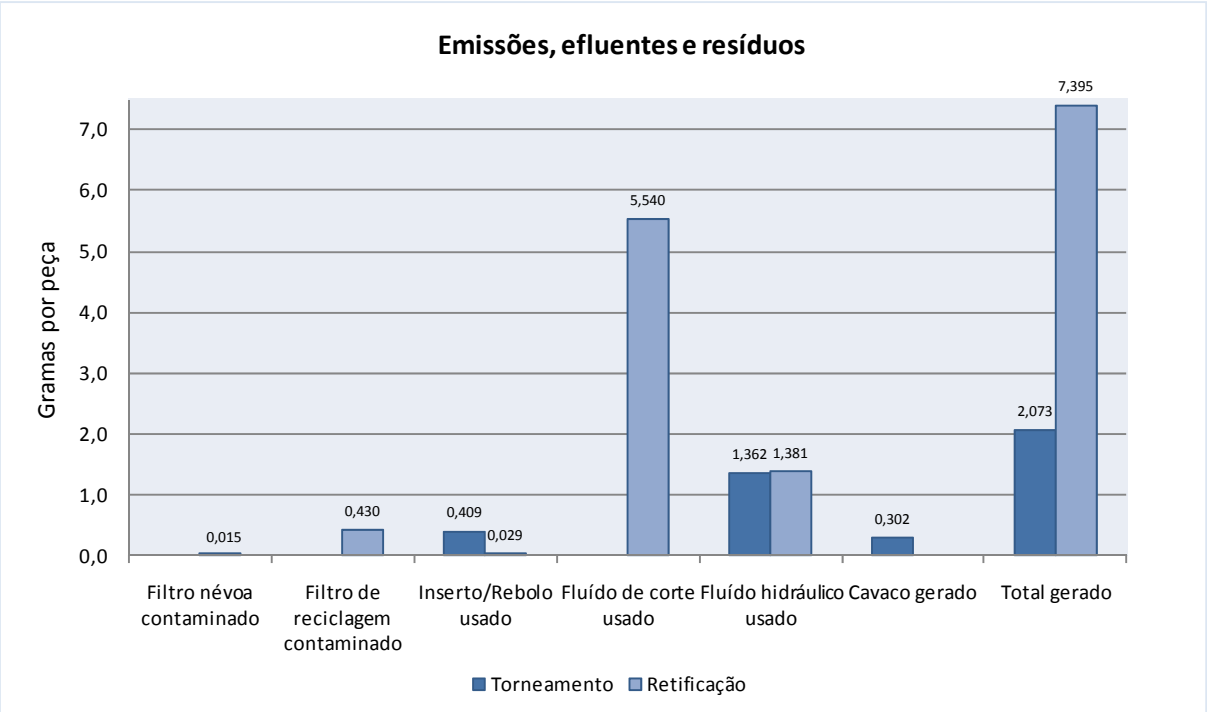


Figura 7.8 – Representação gráfica de emissões, efluentes e resíduos.

Fonte – Autor.

Como está representado na Figura 7.8, o resíduo originário de insertos usados é superior a quantidade gerada pelos rebolos usados do processo de retificação. Mesmo assim, os indicadores de saída do processo de torneamento são mais favoráveis, visto que correspondem somente a 28% do total do processo de retificação. O processo de retificação também gera cavaco durante o processamento, contudo esse material não pode ser reaproveitado.

7.5.1.4. Relações trabalhistas

Após a análise dos indicadores ambientais, foi iniciada a avaliação das medidas sociais. O primeiro indicador corresponde ao valor médio de remuneração por hora para ambos os processos. Os valores encontrados basearam-se em pesquisa realizada pelo Datafolha (2007), que considera a variação salarial para compor um valor médio por profissão ou ocupação. Os valores de remuneração por hora foram 20,1% superiores para o processo de retificação, estando representados graficamente na Figura 7.13.

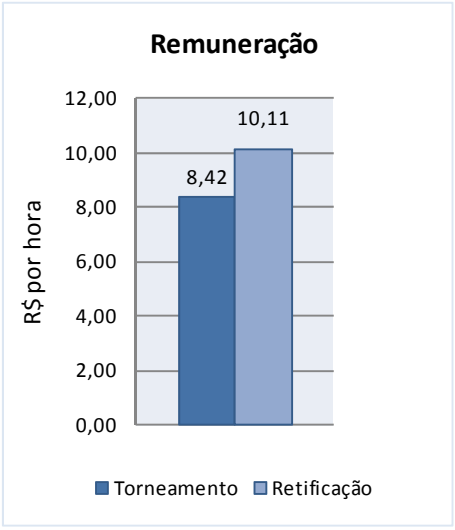


Figura 7.9 – Representação gráfica da remuneração por hora.

Fonte – Autor.

7.5.1.5. Saúde e segurança

Um grupo importante de indicadores sociais é aquele relacionado a saúde e segurança do funcionário. Entre as diferentes medidas existentes, foram selecionadas três indicadores principais. A primeira medida refere-se a quantidade de acidentes por tipo de processo. Em

seguida, existe a medida de ruído e outra para avaliar riscos durante o trabalho. Os valores de desempenho estão presentes na Figura 7.10.

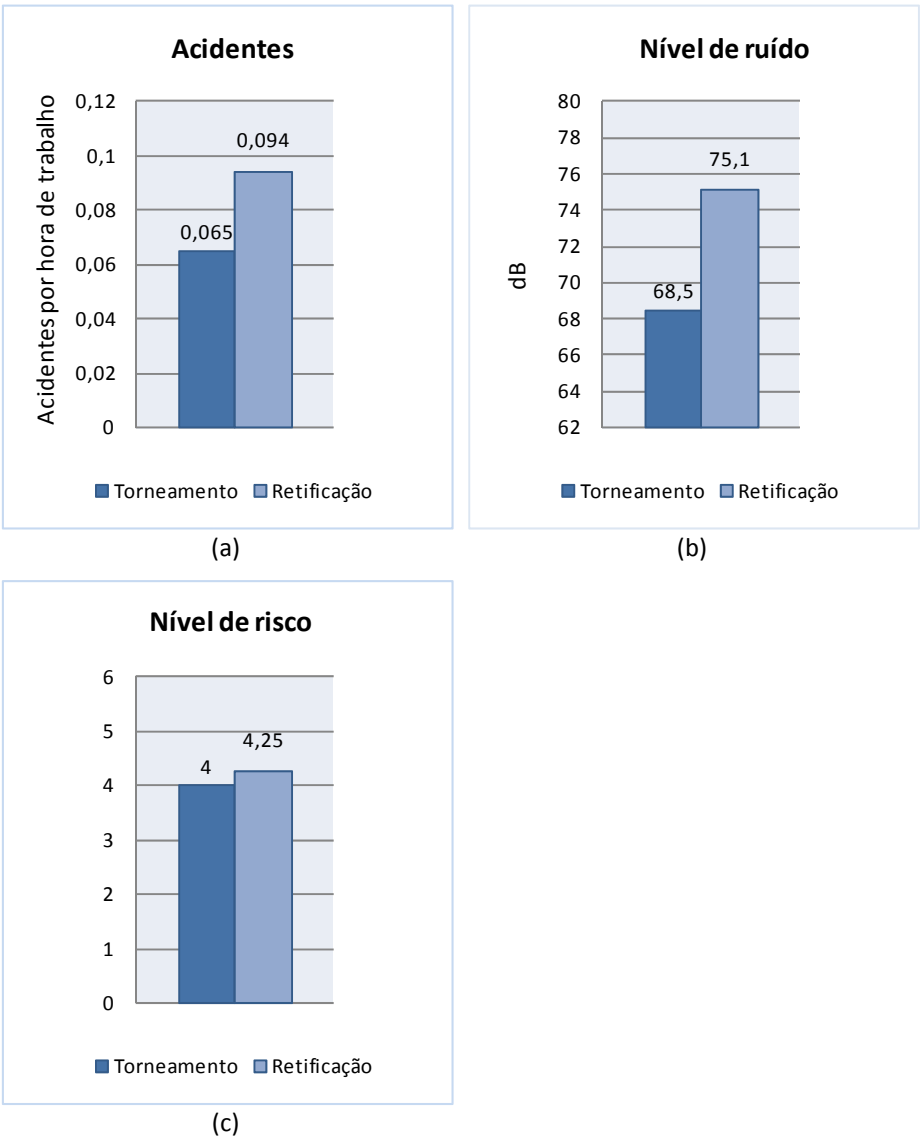


Figura 7.10 – Representação gráfica de indicadores de saúde e segurança do operador.

Legenda: a. Acidentes por hora de trabalho; b. Nível de ruído; c. Nível de risco para o operador.

Fonte – Autor.

A quantidade de acidentes, mesmo sendo uma medida difícil de ser avaliada, foi obtida tendo como base um grande levantamento realizado em indústrias australianas por pesquisadores (GARDNER *et al.*, 1999). Foi verificado que o processo de retificação apresentou um desempenho 44,6% pior do que o processo de torneamento, com uma quantidade superior de acidentes por hora de trabalho. Quanto ao nível de ruído, o processo de retificação também apresentou desvantagem, com um desempenho 9,6% pior em relação ao processo de torneamento.

De acordo com Parkin (2007), realizar avaliações de risco no ambiente de trabalho é mais comum atualmente[35] e usualmente assumem a forma de um *check-list*. Um sistema de pontuação para descrever o risco das atividades, baseado em probabilidades e em severidade, é um mecanismo válido para introduzir um mecanismo de gerenciamento de risco. O método utilizado para avaliar o risco nos processos de usinagem foi desenvolvido por Parkin (2007). Este método conta com uma matriz de classes de risco, separados de acordo com a probabilidade e severidade dos acidentes em potencial (Figura 7.11).

Níveis de probabilidade

Probabilidade	Definição
Freqüênte	Provável de ocorrer
Provável	Ocorrerá várias vezes
Ocasional	Provável de ocorrer alguma vez
Remota	Inprovável de ocorrer, mas possível
Improvável	Inprovável de ocorrer
Incrível	Extremamente improvável de ocorrer

(a)

Níveis de severidade

Severidade	Definição
Catastrófica	Mortes múltiplas
Crítica	Morte ou ferimentos múltiplos/doenças ocupacionais severas
Marginal	Ferimento severo ou doença
Desprezível	Ferimento e/ou doença leve

(b)

Probabilidade/ Severidade	Catastrófica	Crítica	Marginal	Desprezível
Freqüênte	A	A	A	B
Provável	A	A	B	C
Ocasional	A	B	C	C
Remota	B	C	C	D
Improvável	C	C	D	D
Incrível	C	D	D	D

(c)

Figura 7.11 – Matriz de risco para o operador.

Legenda: a. Níveis de probabilidade; b. Níveis de severidade; c. Matriz de risco.

Fonte – Autor.

Utilizando o método de Parkin (2007) foi possível associar um risco a todos os tipos de falhas em potencial. Os tipos de falhas foram coletados a partir do trabalho de Backström e Döös (1997). Nesse estudo, os autores investigaram os acidentes típicos de máquinas automatizadas. No total, foram investigados dezesseis tipos de incidentes diferentes que possam a causar algum tipo de ferimento ao operador. O resultado da análise foi detalhado no Quadro 7.25.

[35] O primeiro objetivo dessas avaliações é evitar acidentes em potencial. Essa situação apareceu como resultados de diferentes direcionadores como a legislação de saúde e segurança e um número crescente de julgamentos legais onde as empresas têm sido classificadas como responsáveis por acidentes de seus funcionários (PARKIN, 2007).

Por se tratar de uma análise qualitativa, os resultados foram depois transformados em valores numéricos de acordo com o nível de risco para o operador. Quando o índice de risco encontrado é máximo (A), o valor numérico é igual a 1, já quando é mínimo (D), corresponde a zero.

Quadro 7.25 – Nível de risco de acordo com os tipos de acidentes.

	Tipo de falha	Probabilidade	Severidade	Risco
Retificação	Quebra do rebolo	Ocasional	Crítica	B (0,75)
	Peça incorretamente fixada	Ocasional	Desprezível	C (0,5)
	Peça solta	Ocasional	Marginal	C (0,5)
	Parte da máquina fica presa, ou inoperante	Remota	Marginal	C (0,5)
	Falha de programação	Ocasional	Marginal	C (0,5)
	Falha do CNC	Remota	Marginal	C (0,5)
	Vazamentos (Fluido refrigerante ou hidráulico)	Ocasional	Desprezível	C (0,5)
	Outros (falhas elétricas, mecânicas, etc.)	Ocasional	Desprezível	C (0,5)
Torneamento	Quebra da ferramenta	Ocasional	Marginal	C (0,5)
	Peça incorretamente fixada	Ocasional	Desprezível	C (0,5)
	Peça solta	Ocasional	Marginal	C (0,5)
	Parte da máquina fica presa, ou inoperante	Remota	Marginal	C (0,5)
	Falha de programação	Ocasional	Marginal	C (0,5)
	Falha de sinal (CNC)	Remota	Marginal	C (0,5)
	Vazamentos (Fluido refrigerante ou hidráulico)	Ocasional	Desprezível	C (0,5)
	Outros (falhas elétricas, mecânicas, etc.)	Ocasional	Desprezível	C (0,5)

Fonte – Autor.

Como pode ser visto na Figura 7.10, o nível de risco para o operador no processo de retificação é ligeiramente superior ao processo de torneamento. Isso se deve a uma falha não muito rara que pode vir a acontecer tipicamente no processo de retificação, a quebra do rebolo. Todas as informações separadas na matriz de risco foram supervisionadas por um especialista em processos de usinagem, que forneceu uma estimativa da probabilidade de ocorrência e os seus respectivos níveis de severidade.

7.5.1.6. Treinamento e educação

O último aspecto social a ser avaliado refere-se ao treinamento e educação fornecidos aos operadores de máquinas CNC de torneamento e retificação. A Figura 7.12 contém a carga horária necessária para um profissional com alguma base em mecânica poder operar ambas as máquinas. A máquina de retificação Zema G800 necessita, além da formação prévia de operador em retificação CNC, de um treinamento preliminar do fabricante para que seja incorporada algumas capacitações tecnológicas importantes (32 horas). Assim, além do curso

de 120 horas oferecido pelo SENAI, é aconselhável que o operador também tenha um curso complementar oferecido pelo fabricante. A fabricante Index também oferece curso de instrução em torno CNC, no entanto, foi compreendido que o curso oferecido pelo SENAI já contempla os pontos abordados, p.ex., programação CNC.

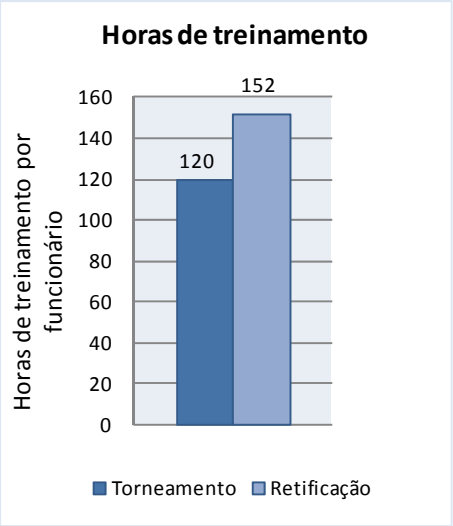


Figura 7.12 – Representação gráfica do indicador de treinamento e educação.

Fonte – Autor.

Uma quantidade superior de atividades de treinamento e educação é altamente positiva para o funcionário e para a empresa. Uma melhor qualificação do funcionário pode trazer melhor auto-estima e satisfação para o mesmo. Do outro lado, a empresa pode desfrutar de uma maior capacidade de diagnóstico e solução de problemas por parte do funcionário, melhorando, no fim, a sua eficiência de uma forma geral.

7.5.1.7. Garantias e obrigações

Os processos de usinagem acabam por produzir alguns tipos de resíduos que devem ser descartados adequadamente. Na Figura 7.13, estão todos os custos que acompanham a disposição final de resíduos para os processos de retificação e torneamento, calculados por unidade de peça produzida.

Um fator interessante é o custo negativo associado a disposição do fluído hidráulico e das ferramentas de corte. O motivo para não haver custos associados a esses resíduos é o interesse de outras companhias em recuperá-los por meio de processos de reciclagem. Existe valor econômico para tais resíduos.

Assim, enquanto o processo de torneamento apresenta um ganho financeiro por unidade de produto produzido, o mesmo caso não se repete para o processo de retificação,

devido ao elevado custo de tratamento do fluído de corte para não causar dados ao meio-ambiente e saúde. Ainda assim, o peso dos custos de tratamentos sobre o custo final ainda é pequeno.

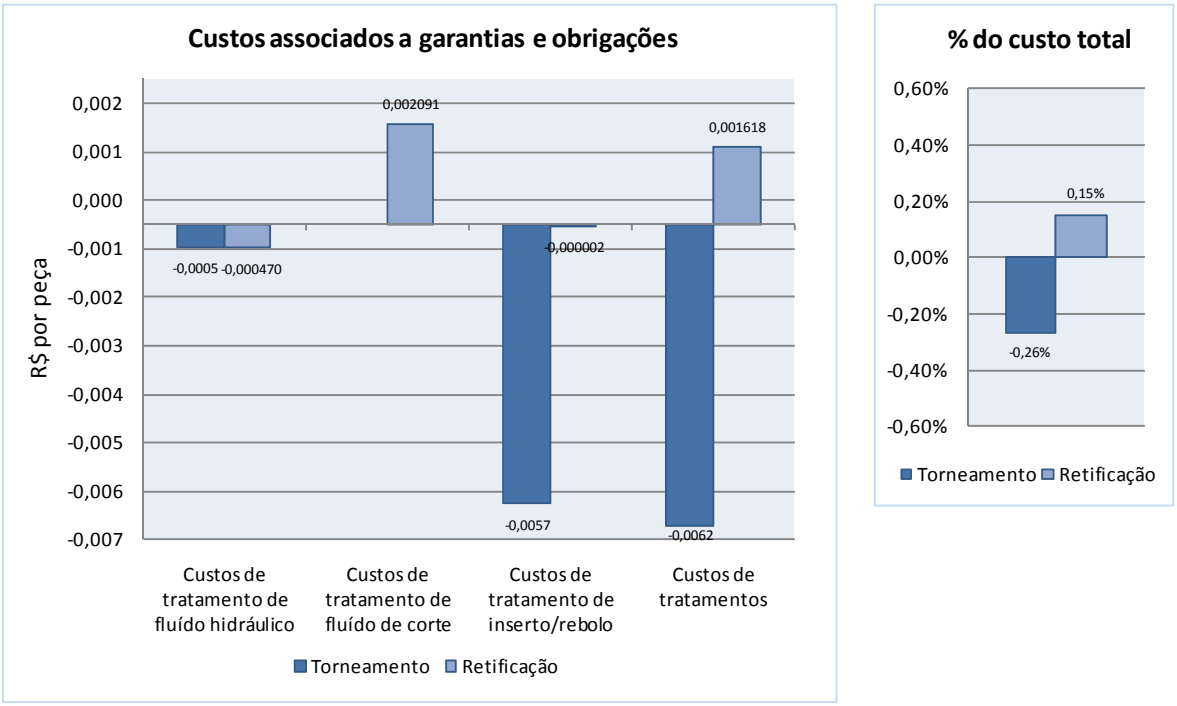


Figura 7.13 – Representação gráfica dos custos associados a garantias e obrigações.

Legenda: a. Custos do tratamento de emissões, efluentes e resíduos; b. Percentual sobre o custo total.

Fonte – Autor.

7.5.1.8. Custos de produção

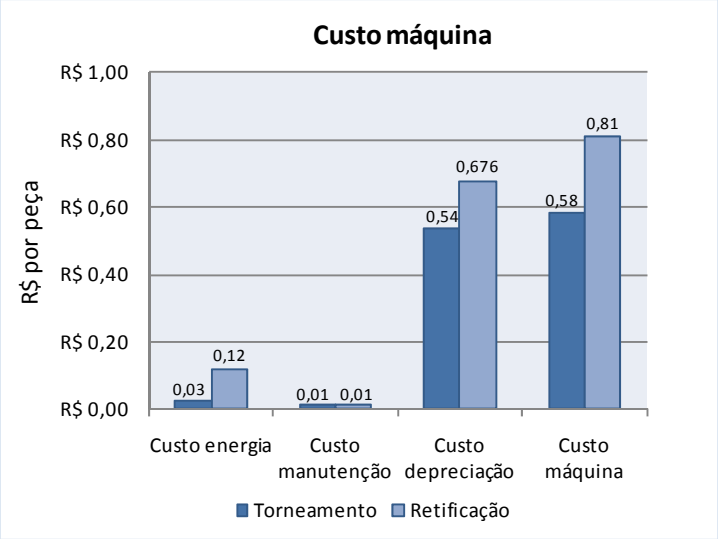
O cálculo do custo de produção precisou ser desdobrado em duas partes. A primeira parte destinada ao cálculo do custo máquina e a segunda parte, destinada ao cálculo do custo total de produção. Os respectivos valores dos custos de produção estão resumidos no Quadro 7.26.

Quadro 7.26 – Indicadores de custos de produção por peça.

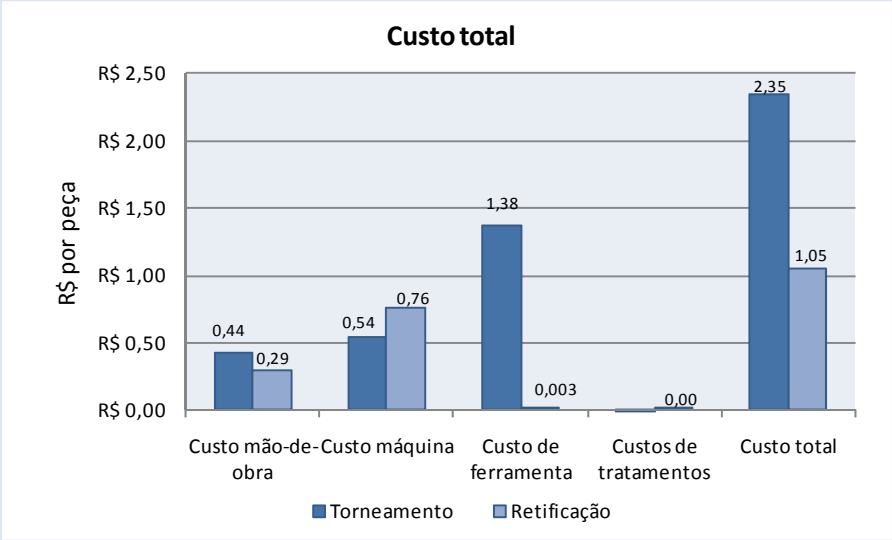
	Torneamento	Retificação
Custo mão-de-obra	R$ 0,435	R$ 0,291
Custo energia	R$ 0,027	R$ 0,120
Custo manutenção	R$ 0,014	R$ 0,014
Custo depreciação (10 anos)	R$ 0,497	R$ 0,622
Custo máquina	R$ 0,538	R$ 0,756
Custo dressador		R$ 0,001
Custo de ferramenta	R$ 1,380	R$ 0,002
Custos de tratamentos	-R$ 0,006	R$ 0,002
Custo total	R$ 2,347	R$ 1,051

Fonte – Autor.

Os valores do Quadro 7.26 foram usados para construir os gráficos da Figura 7.14.



(a)



(b)

Figura 7.14 – Representação gráfica dos custos de produção.

Legenda: a. Composição do custo máquina; b. Composição do custo total.

Fonte – Autor.

O custo de energia, como era esperado, foi algumas vezes superior no processo de retificação. Mesmo assim, considerando um cenário de ocupação máxima de capacidade da máquina, a participação do custo de energia no custo total de produção foi menor que o esperado. No caso do processo de retificação, os itens com mais impactos foram a mão-de-obra e custo máquina, mais especificamente o custo associado a depreciação da máquina. Analisando o processo de torneamento, o item mais impactante foi o custo do inserto. O uso de materiais nobres e o curto tempo de vida do inserto penalizaram o custo de produção.

O custo do material usinado não foi somado ao custo de produção por ser comum a ambos os processos, sendo dessa forma não relevante para uma análise comparativa de sustentabilidade. Foi escolhido o método de depreciação linear para o cálculo da depreciação (100% dividido por 10 anos)[36].

7.5.1.9. Retorno sobre investimentos

O indicador utilizado para calcular o tempo envolvido na recuperação do investimento foi o Payback, com base no fluxo de caixa futuro com valores trazidos ao valor presente líquido. Sua principal vantagem em relação ao VPL é que o Payback leva em conta o prazo de retorno do investimento, apropriado para situações de grande aporte de capital ou ambiente competitivo turbulento. Antes de calcular o Payback para ambos os processos de usinagem, foi calculado o fluxo de caixa futuro dos investimentos (Quadro 7.27).

Quadro 7.27 – Fluxo de caixa futuro dos investimentos.

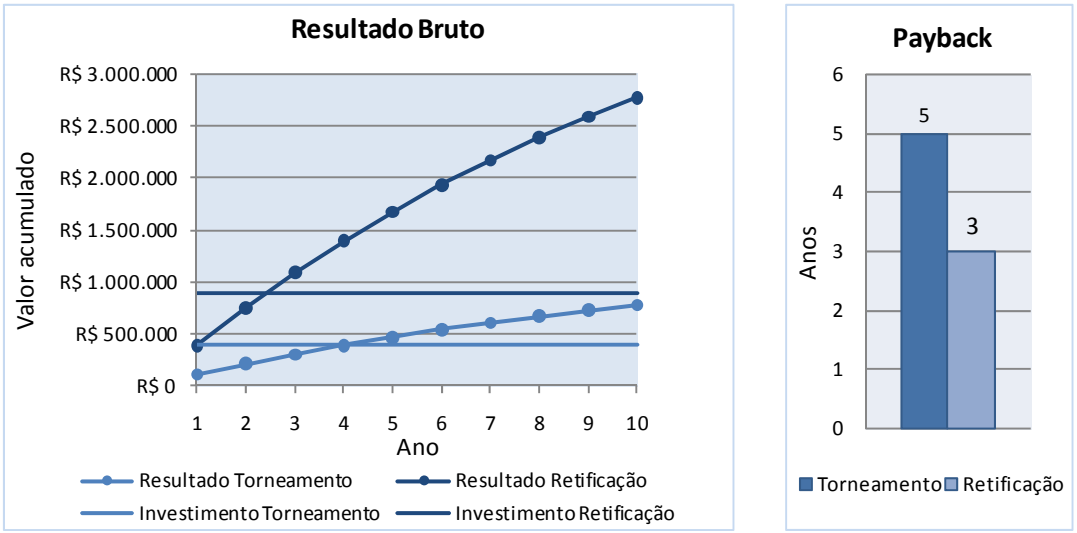
	Ano									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Retifica										
Resultado operacional bruto	427509	427509	427509	427509	427509	427509	427509	427509	427509	427509
Juros	1,09	1,18	1,29	1,40	1,52	1,65	1,80	1,96	2,13	2,31
VPL	393111	361482	332397	305652	281060	258446	237651	218530	200947	184779
Valor presente do resultado operacional bruto acumulado	393111	754593	1086990	1392642	1673702	1932148	2169799	2388329	2589276	2774055
Torno										
Resultado operacional bruto	119918	119918	119918	119918	119918	119918	119918	119918	119918	119918
Juros	1,09	1,18	1,29	1,40	1,52	1,65	1,80	1,96	2,13	2,31
VPL	110269	101397	93238	85736	78838	72495	66662	61298	56366	51831
Valor presente do resultado operacional bruto acumulado	110269	211666	304904	390641	469479	541974	608636	669934	726300	778131

Fonte – Autor.

Para calcular o fluxo de caixa futuro, foi definido um preço de venda para a peça, calculado a partir de uma margem de 10% sobre o custo de produção do processo de torneamento, visto que esse foi o maior custo calculado. Foi considerada a taxa SELIC[37] (8,75% ao ano) como valor de referência. Também foi feita uma cotação do corpo de prova de aço 4340, com o objetivo de compor o preço final de venda da peça[38]. Os dados calculados

[36] Secretaria da Receita Federal, art. 305 do RIR/99, estipula o prazo de 10 anos para depreciação de máquinas.
[37] A taxa SELIC orienta a definição da taxa de juros no país.
[38] A cotação foi realizada junto à empresa Antari Comércio de Metais. De acordo com a empresa, um corpo de prova como esse custa R$13,00 a unidade.

foram usados para construir dois gráficos, um para ilustrar o resultado bruto acumulado e outro para o tempo de retorno do investimento (Figura 7.15).



(a) (b)

Figura 7.15 – Representação gráfica do retorno sobre investimentos.

Legenda: a. Valor presente do fluxo de caixa; b. Payback.

Fonte – Autor.

Como pode ser visto nos gráficos (a) e (b) da Figura 7.15, o processo de retificação apresenta um prazo mais curto para a recuperação do valor investido, somando um total de três anos de operação. Em contra partida, o processo de torneamento demanda cinco anos de operação para a recuperação completa do valor investido.

7.5.1.10. Custos de fim de vida

As duas máquinas avaliadas possuem um conjunto avançado de tecnologias e aplicações. Após um período longo (20 anos) é esperado que o nível de atualização das máquinas seja muito baixo, necessitando, assim, de recondicionamento para que se tornem mais eficientes e confiáveis.

Os indicadores para os custos de fim de vida foram resumidos na Figura 7.16. Como está ilustrado, o processo de torneamento é aquele que apresenta um custo menor de atualização tecnológica. Enquanto o processo de torneamento demanda um investimento correspondente a 60% do valor inicial da máquina, o processo de retificação demanda um valor igual a 67%. Se for calculado o custo para o recondicionamento com base no volume de

peças produzidas durante esse período de 20 anos, é obtido um custo por peça menor para o processo de torneamento.

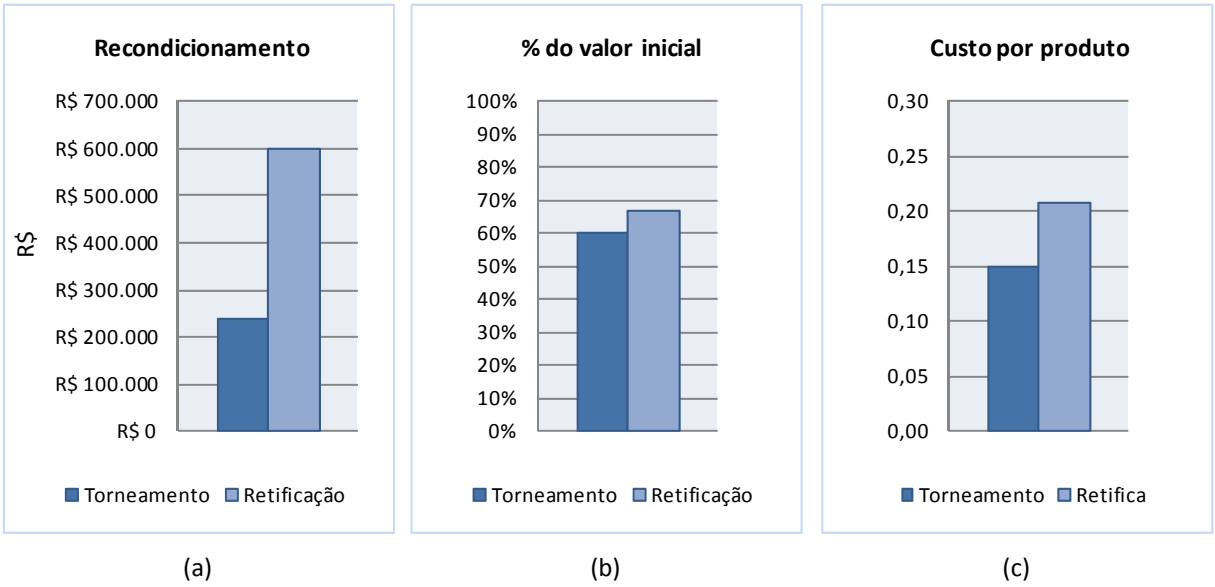


Figura 7.16 – Representação gráfica dos custos de fim de vida.

Legenda: a. Valor para recondicionamento ou *retrofit*; b. Percentual sobre o valor de uma máquina nova; Custo de recondicionamento por produto produzido (prazo de 20 anos).

Fonte – Autor.

7.5.2. Índice agregado de sustentabilidade

Outro tipo importante de indicador é aquele obtido da integração de vários tipos de indicadores de sustentabilidade. Como foi comentado na seção 6.6, o índice agregado de sustentabilidade permite analisar várias medidas de maneira conjunta, levando em conta as três dimensões da sustentabilidade ao mesmo tempo. O modelo para a integração de indicadores em um índice de sustentabilidade pode ser visto na Figura 6.11 e detalhado na Figura 7.17.

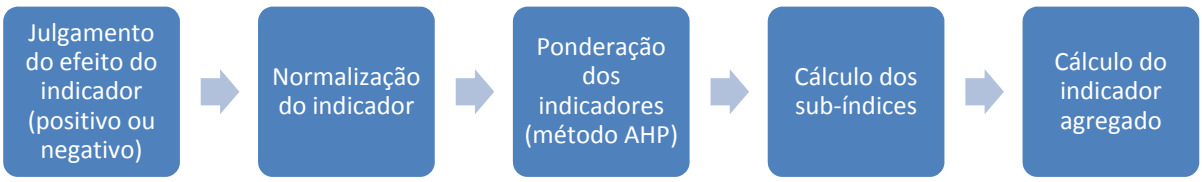


Figura 7.17 – Seqüência de cálculo do indicador agregado de sustentabilidade.

Fonte – Autor.

Uma etapa obrigatória para o cálculo do indicador agregado de desempenho, corresponde à normalização dos indicadores para acabar com as diferenças de unidade entre as medidas. Como é colocado por Krajnc e Glavic (2005), o principal problema em agregar indicadores está na diferença de unidades entre as medidas. Uma maneira de contornar esse problema é promover a normalização da medida.

Porém, antes de iniciar a normalização dos indicadores é necessário classificar quais das medidas, ao aumentar, apresentariam um impacto positivo na sustentabilidade dos processos, e quais, ao diminuir, apresentariam o efeito oposto. Por exemplo, o aumento da quantidade de resíduos por produto manufaturado tem claramente um impacto negativo sobre a sustentabilidade ambiental. Por outro lado, um aumento da medida de eficiência energética apresentaria um efeito positivo. Para cada dimensão da sustentabilidade, foram separados os indicadores de acordo com o seu efeito sobre a sustentabilidade (Quadro 7.28).

Quadro 7.28 – Efeitos do aumento dos indicadores sobre a sustentabilidade.

Dimensão	Indicadores cujo aumento tem efeito positivo	Indicadores cujo aumento tem efeito negativo
Ambiental	Eficiência de energia	Energia consumida Consumo materiais Resíduos gerados
Social	Remuneração por hora Número médio de horas de treinamento	Acidentes ocupacionais Desgaste do operador Nível de risco para o operador
Econômica		Custos de tratamentos sobre o custo total Custo de produção Payback Custo de fim de vida Custo da atualização frente ao valor inicial

Fonte – Autor.

Um meio de normalizar os indicadores de um mesmo tipo é dividi-los pelo seu valor médio. Partindo da equação 6.1, o valor normalizado para os indicadores pode ser calculado da seguinte forma:

$$NP^{+}(j) = P^{+}(j) \times \frac{1}{R(j)} \qquad (7.1)$$

$$NP^{-}(j) = -1 \times \left[P^{-}(j) \times \frac{1}{R(j)} \right] \qquad (7.2)$$

Onde NP^{+} corresponde ao indicador normalizado cujo aumento tem um efeito positivo sobre a sustentabilidade e NP^{-} tem um efeito negativo. O valor do fator de normalização corresponde ao valor médio entre ambos os processos. Os valores normalizados dos indicadores de sustentabilidade estão calculados no Quadro 7.29.

Quadro 7.29 – Valores normalizados dos indicadores de sustentabilidade.

	Unidade	P(j)		R(j)	NP^+		NP^-	
		T	R	Valor médio	T	R	T	R
Eficência de energia	%	42%	35%	38,62%	1,09	0,91		
Energia consumida	kWh/produto	0,09	0,40	0,25			-0,37	-1,63
Consumo materiais	g	1,77	7,09	4,43			-0,40	-1,60
Resíduos gerados	g	1,77	7,09	4,43			-0,40	-1,60
Remuneração por hora	R$/hora	8,42	10,11	9,26	0,91	1,09		
Acidentes ocupacionais	Acidentes/hora	0,07	0,09	0,08			-0,82	-1,18
Nível de ruído	dB	68,50	75,10	71,80			-0,95	-1,05
Nível de risco para o operador	-	4,00	4,25	4,13			-0,97	-1,03
Número médio de horas de treinamento	Hs/operador	120,00	152,00	136,00	0,88	1,12		
Custo de garantias e obrigações	R$/produto	-0,006	0,002	-			0,26	-0,15
Custo de produção	R$/produto	2,35	1,05	1,70			-1,38	-0,62
Payback	Anos	5,00	3,00	4,00			-1,25	-0,75
Custo da atualização frente ao valor inicial	%	60%	67%	63,50%			-0,94	-1,06

Fonte – Autor.

O próximo passo para se calcular o índice agregado de sustentabilidade envolve determinar os pesos, os quais serão aplicados em cada indicador individual. Os tomadores de decisão nas companhias possuem diferentes visões e prioridades estratégicas e, dessa forma, estão interessados em indicadores diferentes. Como indicadores guiam a gestão e o planejamento estratégico, estes devem ser definidos com cuidado e levando em conta os interesses específicos da companhia. As empresas podem associar diferentes medidas de peso para cada indicador individual dependendo da sua estratégia de gestão.

Para auxiliar no processo de definição de pesos para os indicadores, foi escolhido o **método de análise hierárquica** (AHP). Como foi visto na seção 5.2.1, o método AHP baseia-se em análises em pares e na visão de especialistas para derivar fatores de prioridade. O primeiro passo do método de análise hierárquica pede que seja definida a hierarquia do problema, em que a conexão superior representa o objetivo geral da decisão e as conexões subseqüentes apresentam os critérios que guiam essa decisão (Figura 7.18).

Com a finalidade de guiar esse processo de definição de pesos para os indicadores, foram definidos três cenários distintos com base em diferentes modelos de maturidade em produção sustentável. Um **primeiro cenário** no qual a empresa está mais interessada no ganho econômico e no cumprimento de normas e leis ambientais. O **segundo cenário**, um cenário de produção mais limpa, já apresenta a dimensão ambiental como importante direcionador estratégico. Finalmente, o **terceiro cenário** busca integrar todas as três dimensões da sustentabilidade, sendo por isso chamado de produção sustentável.

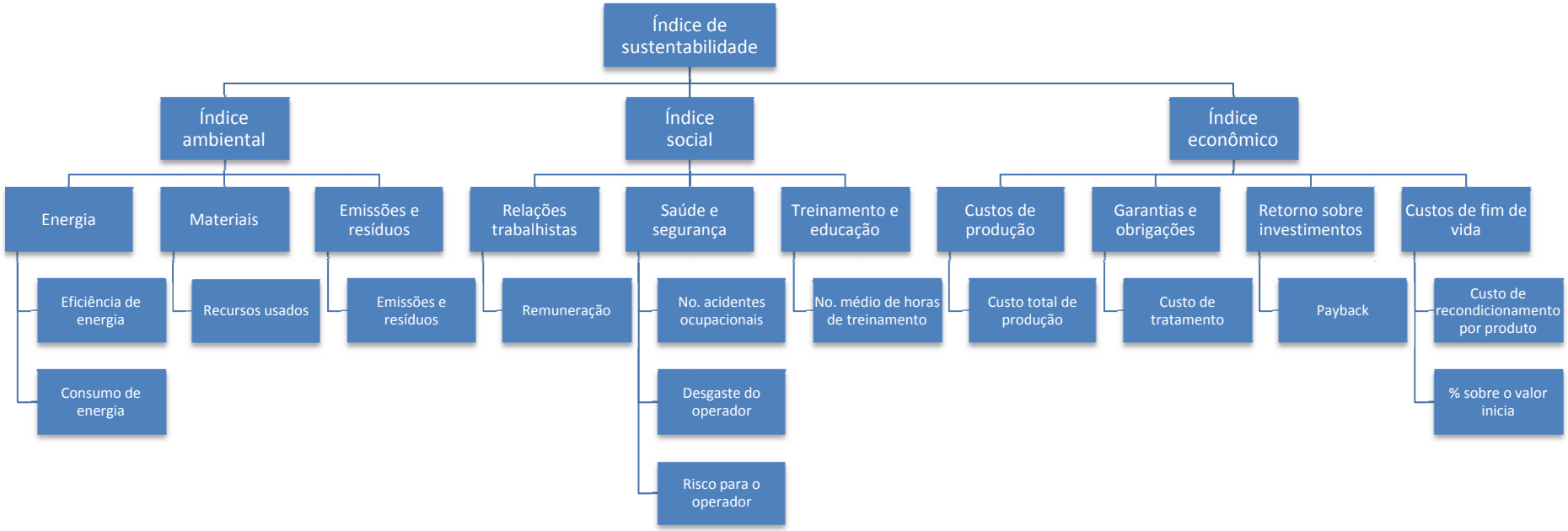


Figura 7.18 – Hierarquia de critérios para a avaliação de sustentabilidade.

Fonte – Autor.

Após a definição da estrutura do problema e das prioridades estratégicas, por meio dos cenários, o próximo passo consiste em realizar as comparações par a par dos diferentes indicadores. A comparação é realizada tentando identificar qual dos dois indicadores é mais importante para o objetivo da tomada de decisão. O resultado dessa comparação é uma matriz, a qual necessariamente a diagonal deve ser igual a 1.

A definição do peso dos indicadores acontecerá somente para o nível superior das categorias (*triple bottom line*). Os níveis inferiores não serão abordados em detalhe, pois a priorização dos indicadores de uma mesma categoria não seria vantajosa ou relevante para o resultado final do avaliação dos processos de usinagem.

7.5.2.1. Cenário 1 – Retorno econômico e obediência a normas e leis ambientais

A pergunta a ser respondida para o primeiro cenário seria: qual das dimensões é mais relevante em um cenário de ganho econômico e de obediência a normas e leis ambientais? Comparando o nível de prioridade das diferentes dimensões, é possível chegar a uma ordem de importância a ser usada nos pesos (Quadro 7.30).

Quadro 7.30 – Matriz de prioridade entre as dimensões do cenário 1.

	I_A	I_S	I_E	Pesos
I_A	1	1	1/9	
I_S	1	1	1/9	
I_E	9	9	1	
Σ	11,000	11,000	1,222	
I_A	0,091	0,091	0,091	0,091
I_S	0,091	0,091	0,091	0,091
I_E	0,818	0,818	0,818	0,818

Legenda: I_A é o índice ambiental; I_S é o índice social; I_E é o índice econômico.

Fonte – Autor.

O último passo para avaliação envolve combinar os diferentes indicadores até chegar aos subíndices, ou índice ambiental, social, econômico, e depois ao índice agregado de sustentabilidade. Assim, o primeiro cálculo corresponde aos subíndices que compõem o valor agregado de sustentabilidade, usando para isso, pesos iguais para todos os indicadores. Logo a seguir, na Figura 7.19, pode ser visto os valores calculados para o cenário 1.

Indicadores ambientais	Torneamento	Retificação
Eficência de energia	1,090	0,910
Energia consumida	-0,371	-1,629
Consumo materiais	-0,400	-1,600
Resíduos gerados	-0,400	-1,600
Índice ambiental	-0,020	-0,980

(a)

Indicadores sociais	Torneamento	Retificação
Remuneração por hora	0,909	1,091
Acidentes ocupacionais	-0,818	-1,182
Nível de ruído	-0,954	-1,046
Nível de risco para o operador	-0,970	-1,030
Horas de treinamento	0,882	1,118
Índice social	-0,190	-0,210

(b)

Indicadores econômicos	Torneamento	Retificação
Custo de garantias e obrigações	0,264	-0,154
Custo de produção	-1,382	-0,618
Payback	-1,250	-0,750
% atualização frente ao valor inicial	-0,945	-1,055
Índice econômico	-0,828	-0,644

(c)

Figura 7.19 – Valor dos subíndices em sustentabilidade para o cenário 1,2 e 3.

Legenda: a. Valor para o índice ambiental; b. Valor para o índice social; c. Valor para o índice econômico.

Fonte – Autor.

Em seguida, foi calculado o índice agregado de sustentabilidade, usando os pesos definidos por meio do método AHP e listados no Quadro 7.30. O resultado final pode ser visto no Quadro 7.31.

Quadro 7.31 – Índice agregado de sustentabilidade para o cenário 1.

	Peso	Torneamento	Retificação
Índice ambiental	0,091	-0,002	-0,089
Índice social	0,091	-0,017	-0,019
Índice econômico	0,818	-0,678	-0,527
Índice agregado de sustentabilidade		-0,697	-0,635

Fonte – Autor.

Para o cenário 1, o processo de retificação foi aquele que apresentou o melhor desempenho final. Mais uma vez lembrando que esse sucesso foi conseqüência do maior peso definido para a dimensão econômica, dentro do método AHP de análise multicritério. Uma preferência classificada como sendo de “extrema importância” frente à dimensão ambiental e social. Os indicadores que mais contribuíram para o desempenho superior do processo de retificação foram o custo de produção e o payback inferior. O desempenho do processo de retificação foi aproximadamente 9% superior ao processo de torneamento.

7.5.2.2. Cenário 2 – Produção mais limpa

A pergunta a ser respondida para o primeiro cenário seria: Qual das dimensões é mais relevante em um cenário de produção mais limpa? Novamente comparando o nível de prioridade das diferentes dimensões, é possível chegar a uma ordem de importância a ser usada nos pesos (Quadro 7.32).

Quadro 7.32 – Matriz de prioridade entre as dimensões do cenário 2.

	I_A	I_S	I_E	Pesos
I_A	1	6	1/3	
I_S	1/6	1	1/9	
I_E	3	9	1	
Σ	4,167	16,000	1,444	
I_A	0,240	0,375	0,231	0,282
I_S	0,040	0,063	0,077	0,060
I_E	0,720	0,563	0,692	0,658

Fonte – Autor.

Como está no Quadro 7.32, o peso da dimensão ambiental aumentou. Isso se deve a agora a importância moderada definida para a dimensão econômica frente à dimensão ambiental. Ainda que a produção mais limpa tenha a vantagem de ser uma abordagem mais efetiva em custo e não somente um meio de controlar a poluição, o resultado financeiro ainda possui relevância moderadamente superior frente à dimensão ambiental.

Depois de calculados os pesos para o cenário 2, o próximo passo consiste em calcular o valor dos subíndices para as três dimensões da sustentabilidade. Como foi definida importância igual para os indicadores de sustentabilidade, não é necessário recalcular novamente o valor dos subíndices. Deste modo, é possível aproveitar os dados da Figura 7.19 para calcular o índice agregado de sustentabilidade do cenário 2. Os subíndices já multiplicados pelos pesos e o valor do índice agregado estão presentes no Quadro 7.33.

Quadro 7.33 – Índice agregado de sustentabilidade para o cenário 2.

	Peso	Torneamento	Retificação
Índice ambiental	0,282	-0,006	-0,276
Índice social	0,060	-0,011	-0,013
Índice econômico	0,658	-0,545	-0,424
Índice agregado de sustentabilidade		-0,562	-0,713

Fonte – Autor.

Logo, o processo de torneamento apresentou um melhor desempenho. O índice agregado de sustentabilidade do torneamento foi 22% melhor que do processo de retificação.

7.5.2.3. Cenário 3 – Produção sustentável

O último cenário passa a definir igual importância a todas as três dimensões da sustentabilidade. A pergunta a ser respondida para o primeiro cenário seria: Qual das dimensões é mais relevante em um cenário de produção sustentável? Como está representado no Quadro 7.34, a ordem de importância entre as dimensões é exatamente a mesma.

Quadro 7.34 – Matriz de prioridade entre as dimensões do cenário 3.

	I_A	I_S	I_E	Pesos
I_A	1	1	1	
I_S	1	1	1	
I_E	1	1	1	
Σ	3,000	3,000	3,000	
I_A	0,333	0,333	0,333	0,333
I_S	0,333	0,333	0,333	0,333
I_E	0,333	0,333	0,333	0,333

Fonte – Autor.

O grande diferencial da produção sustentável está na valorização dos aspectos sociais frente aos demais. Isso acontece pela integração de metas e de controles para os *stakeholders*, comunidades e sociedade. Além da atenção aos aspectos trabalhistas, de educação, segurança e saúde do trabalhador, a valorização das comunidades que participam diretamente ou indiretamente das operações da empresa é uma prioridade estratégica das empresas conhecidas como modelo em sustentabilidade. A empresa Natura, p.ex., desenvolve programas de parceria com as comunidades de entorno para proporcionar melhor qualidade de vida (Natura, 2008).

Como o foco do trabalho foi avaliar dois processos de manufatura sob a lente da sustentabilidade, a dimensão social não foi expandida para incorporar os impactos gerados sob outras partes, como as comunidades de entorno. O operador da máquina é o ponto da dimensão social sob análise e um dos aspectos principais do cenário 3. O valor final do índice agregado de sustentabilidade está calculado no Quadro 7.35.

Quadro 7.35 – Índice agregado de sustentabilidade para o cenário 3.

	Peso	Torneamento	Retificação
Índice ambiental	0,333	-0,007	-0,327
Índice social	0,333	-0,063	-0,070
Índice econômico	0,333	-0,276	-0,215
Índice agregado de sustentabilidade		-0,346	-0,611

Fonte – Autor.

A valorização das dimensões ambiental e social aumentou mais ainda a vantagem do processo de torneamento em relação ao processo de retificação. A vantagem do processo de torneamento foi de 38%.

7.6. Síntese dos resultados (Relatório de sustentabilidade)

Essa é a última etapa do procedimento proposto para a medição do desempenho em sustentabilidade. Visando fornecer subsídios à tomada de decisão, aqui devem estar condensadas todas as informações relevantes sobre o desempenho dos dois processos de usinagem.

Para facilitar a visualização dos dados e a sua analise, foram elaborados gráficos radar para todos os cenários simulados. Na Figura 7.22 estão representados os dados para o cenário 1, aquele de valorização especial do retorno econômico e da obediência a normas e leis ambientais. Como pode ser visto, o processo de retificação conseguiu apresentar um desempenho total superior ao processo de torneamento, pois o seu respectivo polígono apresentou maior área interna.

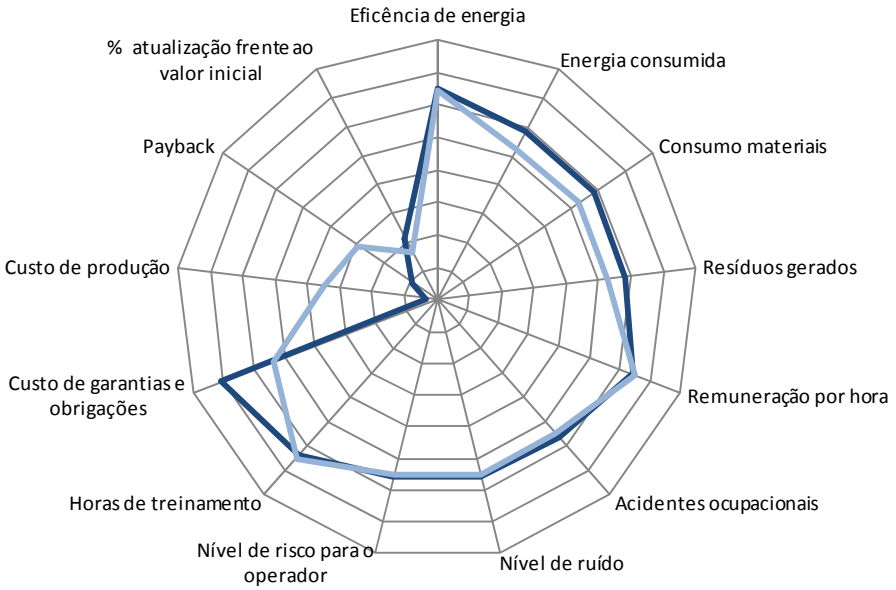


Figura 7.20 – Gráfico radar de sustentabilidade para o cenário 1.

Fonte – Autor.

O próximo gráfico foi construído para representar o cenário 2, o cenário de produção mais limpa (Figura 7.20). Nesse cenário, o processo de torneamento foi melhor.

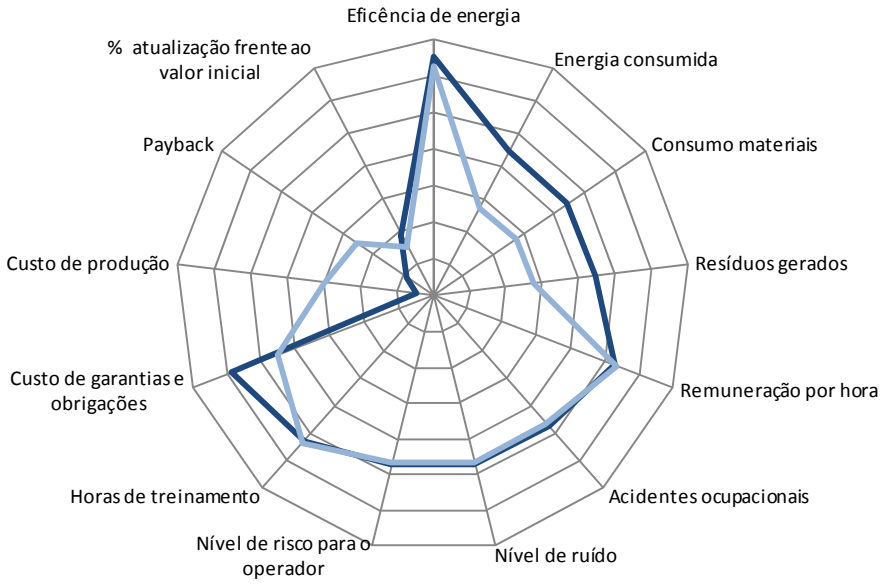


Figura 7.21 – Gráfico radar de sustentabilidade para o cenário 2.

Fonte – Autor.

Em último lugar, foi construído o gráfico radar para o cenário 3 (Figura 7.22).

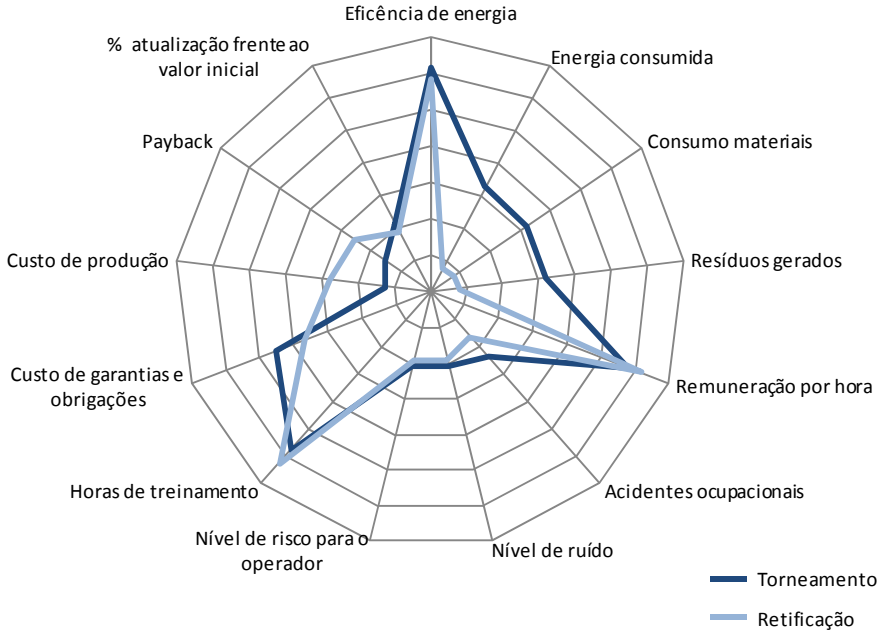


Figura 7.22 – Gráfico radar de sustentabilidade para o cenário 3.

Fonte – Autor.

No cenário três, todas as dimensões da sustentabilidade são igualmente avaliadas, sem a definição de preferências por meio de ponderações. O processo de retificação não foi aquele com melhor desempenho em sustentabilidade, embora o seu desempenho econômico tenha sido comprovadamente superior ao do processo de torneamento. Somente lembrando que o processo dito "mais sustentável" deve ser aquele com a maior área interna na figura.

Todos os indicadores ambientais avaliados foram, sem exceção, favoráveis ao processo de torneamento. Chamou a atenção, a grande diferença entre as medidas de consumo de energia e materiais, além da produção de resíduos. A mesma realidade não se repetiu para os parâmetros sociais. Enquanto o processo de torneamento apresenta melhor desempenho considerando os indicadores de saúde e segurança do trabalhador, os indicadores de remuneração e treinamento foram melhores para o processo de retificação.

8. Conclusão

Como foi comentado anteriormente, embora modelos para a avaliação de desempenho em sustentabilidade tenham sido apresentados nos últimos anos, ainda não existe consenso sobre quais aspectos de desempenho são mais relevantes. Além disso, esses modelos não estão orientados diretamente para avaliações de processos de manufatura. Contraposto a esse cenário, a execução da pesquisa foi capaz de propor um método especialmente ajustado a avaliações de desempenho em sustentabilidade de processos de manufatura.

Algumas características tornam o método proposto condizente e confiável para a futura tarefa de medição de desempenho de processos de manufatura. Em primeiro lugar, o método apresentado tratou de ajustar ou criar novos passos fundamentais ao processo tradicional de medição de desempenho em sustentabilidade, como a tarefa de análise e seleção de aspectos de desempenho especialmente importantes para os processos de manufatura. Outra característica relevante do método foi a divisão de responsabilidades sobre o papel das partes envolvidas na avaliação de desempenho, já que algumas fases envolvem mais ou menos responsáveis, p.ex., a fase de coleta e armazenagem de dados deve ser realizada por uma quantidade maior de pessoas e envolve um esforço notável. Um ponto relevante é a integração do ciclo de gestão "*plan-do-check-act*" ao escopo do método proposto, buscando criar uma rotina de definir, mensurar e melhorar o desempenho em sustentabilidade dos processos de manufatura. Por fim, a integração de metas de desempenho ao escopo do método foi um passo necessário para avaliar os avanços de futuros programas de "manufatura verde".

Uma característica especialmente importante do método proposto, tornando-o uma versão mais atual e completa em relação aos modelos tradicionais de medição de desempenho, é a contabilização de diferentes tipos de indicadores de sustentabilidade. Podem ser rastreados e controlados indicadores de diferentes dimensões, de diferentes classes (indicadores de "entrada", de "meio", ou de "fim"), ou ainda, de acordo com a visão dos gestores, que podem preferir produzir indicadores agregados.

A obtenção do método de avaliação de desempenho em sustentabilidade para processos de manufatura só foi exeqüível devido ao planejamento criterioso do cronograma de trabalho, que reservou no início do projeto de pesquisa, um prazo extenso para a fase de visibilidade sobre os temas Medição de Desempenho em Sustentabilidade e Manufatura Sustentável. A coleta dessas referências principais sobre o assunto era um objetivo específico do trabalho. As estratégias, princípios e práticas para manufatura sustentável, juntamente com os diferentes modelos de medição de desempenho em sustentabilidade estudados foram fundamentais para o desenvolvimento, em seguida, do método de avaliação de desempenho para gestão de processos de manufatura. Outras referências, como Tugnoli *et al.* (2008), ou Krajnc e Glavic (2005), também somaram-se as referências anteriores para ajudar a compor as etapas do método.

O objetivo específico de avaliar os níveis de maturidade em sustentabilidade para os processos manufatura e seus aspectos de controle foi atendido por meio de uma análise bibliográfica de fontes recentes e visitas a portais de organismos internacionais. Foi possível identificar o caminho a ser percorrido pelas empresas que desejam um dia ter o rótulo de "manufatura verde" para seus processos. Um ponto interessante é a influência direta do posicionamento estratégico da empresa sobre os seus programas de sustentabilidade em manufatura. O investimento em novos processos e as despesas com capacitações dependem integralmente da visão da empresa para o seu futuro e como a sustentabilidade se integra a tais planos. A empresa pode apresentar uma abordagem reativa, aplicando controles de fim-de-tubo, pode desenvolver planos que visam ganhos de eficiência na manufatura e minimização de perdas e, finalmente, a melhor opção, pode pensar em aplicar novos processos de manufatura, totalmente amigáveis ao meio-ambiente.

Outro objetivo específico do trabalho foi comparar o desempenho em sustentabilidade de dois processos de usinagem que concorrem entre si em faixas estreitas de operação. Essa comparação também permitiu validar o método proposto no objetivo geral do trabalho. A validação do método foi realizada através do comprimento de todas as etapas o compõem, passo a passo. A validação do método permitiu, no final, produzir quadros comparativos de

indicadores de sustentabilidade, além de gráficos do tipo “radar”, para os dois processos de usinagem.

Uma revisão sobre as características dos processos de retificação e torneamento forneceu subsídios à essa etapa de análise experimental. Como foi comentado, o objetivo foi avaliar o desempenho em sustentabilidade desses processos em uma faixa estreita de parâmetros de operação que viabilizaria a produção de uma peça que simula a geometria e o material usados em eixos de transmissão de veículos, segundo os mesmos critérios de qualidade e desempenho. O processo de retificação foi superior no cenário de valorização do retorno econômico e obediência a normas e leis ambientais, já nos demais cenários, o processo de torneamento apresentou melhor desempenho. Essa iniciativa de construção de cenários para tomada de decisão foi fundamental para cumprir o objetivo específico de produzir indicadores agregados de sustentabilidade. Logo abaixo estão outros comentários a cerca dos resultados obtidos:

a) O desempenho econômico foi avaliado não somente pelo custo de produção e *payback*, mas também pelos custos associados a garantias e obrigações em ambos os processos. Mesmo tendo um desempenho pior nesse critério, o processo de retificação apresentou um resultado econômico superior;
b) O desempenho ambiental foi superior para o processo de torneamento. Além de não usar fluído de corte para a produção da peça proposta, este processo também consome energia em uma quantidade muito inferior ao processo de retificação, aproximadamente quatro vezes menos;
c) O desempenho social foi um item sem destaques para ambos os processos, visto que o resultado final foi relativamente próximo. Enquanto o processo de torneamento proporciona maior segurança e saúde ao operador, o processo de retificação proporciona maior quantidade de horas de treinamento e também melhor remuneração.

Em vista do resultado da avaliação de desempenho realizada para os processos de usinagem, seria viável aplicar o método, futuramente, na avaliação de outros sistemas de produção. O método proposto pode auxiliar as empresas a tornar sua manufatura mais sustentável, visto que mesmo existindo a vontade e a energia necessária para tal, a maior quantidade de controles e a necessidade por mudanças nas suas operações fazem com que tal processo não seja rápido ou simples.

- **Sugestões para trabalhos futuros**

Algumas limitações do estudo também merecem ser citadas para que melhorias sejam feitas em análises futuras. As principais limitações seriam:

a) Falta considerar devidamente a visão de ciclo de vida na avaliação final do desempenho em sustentabilidade de ambos os processos. Como foi dito anteriormente, essa visão serve para que as empresas não adotem soluções que transfiram o impacto ambiental para outra parte do ciclo de vida. Uma sugestão é usar bases de dados de metodologias de avaliação do ciclo de vida para compor a lista técnica desses componentes e assim calcular os diferentes potenciais de impacto. Uma vez que já foi feito o inventário do processo de usinagem, bastaria encontrar o equivalente de recursos usados para manufaturar tais componentes para poder aplicar os fatores de caracterização;
b) A análise experimental foi conduzida sem considerar uma amostra grande de peças, o que pode gerar algumas distorções nos valores finais dos indicadores. Uma quantidade maior de ensaios pode refinar ainda mais tais valores, tornando a análise mais robusta;
c) Assim como no caso dos indicadores ambientais, a visão de ciclo de vida para o cálculo do desempenho social não foi tratada. Uma sugestão seria aplicar possíveis bases de dados ou então, visitar e estudar tais empresas, para produzir o seu perfil de desempenho social;
d) A escolha dos aspectos de desempenho foi auxiliada por uma série de análises estatísticas. Essa iniciativa, embora positiva, deve ser adotada com reservas. É muito importante, que o especialista a conduzir a avaliação também tenha conhecimentos detalhados sobre o processo e suas trocas ambientais e sociais. Alguns aspectos não muito comuns podem ser cruciais em algumas análises, p.ex., empresas farmacêuticas devem priorizar o aspecto social que trata da saúde e segurança do cliente, mesmo que este apresentando uma freqüência de uso inferior a outros aspectos.

Portanto, o método desenvolvido e o resultado apresentado serviriam para iniciar um novo ciclo de pesquisas, estudos e decisões para a construção de um modelo de avaliação e de gestão que incluísse de forma mais estruturada outras partes da cadeia de valor. A idéia é integrar novos conceitos e ferramentas ao escopo do trabalho de pesquisa desenvolvido. A seguir estão algumas sugestões de trabalhos:

a) Passar a abordar o escopo de Gestão Sustentável da Cadeia de Suprimentos: a gestão sustentável da cadeia de suprimentos passou a assumir, além da função

tradicional de gerenciar o fluxo de informações, material e capital, também a função de criar valor sustentável para toda a cadeia;

b) Estudar e aplicar outras ferramentas de Gestão de Sustentabilidade: um exemplo seria a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida. Esse é um instrumento que registra, avalia e representa os impactos ambientais resultantes de produtos, processos ou de toda companhia. Como um instrumento de informação e decisão ambiental, forma a base para comparações, para objetivos como a identificação de fraquezas e para processos de comunicação;
c) Expandir o escopo de análise para o planejamento estratégico de sustentabilidade: Aplicar ferramentas como a matriz de materialidade, muito comum nas empresas avançadas em sustentabilidade, para gerenciar de forma efetiva os principais pontos que determinam decisivamente o desempenho em sustentabilidade da empresa.

Referências Bibliográficas

ARAUJO, J.B.; BOTTENE, A.C.; OLIVEIRA, J.F.G. Manufacturing processes sustainability management using concurrent report. In: **CIRP - 16th International Conference on Life Cycle Engineering**, 2009, Cairo. CIRP - 16th International Conference on Life Cycle Engineering, 2009.

ARAUJO, J.B.; OLIVEIRA, J.F.G. Proposal of a Methodology Applied to the Analysis and Selection of Performance Indicators for Sustainability Evaluation Systems. In: Curran, R.; Chou, S.Y.; Trappe, A. **Collaborative Product and Service Life Cycle Management for a Sustainable World**. London: Springer, August 31, 2008. Chapter 14, p. 593-600.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 6175:** Processos mecânicos de usinagem. Rio de Janeiro: 1971.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 6162:** Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais. Rio de Janeiro: 1989.

AZAPAGIC, A. Developing a *framework* for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. **Journal of Cleaner Production**, 12, 2004, p. 639-662.

BACKSTRÖM, T.; DÖÖS, M. The technical genesis of machine failures. **International Journal of Industrial Ergonomics**, Volume 19, Number 5, Maio, 1997 , pp. 361-376

BANISZEWSKI, B. **An environmental impact analysis of grinding**. Massachusetts Institute of Technology, B.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Cambridge, MA, USA., 2005.

BARBIERI, J.C. **Gestão ambiental empresarial**: conceitos, modelos e instrumentos. 2 ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2007, p.382.

BARE, J.C.; HOFSTETTER, P.; PENNINGTON, D.W.; UDO DE HAES, H.A. Midpoints versus Endpoints: The sacrifices and benefits. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 5, 6, 2000, p. 319-326.

BISSACCO, I.; SPINELLI, C.; MACCARRONE, P. The measurement of the degree of corporate social responsability of a firm. In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PERFORMANCE MEASUREMENT AND MANAGEMENT. **Proceedings**. 2006.

BRENT, A.C.; VAN ERCK, R.P.G.; LABUSCHAGNE, C. A sustainability cost accounting methodology for technology management in the process industry. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR THE MANAGEMENT OF TECHNOLOGY (IAMOT), Vienna, Austria. **Proceedings**. 2005.

BRENT, A.C.; PRETORIUS, M.W. Sustainable Development: A conceptual *framework* for the technology management. In: 16th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGEMENT OF TECHNOLOGY, **Proceedings**. 2007, p.623-642.

BRENT, A.C.; VAN ERCK, R.P.G.; LABUSCHAGNE, C**. Sustainability Cost Accounting**: Part 2 – A case study to demonstrate and assess the introduced monetary procedure to

evaluate the sustainability of technologies in the South African process industry. South African Journal Industrial Engineering, 2007.

CASCIO, J. **The ISO 14000 Handbook**. Fairfax: ASQ Quality Press, 1996.

CLARK, K. B.; WHEELRIGHT, S. C. **Managing new product and process development**: text and cases. New York: The Free Press, 1993.

DAHMUS, J.B.; GUTOWSKI, T.G. An environmental analysis of machining. In: ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND RD&D EXPO, 2004, Anaheim, California, USA. **Proceedings of IMECE2004**. 2004.

DATAFOLHA. **Bolsa de salários**, 2007. Disponível em: <http://datafolha.folha.uol.com.br/>. Acesso em 2 de novembro, 2009.

DELAI, I. **Uma proposta de modelo de referência para mensuração da sustentabilidade corporativa**. Dissertação (Mestrado em Análise Organizacional e Relações com o Ambiente) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2006.

DEWULF, W.; DUFLOU, J. Simplifying LCA Using Indicator Approaches - A *Framework*. In: CIRP SEMINAR ON LIFE CYCLE ENGINEERING. Copenhagen, Denmark. **Proceedings**. 2003

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da usinagem de materiais**. São Paulo: MM Editora, 1999.

DUSSAUGE, P.; HART, S.; RAMANANTSOA, B. **Strategic Technology Management**. Chichester: John Wiley, 1992. 218 p.

ELKINGTON, J. **Cannibals with Forks** – The Triple Bottom Line of 21st Century Business, Grabiola Island: New Society Publishers, 998.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY US. **Environmental Management System Implementation**: Guide for the Shipbuilding and Ship Repair Industry, 2003. Disponível em: <http://www.epa.gov/sustainableindustry/shipbuilding/module_05.pdf>. Acesso em: 18 de setembro, 2007.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY US. **Life Cycle Assessment**: Principles and Practices, 2006. Disponível em: <http:// www.epa.gov>. Acesso em: 18 de setembro, 2007.

EPSTEIN, M.J.; ROY, M. Sustainability in Action: Identifying and Measuring the Key Performance Drivers. **Long Range Planning**, 34, 2001, p. 585-604

ERMER, D.S. A century of optimizing machining operations. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 119, p. 817-822, 1997.

EXAME. **Guia Exame - Sustentabilidade 2008**. São Paulo: Editora Abril, 2008

FERRAZ JÚNIOR, F. **Desenvolvimento de um sistema de monitoramento e supervisão para o processo de torneamento.** Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

FIKSEL, J.; MCDANIEL, J.; MENDENHALL, C. **Measuring Progress towards Sustainability** Principles, Process and Best Practices. Ohio: Battelle Memorial Institute, 1999.

FERRARESI, D. **Usinagem dos metais**: fundamentos da usinagem dos metais. Sao Paulo: Edgard Blucher, 1995.

GARDNER, D.; CROSSA, J.A.; FONTEYNC, P.N.; CARLOPIOB, J.; SHIKDARD, A. Mechanical equipment injuries in small manufacturing business, **Safety Science**, vol.33, 1999, p.1-12.

GERWIN, D.; KOLODNY, H. **Management of Advanced Manufacturing Technology**. New York: John Wiley & Sons, 1992, 394p.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5ª. ed.. São Paulo: Editora Atlas, 1999, 207p.

GLOBAL REPORTING INITIATIVE. **Sustainability Reporting Guidelines**, 2006. Disponível em: < www.aeca.es/comisiones/rsc/documentos_fundamentales_rsc/gri>. Acesso em: 29 de outubro, 2007.

GOMES, L.; GOMES, C.F.S.; ALMEIDA, A.T. **Tomada de decisão gerencial**: Enfoque multicritério. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

GOMES, J.J.F. **Implementação de sistema automático de calibração dimensional em retificadoras CNC utilizando emissão acústica.** Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997, 80p.

GROOVER, M.P. **Fundamentals of Modern Manufacturing**. Hoboken, NJ : John Wiley, 2007, 1002p.

HAUSCHILD, M.; JESWIET, J.; ALTING, L. From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. In: CIRP MANUFACTURING TECHNOLOGY. **Annals**. 2005.

HAY, J.E.; NOONAN, M. **Anticipating the Environmental Effects of Technology**: A manual for decision-makers, planners and other technology *stakeholders*. United Nations Environment Program (Division of Technology, Industry and Economics), 2005.

INDEX. **Manual de manutenção mecânica INDEX GU 600**. Outubro, 1997.

INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS. **The sustainability metrics**: sustainable development progress metrics recommended for use in the process industries, 2002. Disponível em: < www.icheme.org>. Acesso em: 29 de outubro, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14004**: Environmental Management Systems - General guidelines on principles, systems and supporting techniques. Berlin: 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14031**: Environmental Performance Evaluation. Berlin: 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040**: Environmental Management – Life cycle assessment – Principles and *framework*. Geneva: 1997.

JANSSON, P.M.; PHAAL, R. **Progress Towards Sustainable Production**: Industrial and Academic Perspectives. In: 10th INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE GREENING OF INDUSTRY NETWORK. Göteborg. June 23-26, 2002.

JASCH, C. Environmental Performance Evaluation and Indicators. **Journal of Cleaner Production**, 2000.

JIN, X.; HIGH, K.A. **Application of Hierarchical Life Cycle Impact Assessment in the Identification of Environmental Sustainability Metrics**, 2004. Disponível em: <http://khigh.okstate.edu/Environment/suscad/research.htm>. Acesso em: 29 de outubro, 2008.

KALPAKJIAN, S. **Manufacturing engineering and technology**. 4 ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001, 1148p.

KITZES, J.; WACKERNAGEL, M. Answers to common questions in Ecological Footprint accounting. **Ecological Indicators**, 9, 2009, p. 812-817.

KLASSEN, R.D.; WHYBARK, D.C. The impact of environmental technologies on manufacturing performance. **Academy of Management Journal**, 1999.

KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; WEINERT, K. Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Process. In: General assembly of CIRP n55. Antalya, Turquia. CIRP **Annals**, 2005, p. 557-580.

KRAJNC, D; GLAVIC, P. A model for integrated assessment of sustainable development. **Resources, Conservation and Recycling**, 43, 2005, p. 189-208.

LABUSCHAGNE, C.; BRENT, A.C. Sustainable Project Life Cycle Management: The need to integrate life cycles in the manufacturing sector. **International Journal of Project Management**. 23 (2), 2005, p.159-168.

LABUSCHAGNE, C.; BRENT, A.C.; VAN ERCK, R.P.G. Assessing the sustainability performances of industries. **Journal of Cleaner Production**, 13, 2005, p. 373-385.

LAKOS, E.M.; MARCONI, M.A. **Metodologia do trabalho científico**. São Paulo: Atlas, 1992, 214p.

LUZ, S.O.C.; SELLITTO, M.A.; GOMES, L.P. Medição de Desempenho Ambiental baseada em Método Multicriterial de Apoio a Decisão Estudo de caso na Indústria Automotiva. **Revista Gestão & Produção**, 2006.

MALKIN, S. **Grinding Technology**. New York: Ellis Horwood Limited, 1989, 275p.

MICRO-QUÍMICA. **Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos** (Conforme NBR 14725), 2008.

NATURA COSMÉTICOS. **Relatório anual**, 2008. Disponível em:<http:// www.natura.ne/>. Acesso em: 9 nov. 2009.

OLIVEIRA, J.F.G. **Análise da ação do macroefeito de dressagem no desempenho do processo de retificação.** Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1988, 271p.

OLIVEIRA, J.F.G. **Tópicos avançados sobre o processo de retificação**. Apostila. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1998.

OLSTHOORN, X.; TYTECA, D.; WEHRMEYER, W.; Wagner, M. Environmental indicators for business: a review of the literature and standardization methods. **Journal of Cleaner Production**, 9, p. 453-463, 2001.

PÁDUA, E.M.M. **Metodologia da Pesquisa: abordagem teórica-prática**. 10. ed. Campinas: Papirus, 2004, 124p.

PAGELL, M., ZHAOHUI, W. Building a more complete theory of sustainable supply chain management using case studies from 10 exemplars. **Journal of Supply Chain Management**, 45, 2, 2009, p.37-56.

PARAGUASSÚ, L. Emissão de CO_2 pela indústria cresce 77% em 13 anos. **O Estado de São Paulo**, 2009. Disponível em: < http://www.estadao.com.br/>. Acesso em: 1 de fevereiro, 2010.

PARAMANATHAN, S.; FARRUKH, C.; PHAAL, R.; PROBERT, D. Implementing industrial sustainability: the research issues in technology management. **R&D Management,** 34, 5, p.527-537, 2004.

PARKIN, M. Workplace risk assessment. **Engineering Management,** August/September, 2007

PHALL, R.; FARRUKH, C.J.P. e PROBERT, D.R. Technology management process assessment: a case study. **International Journal of Operations and Production Management**, 21, 8, p. 1116-1132, 2001.

PHALL, R.; FARRUKH, C.J.P.; PROBERT, D.R. **Technology Roadmapping**: linking technology resources to business objectives. Cambridge: Centre for Technology Management, University of Cambridge, 2001 (Technical Report).

PORTER, M.E.; LINDE, C. **Green and Competitive**: Ending the Stalemate. Harvard Business Review. September-October, 1995.

PROBERT, D.; PHALL, R.; SHEHABUDDEN, N. From theory to practice: challenges in operationalising a technology selection *framework*. **Technovation**, 26, 2006, p. 324 – 335.

PUTNAM, D. **ISO 14031**: Environmental performance evaluation, 2002. Disponível em: < http://www.aipa.org/Adobe_Files/Conservation_Efficiency_Productivity_Etc/2002_09_ISO_14031_Environmental_Performance_Evaluation_David_Putnam.pdf>. Acesso em: 21 de agosto, 2007.

REY, L. **Planejar e redigir trabalhos científicos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1993, 318p.

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

SAATY, T.L. Decision Making with the analytic hierarchy process. **International Journal Services Sciences**, Vol.1, No.1, 2008, p.83-98.

SANDVIK COROMANT. **Catálogo principal**: Torneamento, Fresamento, Furação, Mandrilamento e Sistemas de Fixação, 2007.

SCHALTEGGER *et al.* **Sustainability management in business enterprises**. 2nd edition. Bonn: Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2002. 127p.

SCHWARZ, J.; BELOFF, B.; BEAVER, E. Use Sustainability Metrics to Guide Decision-Making. **Chemical Engineering Progress**, July, 2002.

SENAI. **Cursos**, 2009. Disponível em: < http://www.sp.senai.br/senaisp>. Acesso em: 02 de novembro, 2009.

SILVA, E.L.; MENEZES, E.M. **Metodologia da pesquisa e elaboração da dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

SIKDAR, S.K. Sustainable Development and Sustainability Metrics. **AIChE Journal**, 49, 8, August, 2003, p. 1928-1932.

SITARZ, D. (Editor). **Agenda 21**: The earth summit strategy to save our planet. Boulder: EarthPress, 1994.

SPANGENBERG, J.H.; BONNIOT, O. **Sustainability Indicators** - a compass on the road towards sustainability, 1998. Disponível em: <http://www.ulb.ac.be/ceese/STAFF/Tom/spangenberg.pdf>. Acesso em: 29 de outubro, 2007.

TANZIL, D.; MA, G.; BELOFF, B.R. Sustainability Metrics.11th International Conference of Greening of Industry Network. **Proceedings**. 2003.

THORESEN, J. Environmental Performance Evaluation - a Tool for Industrial Improvement. **Journal of Cleaner Production**, 7, p. 365-370, 1999.

TUGNOLI, A.; SANTARELLI, F.; COZZANI, V. An approach to quantitative sustainability assessment in the early stages of process design. **Environmental Science Technology**, 2008

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME, 1996. **Cleaner Production**: A training resource package. Paris: UNEP (Industry and Environment), 1996.

UNITED NATIONS. United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, Brazil. **Agenda 21**: Programme of Action for Sustainable Development. New York: United Nations, 1992.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI 4070**: Nachaltiges Wirtschaften in kleinen und mittelständischen Unternehmen: Anleitung zum Nachhaltigen Wirtschafen. Berlin: Beuth Verlag, 2006.

VELEVA, V.; HART, M; GREINER, T; CRUMBLEY, C. Indicators of sustainable production. **Journal of Cleaner Production**, 9, p. 447-452, 2001.

VELEVA, V.; ELLENBECKER, M. Indicators of sustainable production: *framework* and methodology. **Journal of Cleaner Production**, 9, p. 519-549, 2001.

WOODWARD, D.G. Life Cycle Costing – theory, information acquisition and application. **International Journal of Project Management**, 1997

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Cleaner Production and Eco-efficiency**: complementary approaches to sustainable development. Geneva: WBCSD, 1998.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Eco-efficiency creating more value with less impact**. Geneva: WBCSD, 2001

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Measuring Eco-efficiency.** Lisboa: WBCSD, 2000.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future**. Oxford: WCED, Oxford University Press; 1987.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.; ALTING, L. **Environmental Assessment of Products**. Bonton/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publishers, v.1 e 2, 1997.

WERKEMA, M.C.C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1995, 404p

ZEMA ZSELICS. **Curso de programação CNC GE Fanuc para retificação de diâmetros externos.** São Paulo: Zema Zselics Ltda, 2007.

Referências Bibliográficas Complementares

AKBARI, J.; OYAMADA, K.; SAITO, Y. LCA of Machine Tools with Regard to their Secondary Effects on Quality of Machined Parts. In: 2nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS DESIGN AND INVERSE MANUFACTURING. **Proceedings**. 2001, p. 347.

ALVES, S.M. **Adequação ambiental do processo de retificação através de um novo conceito de fluído de corte**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Handbook**, Volume 16, Machining. Materials Park, OH: ASM International, 1997.

ARSLAN, M.Ç.; ÇATAY, B; BUDAK, E. A decision support system for machine tool selection. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 15, 1, 2004, p. 101-109.

BUFFA, E.S.; SARIN, R.K. **Modern production/operations management**. 8th ed. New York: Wiley, 1987.

COTEC. **Tecnología e innovación en España**. Madrid: F. COTEC, 1998.

FABRYCKY, W.J.; BLANCHARD, B.S. **Life-cycle cost and economic analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, 1991.

HAUSCHILD, M.Z.; DREYER, L.C.; JORGENSEN, A. Assessing social impacts in a life cycle perspective - Lessons learned. **CIRP Annals** - Manufacturing technology, 2008.

JORGENSEN, A; LE BOCQ, A.; NAZARKINA, L; HAUSCHILD, M. Methodologies for Social Life Cycle Assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 13, 2, 2008, p. 96-103.

JUNG, H.S.; JUNG, H-S. Establishment of overall workload assessment technique for various tasks and workplaces. **International Journal of Industrial Ergonomics**, 28, 2001, p.341-353.

KENNEDY, M.E.; TRAMMELL, C.J. e WILSON, C.C. **Superior Product Development.** Cambridge: Blackwell Publishers, 1996.

KLOEPFFER, W. Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). **International Journal of Life Cycle Assessment**, 13, 2, 2008, p.89-95

MARINELLI FILHO, N. **Desenvolvimento de uma metodologia para a seleção de processos de manufatura considerando aspectos financeiros e tecnológicos**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2001.

MARINELLI FILHO, N.; OLIVEIRA, J. F. G.; SOARES FILHO, J. C. Grinding or hard-turning? An approach for the selection of machining processes. **Abrasives Magazine**, n. 03, 2001, p. 22-29.

MERRIAM-WEBSTER ON LINE SEARCH. **Merriam-Webster Dictionary**, 2008. Disponível em: < http://www.merriam-webster.com/dictionary>. Acesso em: 16 de dezembro, 2008.

PRESCOTT-ALLEN, R. **Barometer of Sustainability**. New York: John Wiley & Sons, 1997.

SELIGER, G.; SEVERENGIZ, S.; JOHNSON, C; ARAUJO, J.B.; OLIVEIRA, J.F.G. Scenario-based Technology Paths and Sustainability Performance Measurement. In: GLOBAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE PRODUCT DEVELOPMENT AND LIFE CYCLE ENGINEERING. **Proceedings**. Busan, Korea, 2008.

SILVESTRI, L.A. **Desenvolvimento de um modelo para avaliação de sites de comércio eletrônico utilizando a metodologia multicritério de apoio a decisão - MCDA.** 196f. Dissertação (mestrado em Engenharia de Produção). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SÁNCHEZ, L.E. **Avaliação de Impacto Ambiental**: conceitos e métodos. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, 495p

SOARES FILHO, J.C. **Influência do sobremetal para a escolha da operação ideal de usinagem: torneamento x retificação**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

SOARES, D.D. **Desenvolvimento de um sistema de apoio ao diagnóstico para processos de retificação**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

TAKEDA, A. **Levantamento de métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) e análise comparativa dos métodos mais utilizados**. Monografia de conclusão de curso. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

UTNE, I.B. Life cycle cost (LCC) as a tool for improving sustainability in the Norwegian fishing fleet. **Journal of Cleaner Production**, 2008.