UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

JOSÉ CARLOS DA SILVA SANTOS

INTEGRAÇÃO DA TÉCNICA SEIS SIGMA (DMAIC) COM MÉTRICAS AMBIENTAIS PARA A BUSCA DE MELHORIAS NA ECOEFICIÊNCIA DE UM PROCESSO INDUSTRIAL

São Paulo
2013

JOSÉ CARLOS DA SILVA SANTOS

INTEGRAÇÃO DA TÉCNICA SEIS SIGMA (DMAIC) COM MÉTRICAS AMBIENTAIS PARA A BUSCA DE MELHORIAS NA ECOEFICIÊNCIA DE UM PROCESSO INDUSTRIAL

Dissertação apresentada ao programa de mestrado em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Prof. Wagner Cezar Lucato, Dr. - Orientador

São Paulo

2013

JOSÉ CARLOS DA SILVA SANTOS

INTEGRAÇÃO DA TÉCNICA SEIS SIGMA (DMAIC) COM MÉTRICAS AMBIENTAIS PARA A BUSCA DE MELHORIAS NA ECOEFICIÊNCIA DE UM PROCESSO INDUSTRIAL

Dissertação apresentada ao programa de mestrado em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

São Paulo, 29 de janeiro de 2013.

Presidente: Prof. Wagner Cezar Lucato, Dr. - Orientador, UNINOVE

Membro: Prof. João Amato Neto, Dr. – Escola Politécnica - USP

Membro: Prof. Milton Vieira Júnior, Dr. - UNINOVE

UNINOVE

Universidade Nove de Julho

São Paulo, 29 de janeiro de 2013.

TERMO DE APROVAÇÃO

Aluno: JOSÉ CARLOS DA SILVA SANTOS

Título da Dissertação: INTEGRAÇÃO DA TÉCNICA SEIS SIGMA (DMAIC) COM MÉTRICAS AMBIENTAIS PARA A BUSCA DE MELHORIAS NA ECOEFICIÊNCIA DE UM PROCESSO INDUSTRIAL.

Presidente: PROF. DR WAGNER CEZAR LUCATO_____

Membro: PROF. DR. JOÃO AMATO NETO_____

Membro: PROF. DR. MILTON VIEIRA JUNIOR_____

Em primeiro lugar dedico este trabalho a Deus, que sempre me deu força para vencer os desafios.

Ao meu pai Edivaldo, minha mãe Vera e as minhas irmãs Viviane e Isabele, que sempre acreditaram em mim.

A minha querida esposa Roselaine e meu filho Matheus, que em todos os momentos me incentivam a vencer os desafios.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela saúde, força e motivação para a continuidade dos estudos.

A Roselaine, companheira, mãe do meu belíssimo filho Matheus, agradeço pela paciência e motivação para realização deste trabalho, a quem me ouviu e sequer me deixou pensar em desistir desse trabalho.

Ao meu orientador professor Dr. Wagner Cezar Lucato, pela a orientação, estímulo e motivação durante o trabalho e acima de tudo o suporte prestado nas minhas maiores dificuldades.

Ao Prof. Dr. Milton Vieira Junior, que contribuiu muito para elaboração deste trabalho, dando suporte, apoio e motivação.

Aos meus amigos, Ricardo Utiyama, Felipe Paoli e Mauricio T. Nishikawa que me motivaram a fazer este trabalho.

A minha sogra Maria e meu sogro José Aparecido, que sempre me apoiaram nos estudos, incentivando a cada dia estudar mais.

Aos meus cunhados, Marcio e Rosicleia que me incentivaram a realizar este trabalho.

A todos os professores do programa de mestrado da UNINOVE que de alguma forma contribuíram com esta dissertação.

Agradeço também a Universidade Nove de Julho pela oportunidade de cursar este programa de Mestrado.

Agradeço, enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para realização desta dissertação.

RESUMO

A cada dia o mercado está mais competitivo. As organizações têm reformulado suas estratégias e estão oferecendo produtos e serviços que os clientes reconhecem superiores em preço, desempenho, qualidade, entrega e que causem menos impactos ao meio ambiente. Os resultados expressivos alcançados por diferentes organizações ao adotar os procedimentos Seis Sigma têm dado contribuições significativas nessa direção. Por outro lado, o estudo da literatura que trata do tema mostra que maioria dos projetos Seis Sigma aplicados na indústria tem se dado na busca por melhorias nos processos industriais, com foco na otimização do tempo de fabricação dos produtos. Em paralelo, mundialmente as organizações vêm se preocupando com as questões ambientais, buscando produzir maior quantidade com o menor consumo de insumos e menor impacto ao meio ambiente. O objetivo principal deste trabalho é propor um procedimento que incorpore as variáveis ambientais nas fases do DMAIC *(define, measure, analyze, improve and control)* da técnica Seis Sigma, cujo foco, além da melhoria do processo, seja também o aumento do nível da ecoeficiência de um processo industrial e, como consequência, da empresa como um todo. Para alcançar essa meta, se fez necessária também a proposição de um indicador que permita a medição global da ecoeficiência por meio de um único índice. Para possibilitar a verificação da viabilidade de aplicação dos conceitos aqui propostos a situações do mundo real, o procedimento proposto neste trabalho foi aplicado a um processo de usinagem de uma empresa do ramo metal-mecânico. Os resultados alcançados por este trabalho permitem concluir que a inclusão das variáveis ambientais como parte do procedimento Seis Sigma pode contribuir de maneira significativa para o aumento do nível de ecoeficiência de um processo de fabricação e, como resultado, da empresa considerada em seu todo.

Palavras chave: ACV, DMAIC, Ecoeficiência, Gerenciamento ambiental, ISO14001, Seis Sigma.

ABSTRACT

Currently companies in general face a fierce competition in the market. Organizations have reshaped their strategies and are offering products and services that customers recognize superior in price, performance, quality, delivery and causing less significant impacts to the environment. The impressive results achieved by several companies through the Six Sigma methodology, has motivated other organizations to follow their footsteps in search of competitiveness and process improvement. As noticed in the literature, most Six Sigma projects implemented in manufacturing have taken place in process improvement, focusing mostly on optimizing product cycle times. On the other hand, worldwide organizations have been worrying about environmental issues, seeking to produce more with lower consumption of raw materials and lower environmental impact. The main objective of this study is to propose a procedure incorporating environmental variables into the DMAIC phases of Six Sigma methodology to expand its usual focus beyond the conventional process improvements. The goal is to use the Six Sigma procedure to also improve the eco-efficiency level of an entire manufacturing process. For that it was necessary to propose a single indicator to measure eco-efficiency. To verify the possibility of applying the proposed procedure to real-life situations it was applied to a machining process of a metal-mechanic company. The results achieved by this study enable to demonstrate that the procedure applied in an actual case, can significantly contribute to the increase of the ecoefficiency level of a manufacturing process.

Key-words: LCA, DMAIC, Eco-efficiency, Environmental management, ISO14001, Six Sigma.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A estrutura do trabalho 21
Figura 2 - Procurando oportunidades ecoeficientes 38
Figura 3 - Ilustração simplificada da abordagem ACV. 39
Figura 4 - Estrutura de ACV NBR ISO 14040 40
Figura 5 - Desenvolvimento dos projetos com pesquisa-ação 52
Figura 6 - Gráfico tipo radar formado pelos n indicadores de desempenho para medir a ecoeficiência do equipamento M 54
Figura 7 - Leiaute ilustrativo do processo de usinagem 60
Figura 8 - Característica do Torno CNC Nexus 100 – II 62
Figura 9 - Característica do Torno CNC Nexus 250 – II 62
Figura 10 - Característica do Torno CNC Turn 6G 62
Figura 11 - Característica do Torno CNC BND 63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Patrocinadores e especialistas 26
Quadro 2 - Fase "*Define*" do DMAIC 28
Quadro 3- Fase "*Measure*" do DMAIC 29
Quadro 4- Fase "*Analyze*" do DMAIC 30
Quadro 5- Fase "*Improve*" do DMAIC 31
Quadro 6- Fase "*Control*" do DMAIC 33
Quadro 7- Estrutura da norma NBR ISO 14001:2004 42
Quadro 8- Exemplo de indicadores de desempenho ambiental. 45
Quadro 9- Lista de aspectos e exemplos de indicadores (valor do produto/ serviço). 48
Quadro 10- Lista de aspectos e exemplos de indicadores (influência ambiental). 49
Quadro 11- Máquinas x peças 60
Quadro 12- Exemplo de *Project Charter* considerando as variáveis de processo e também as ambientais 67
Quadro 13- *Project Charter* do projeto 26/12 72
Quadro 14- Plano de medição 73
Quadro 15 - Plano de controle 75
Quadro 16 - *Project Charter* do projeto 27/12 78
Quadro 17 - Plano de medição 2 79
Quadro 18 - Plano de controle (projeto 27/12) 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Medição da ecoeficiência 47
Tabela 2 - Indicadores de desempenho para o cálculo da ecoeficiência dos tornos CNC 63
Tabela 3 - Ecoeficiência antes do projeto seis sigma 71
Tabela 4 - Tempo de ciclo em minutos por peça 76
Tabela 5 - Ecoeficiência depois do projeto seis sigma tradicional 76
Tabela 6 - Ecoeficiência depois do projeto seis sigma modificado (Eco-Six Sigma) 82
Tabela 7 - Tempo de ciclo em minutos por peça (fase 2 do estudo) 82
Tabela 8 - Evolução do nível de ecoeficiência 83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Análise do Ciclo de vida

ANOVA - Análise de Variância

CEP – Controle Estatístico do Processo

CNC – Comando Numérico Computadorizado

CTQ - Características Críticas para a Qualidade

DOE - Delineamento de Experimentos

DMADV - *Define, Measure, Analyze, Design, Verify*

DMAIC - *Define, Measure, Analyze, Improve and Control*

FMEA – *Failure Mode and Effects Analysis*

GEE – Emissões de Gases Efeito Estufa

LCA – *Life Cycle Assessment*

LCC – *Life Cycle Cost*

MINITAB – Software Estatístico

MRI – *Midwest Research Institute*

MSA – Sistema de Análise de Medição

QFD – *Quality Function Deployment*

R&R – Repetitividade e Reprodutibilidade

SDCO – Emissões de Substâncias Deterioradoras da Camada de Ozônio

SETAC – *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*

SIPOC - *Supplier, Input, Process, Output, Customer*

SGA – Sistema de Gestão Ambiental

VOC - Voz do Cliente

WBCSD - *World Business Council for Sustainable Development*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 15
1.1. Problema de pesquisa 18
1.2. Objetivos 18
1.2.1. Geral 18
1.2.2. Específicos 18
1.3. Justificativa para Estudo do Tema 19
1.4. Metodologia 20
1.5. Estrutura do Trabalho 20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22
2.1. O método Seis Sigma 22
2.2. O DMAIC 26
2.2.1. Aplicação do DMAIC 34
2.3. Ecoeficência 35
2.4. Análise do ciclo de vida 38
2.5. Sistema de gestão ambiental (SGA) 41
2.6. Indicadores de desempenho ambiental 43
3. MÉTODOS DE PESQUISA 50
3.1. A escolha do método de pesquisa 50
3.2. A medida do nível de ecoeficiência 52
3.3. A medida do nível de ecoeficiência de um processo industrial 53
3.3.1. A medida do nível de ecoeficiência de uma fase do processo 54
3.3.2. A medida do nível de ecoeficiência de uma área de processo 57
3.4. O planejamento da ação 59
4. PROCEDIMENTO DE INTEGRAÇÃO DA TÉCNICA SEIS SIGMA (DMAIC) COM METRICAS AMBIENTAIS 65
5. A PESQUISA-AÇÃO 70
5.1. O nível de ecoeficiência antes do projeto Seis Sigma 70
5.2. O nível de ecoeficiência com a implantação do projeto Seis Sigma sem considerar as variáveis ambientais 71
5.3. Nível de ecoeficiência considerando as variáveis ambientais 77
5.4. Comparação dos níveis de ecoeficiência nas duas fases da pesquisa-ação 82

6. CONCLUSÃO 84
REFERÊNCIAS 86

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial observado nas décadas recentes tem trazido contribuições significativas para o desenvolvimento econômico, porém isso também tem gerado efeitos negativos uma vez que a cada ano aumentam os danos ao meio ambiente (CALIA et al., 2009). Em meio à competitividade e a pressões em relação à proteção ao meio ambiente as empresas vêm se preocupando, cada vez mais, com as questões ambientais. Segundo Setthasakko (2010), as empresas estão mais conscientes do fato de que cada processo operacional tem o potencial de produzir um impacto negativo sobre os sistemas ambientais e sociais. As empresas estão começando a desenvolverem práticas e ferramentas de melhorias ambientais que as tornem mais ambientalmente conscientes. Esse fenômeno infere que as empresas estão percebendo que a consciência ambiental pode ser uma fonte de vantagens competitivas (RIBEIRO, AIBAR-GUZMAN, 2010), o que tem feito com que as empresas busquem produzir mais, gastando menos recursos e agredindo menos o meio ambiente, ou seja, tornando-se mais ecoeficientes.

Segundo Vellani e Ribeiro (2009), a ecoeficiência significa integrar o desempenho ambiental com o desempenho econômico. Desta forma, os gastos com as atividades ambientais deveriam gerar benefícios financeiros. Para *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD, 1996), a organização alcança a ecoeficiência por meio do fornecimento de bens e serviços a preços competitivos, satisfazendo as necessidades humanas, promovendo a qualidade de vida e reduzindo os impactos ambientais. Ainda segundo o WBCSD (2000a), uma forma de medir a ecoeficiência é dividir o valor do produto ou serviço pela sua influência ambiental. Os indicadores de aplicação genérica para o valor do produto ou serviços mais frequentemente usados são: quantidades de produtos ou serviços fornecidos aos clientes e vendas líquidas. Para a influência ambiental, os mais comuns são: consumo de energia elétrica, consumo de água, e consumo de materiais. Com base nessas variáveis, as empresas devem considerar três objetivos para ecoeficiência: a redução do consumo de recursos, a redução do impacto no meio ambiente por meio da disposição adequada dos resíduos e a melhoria do valor do produto ou serviço, inclusive prolongando a sua vida útil a fim de minimizar a utilização de recursos naturais WBCSD (2000b).

Por outro lado, a cada dia o mercado está mais competitivo e a técnica Seis Sigma vem ganhando espaço nas organizações, com seu método bastante eficaz para solução de problemas estruturais por meio da redução da variabilidade dos processos. Segundo Calia et al. (2009), a Motorola criou a técnica Seis Sigma por volta de 1986, como forma de aumentar

a sua competitividade por meio da melhoria do seu nível de qualidade. Segundo Nair (2011) antes da técnica Seis Sigma, a Motorola gastava parte substancial de sua receita para corrigir problemas de má qualidade, gerando despesas anuais adicionais da ordem de US$ 800 milhões. Após a implementação da técnica Seis Sigma, a Motorola economizou aproximadamente US$ 2,2 bilhões em quatro anos. Desde então, a técnica Seis Sigma evolui conceitualmente e ganha mais abrangência, no que tange às ações estratégicas e gerenciais necessárias para sua implantação.

Para alcançar esses resultados, a técnica Seis Sigma, por meio de seu método estruturado, busca de forma rápida e eficiente uma série de benefícios para as empresas, tais como: melhoria da qualidade, aumento da satisfação dos clientes, aumento expressivo da lucratividade, redução da variabilidade do processo e maior envolvimento das equipes de trabalho (ROTONDARO, 2010). De acordo com Werkema (2010) a técnica Seis Sigma utiliza-se de um procedimento denominado DMAIC, letras essas que correspondem às iniciais das 5 etapas que a formam: *Define* (definir), *Measure* (medir), *Analyze* (analisar), *Improve* (melhorar) e *Control* (controlar). Explicando em maior detalhe: na primeira, "*Define"* é envolvida uma equipe conduzida pelo líder denominado *Black Belt*. Nesta etapa, a equipe define as oportunidades de ganhos do projeto e delimita o seu escopo. Na fase *"Measure"* a equipe define o plano de medição para coleta de dados que serão analisados e na fase *"Analyze"* a equipe do projeto faz a identificação das prováveis causas raiz e correlações com os problemas, utilizando poderosas ferramentas estatísticas comumente apoiadas no software Minitab® ou equivalente. Após a análise estatística dos dados, na fase *"Improve"* a equipe executa as melhorias no processo baseado nas causas detectadas e validadas na fase anterior. Na última fase do DMAIC o *"Control"* a equipe cria e um plano de controle para que o projeto em questão seja monitorado com seus resultados perpetuados ao longo dos anos. Nesta fase é colocado normalmente como responsável o *"Process Owner"* (Proprietário do Processo) para garantir o cumprimento do plano de controle para que os resultados alcançados se mantenham. A técnica Seis Sigma com essa estrutura de buscar a melhoria contínua por meio da redução da variabilidade do processo nas empresas, tem feito com que inúmeras empresas alcancem sucessos significativos, resultando em milhões de dólares, conforme Hilton at al (2012), como ilustram alguns exemplos:

- A General Eletric, após a implementação da técnica Seis Sigma entre 1995 e 2002, conseguiu economizar cerca de US$ 8 bilhões. Só em 1999, por causa do programa implementado, a empresa economizou mais de US$ 1,5 bilhão. Segundo o

então Diretor Executivo da empresa, Jack Welch, a implementação da técnica Seis Sigma foi *"a mais importante iniciativa que a GE já tomou"* (ROTANDARO, 2010).

- A Allied Signal estava alguns anos à beira da falência. Iniciou então a implementação da técnica Seis Sigma em 1994 e, depois disso, conseguiu reduzir seus custos em US$ 2 bilhões até 1998. Além disso, conseguiu nesse ano um crescimento de 12% e no primeiro trimestre de 1999, 14,1% (ROTONDARO, 2010) .
- A Motorola estima que conseguiu economizar mais de US$ 11 bilhões em um pouco mais de 10 anos com a implementação da técnica Seis Sigma (ROTONDARO, 2010) .

A técnica Seis Sigma, ainda segundo Rotondaro (2010), é aplicável a processos técnicos e não técnicos. O processo de fabricação é visto como técnico. Nesse processo, têm-se entradas como: peças, montagens, produtos, matérias-primas. As saídas são normalmente um produto final. No processo técnico, o fluxo do produto é muito visível e tangível, razão pela qual existem muitas oportunidades para a coleta de dados variáveis e medições (SLACK, 1999). Em contrapartida, um processo não técnico é muito mais difícil de ser visualizado. Processos não técnicos são processos administrativos, de serviços ou transações, e neles, as entradas podem não ser tangíveis. Conforme Slack (1999), esses certamente também são processos. Tratando-os como tal, é possível entendê-los melhor e determinar suas características, otimizá-los, controlá-los, eliminando a sua possibilidade de erros ou falhas. A geração de um orçamento, por exemplo, é um processo administrativo, vender um produto por telefone é um processo de serviço, assim como fazer um financiamento de um veiculo é um processo de transação. Em sua grande maioria as empresas optam por realizar projetos para reduzir a variabilidade dos processos de fabricação, como: redução do tempo de ciclo, redução do tempo de setup, melhoria da qualidade, etc.

No entanto, observa-se que nas aplicações práticas da técnica Seis Sigma realizadas nas empresas muito dificilmente são considerados os aspectos ambientais nas avaliações das variáveis estudadas ou nos objetivos de melhoria estabelecidos. De fato, as ações visam, em geral, as variáveis de processo como tempo de ciclo, níveis de perdas, utilização dos equipamentos ou da mão de obra etc. Embora relevantes, os aspectos ambientais não têm sido ponderados, o que pode representar uma oportunidade para ampliar a aplicação da técnica Seis Sigma. Este será o foco do presente trabalho.

1.1. Problema de pesquisa

Diante dessa situação, surge como oportunidade de pesquisa tentar responder à seguinte questão não resolvida:

A aplicação de um projeto Seis Sigma integrado a métricas ambientais em um processo produtivo industrial pode resultar na melhoria no nível da ecoeficiência desse processo e, como resultado, da empresa como um todo?

Como premissa básica de resposta provável e provisória à questão acima enunciada, esta dissertação sugere a seguinte proposição aparente:

Se for possível definir uma grandeza que meça a ecoeficiência de um processo industrial, então será possível aplicar a esse processo a técnica Seis Sigma com a consideração das variáveis ambientais de modo a poder avaliar a questão de pesquisa inicialmente formulada.

1.2. Objetivos

Para poder responder à questão proposta por esta dissertação, e avaliar a proposição aparente estabelecida, este trabalho busca os objetivos gerais e específicos como seguem:

1.2.1. Geral

O objetivo geral desta dissertação é integrar a técnica Seis Sigma (DMAIC) com métricas ambientais com foco na melhoria do nível de ecoeficiência de um processo industrial e da empresa como consequência.

1.2.2. Específicos

Para isso três objetivos específicos podem ser propostos:

- *Estabelecer um procedimento para a medição do nível de ecoeficiência de um processo industrial* – Em geral, as medidas da ecoeficiência abrangem a empresa considerada em seu todo, conforme propõe o WBCSD (2000a). Ainda, essa medição é feita por um conjunto de indicadores, sem o estabelecimento de uma grandeza única que possa mensurar o grau de ecoeficiência da empresa num determinado momento.

No entanto, este trabalho procurará demonstrar que também é possível conceituar a ecoeficiência para apenas um processo industrial, e mais, irá propor uma grandeza denominada nível de ecoeficiência do processo analisado que permitirá avaliar seu o grau de ecoeficiência, utilizando como base os indicadores selecionados. Esse desenvolvimento estará detalho no Capitulo 3 – Métodos de pesquisa;

- *Estabelecer um procedimento para integrar as métricas ambientais à técnica Seis Sigma, especificamente ao DMAIC* – Esse processo servirá para identificar em que fases devem ser introduzidas as métricas ambientais e em que estágios elas devem ser medidas, analisadas e melhoradas. Também devem ser identificadas as ferramentas que poderão auxiliar na redução da variabilidade do processo e na melhoria das respectivas condições ambientais. Tais considerações reestruturarão o DMAIC de forma que torne o processo também mais ecoeficiente.
- *Desenvolver uma pesquisa-ação* – Para avaliar a aplicabilidade do procedimento proposto em situações do mundo real, ele será aposto a um processo industrial por meio do desenvolvimento de uma pesquisa-ação em duas fases subsequentes: na fase 1, será medida a ecoeficiência desse processo antes de se aplicar o projeto Seis Sigma (EE1). Em seguida, será aplicado ao processo escolhido o DMAIC convencional, sem considerar as variáveis ambientais, quando então e será medido o novo grau de ecoeficiência desse processo (EE2). Na fase 2, o DMAIC modificado, considerando agora as variáveis ambientais, será aplicado sobre mesmo processo, determinando-se então o seu novo nível da ecoeficiência (EE3). Os resultados obtidos serão comparados para se verificar se existe diferença significativa entre o nível de ecoeficiência sem as considerações ambientais (EE2) e aquele obtido após a incorporação das variáveis ambientais ao DMAIC (EE3).

1.3. Justificativa para Estudo do Tema

Basicamente a técnica Seis Sigma serve para reduzir a variabilidade de um processo. Atinge-se um nível Seis Sigma quando um processo tem apenas 3,4 defeitos por milhão de oportunidades. Como descrito, suas aplicações têm sido focadas, em geral, sobre as variáveis do processo, sem ênfase específica às questões ambientais. Por outro lado, um fator relevante para as empresas no presente são os temas ecológicos associados ao fator econômico: produzir mais gastando menos e minimizando os impactos ambientais significativos. A cada dia, fica mais evidente a determinação da sociedade para exigir das empresas o

desenvolvimento das suas atividades sem afetar negativamente o meio ambiente. Dessa forma, as empresas preocupadas em atender as necessidades dos clientes e as demandas da sociedade, buscam por ferramentas de melhoria que sejam não só relacionadas aos seus processos de produção como também ao favorecimento dos quesitos ambientais. Assim, a integração da técnica Seis Sigma (DMAIC) com métricas ambientais tem como propósito, durante a execução de um projeto de melhoria do processo, diminuir também os impactos resultantes das atividades industriais sobre o meio ambiente, fazendo com que o processo seja mais ecoeficiente, ou seja, que a empresa possa produzir mais, com mais qualidade, gastando menos recursos e agredindo menos o meio ambiente.

1.4. Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho foi inicialmente o levantamento bibliográfico das informações referentes ao assunto e a realização da pesquisa-ação.

A revisão bibliográfica foi realizada sobre os temas que envolvem a técnica Seis Sigma, DMAIC, Ecoeficiência, Análise do Ciclo de Vida, Sistema de Gestão Ambiental e Indicadores de Desempenho, com foco em melhoria do processo e meio ambiente.

Em seguida esta dissertação desenvolveu dois conceitos teóricos: a) a proposição de um indicador único para medir o nível de ecoeficiência de um processo industrial e b) a proposta de integração das variáveis ambientais ao DMAIC, como forma de introduzir a consideração dos aspectos ambientais ao procedimento Seis Sigma.

Para verificar a possibilidade de aplicação desses conceitos a situações do mundo real, desenvolveu-se também uma pesquisa-ação, pois a pretensão do trabalho foi de resolver uma questão na qual o pesquisador participa diretamente da equipe para a resolução do problema.

A metodologia será detalhada no capítulo 3.

1.5. Estrutura do Trabalho

Para alcançar os objetivos propostos por este trabalho, esta dissertação envolverá seis capítulos dos quais o primeiro é esta Introdução. A seguir, faz-se uma revisão bibliográfica que tem por objetivo identificar o estado da arte dos conceitos relacionados ao tema em estudo, além de buscar determinar as lacunas existentes na literatura que poderão constituir-se em oportunidades adicionais de pesquisa a serem consideradas neste desenvolvimento. No terceiro capítulo, será definido o método de pesquisa, seus respectivos procedimentos e a

proposta de uma medida única que caracterize o nível de ecoeficiência de um processo industrial. No capítulo seguinte será proposto um procedimento para integrar as métricas ambientais à técnica Seis Sigma. Na sequência será realizada uma pesquisa-ação, na qual será testada a aplicabilidade do procedimento proposto no capítulo anterior a situações do mundo real. Finalmente, no capítulo 6, serão estabelecidas as conclusões do presente trabalho, com indicação complementar das suas limitações e oportunidades de pesquisas futuras. A estrutura desta dissertação pode ser resumidamente descrita conforme a Figura 1.

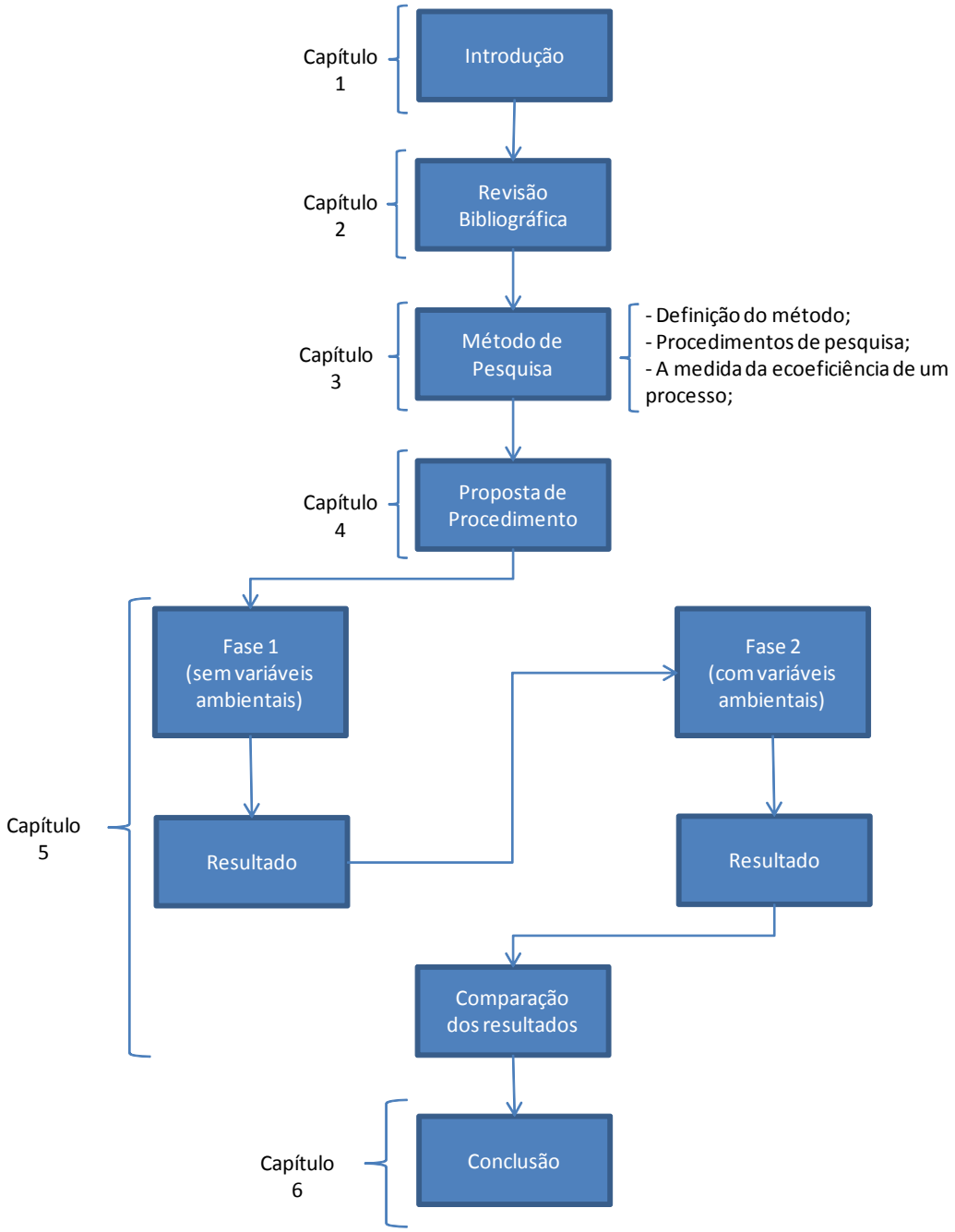


Figura 1 - A estrutura do trabalho

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será feita a revisão da literatura que trata dos temas centrais deste trabalho: técnica Seis Sigma, ecoeficiência, análise do ciclo de vida, sistemas de gestão ambiental e indicadores de desempenho ambiental. Seu objetivo será identificar o estado da arte para os temas abordados, bem como localizar lacunas não cobertas pela literatura que possam ser utilizadas como abordagens adicionais para esta dissertação.

2.1. O método Seis Sigma

A filosofia Seis Sigma teve a sua origem na década de 80 na Motorola. Conforme Calia et al. (2009), a Motorola criou a técnica Seis Sigma a fim de aumentar a sua competitividade contra as empresas japonesas na indústria eletrônica, melhorando seu nível de qualidade. Naquela época as empresas americanas acreditavam que a qualidade custava caro, e contrariando esse princípio, a pioneira na técnica Seis Sigma teve uma visão diferente, pois percebeu que quando um produto era produzido corretamente, essa melhoria da qualidade acabava reduzindo os custos e aumentando a lucratividade. De acordo com Nair (2011) antes da implantação da técnica Seis Sigma na década de 80 a Motorola, gastava cerca de 5 a 20% de sua receita para corrigir problemas de má qualidade, que resultavam em cerca de US$ 800 milhões por ano de despesas. Após a implementação da filosofia Seis Sigma, economizou-se aproximadamente US$ 2,2 bilhões em quatro anos.

Logo após implementação da técnica Seis Sigma pela Motorola, segundo Santos (2010), verificou-se ser esta uma iniciativa voltada para o controle da qualidade total, cuja ênfase é dada pela satisfação dos clientes e na eliminação de falhas e erros nos processos produtivos. Desde então, a técnica Seis Sigma evolui conceitualmente e garante mais abrangência, no que tange às ações estratégicas e gerenciais necessárias para sua implantação.

Apesar de sua implementação ter sido iniciada pela Motorola, sua divulgação para o mercado foi feita por meio da General Electric, que foi uma das primeiras a adotar procedimento Seis Sigma, divulgando-a por meio de diversas publicações mostrando os seus ganhos e o sucesso com o procedimento implementado. A General Electric, reportou resultados de mais de 300 milhões de dólares durante o primeiro ano de utilização da técnica Seis Sigma. Isso incentivou as grandes empresas como: Caterpillar, Nokia, Siemens, Ford e Volvo a seguirem os mesmos passos, rumo ao sucesso financeiro, segundo Pfeifer (2004). A técnica Seis Sigma segundo Kumar et al (2009), ficou conhecido em muitos países devido a

sua capacidade em melhorar o desempenho de um processo, reduzir defeitos em produtos e serviços, reduzindo a variabilidade dos processos, bem como os custos operacionais. Os resultados alcançados pela técnica Seis Sigma resultam em uma maior satisfação dos clientes e afeta diretamente a lucratividade e a sobrevivência das organizações de acordo com Antony et al (2005).

A técnica Seis Sigma é um procedimento estruturado para a resolução de problemas, que se utiliza de poderosas ferramentas estatísticas, segundo Rotondaro (2010) e Werkema (2010). Por meio de seu método estruturado é possível reduzir a variabilidade dos processos, alcançando objetivos estratégicos planejados. De acordo com Werkema (2010), a filosofia Seis Sigma enfoca os objetivos estratégicos da empresa e estabelece que todos os setores chaves para sobrevivência e sucesso futuro da organização possuam metas de melhoria baseadas em métricas quantificáveis, que serão atingidas por meio do procedimento de aplicação. Porém, a literatura apresenta outras definições.

A primeira, de acordo com Goh e Xie (2004) e McAdam e Evans, (2004), afirma que a técnica Seis Sigma é um conjunto de ferramentas estatísticas utilizadas para melhoria do processo, tendo como objetivo alcançar o nível Seis Sigma por meio da tradução do requisito crítico do cliente para requisito de característica crítica para a qualidade. Para Chakrabarty e Tan (2007), a técnica Seis Sigma é uma filosofia de gestão operacional que pode ser compartilhada entre clientes, fornecedores, acionistas e funcionários. Não é aplicável somente à produção, pois pode também ser utilizado por toda cadeia incluindo a prestação de serviço. Já para Pheng e Hui (2004), a técnica Seis Sigma é descrito como uma cultura empresarial, contendo não apenas ferramentas estatísticas, mas também um envolvimento dos funcionários e, um compromisso com a gestão. Para Markarian (2004), á técnica Seis Sigma é um procedimento baseado em fatos, que exige uma analise detalhada e um plano de controle robusto para garantir o controle do processo.

Em outra definição, a técnica Seis Sigma é considerada, um procedimento de análise baseado em método científico. É definida por Banuelas e Antony (2004) e Thawani (2004), como um procedimento estruturado para redução da variabilidade do processo e melhoria contínua. Por outro lado, Harry (2000) propõe que a técnica Seis Sigma não seja apenas um programa de melhoria da qualidade, mas primariamente uma iniciativa de negócios que tem seu foco na redução do risco, sendo muito mais do que apenas redução de defeitos ao minimizar os riscos de falhas a que os clientes estarão expostos ao receber produtos.

O foco da técnica Seis Sigma é diminuir o custo da não qualidade, por meio da redução da variabilidade dos processos, que pode ser expressa pelos números de desvios

padrão e designada como nível sigma (σ), na qual usualmente utiliza-se a medição em número de defeitos em um milhão de oportunidades. Quando medida no processo, a qualidade 3 sigmas significa que 93,3% dos produtos são gerados com a qualidade esperada, enquanto o nível Seis Sigma denota que há no máximo 3,4 defeitos em um milhão de oportunidades. Assim, 99,99966% dos produtos têm a qualidade esperada (PANDE; NEUMAN; CAVANAGH (2001); GEORGE (2004)).

O projeto de melhoria baseado na filosofia Seis Sigma é, em geral, conduzido por especialistas (chamados *Black Belts* ou *Green Belts*), que lideram as equipes Seis Sigma com base nos métodos DMAIC (*define, measure, analyze, improve, control*), quando se quer melhorar um processo de negócio existente ou DMADV (*define, measure, analyze, design, verify*) usado para criar um novo design de produto ou processo, de forma a obter uma performance mais previsível, madura e livre de defeitos (WERKEMA, 2010).

Detalhando melhor, Werkema (2010), explica que a equipe para condução de um projeto baseado na filosofia Seis Sigma é dividido em especialistas e patrocinadores, como pode ser visualizado no Quadro 1.

Pyzdek (2003), afirma que os especialistas são agentes de mudanças e que elas são normalmente difíceis, caras e grandes causadoras de erros. Para isso o agente de mudança tem que buscar alcançar três objetivos:

a) Mudar dentro da organização a maneira como as pessoas pensam, já que as mudanças no comportamento dependem das mudanças dos pensamentos, pois as pessoas são guiadas pelas crenças e valores;
b) Mudar as normas existentes na organização, porque elas servem para guiar o comportamento do grupo. Assim, as mudanças não ocorrem sem que essas normas mudem também;
c) Mudar os processos ou sistemas existentes na organização, pois toda atividade é um processo e a melhoria da qualidade necessita de mudanças nos processos e sistemas.

Os lideres de equipes, denominados agentes de mudanças, que se tornam especialistas em estatística e melhoria de processos, recebem o nome de *Black Belt* ou *Green Belt*, utilizando a nomenclatura utilizada nas artes marciais (faixa preta ou faixa verde). Dentro dos programas de melhoria essa nomenclatura utilizada na técnica Seis Sigma é bem difundida e utilizada praticamente em todas as empresas no qual ele é adotado (PYZDEK, 2003).

Simplificando a classificação apresentada no Quadro 1, Pyzdek (2003) mostrou que os papeis dos participantes das equipes Seis Sigma, que normalmente são seguidos em uma organização, são:

- Executivo líder: é responsável por prover meios para serem alcançados os objetivos estratégicos da organização, sendo o responsável pelo desempenho da organização como um todo;
- *Champion*: é uma pessoa que ocupa posição de destaque dentro da organização, compreende o procedimento Seis Sigma e está focado em alcançar bons resultados. Normalmente, esta posição é ocupada por um vice-presidente;
- *Sponsor*: é um dono de um processo ou sistema e tem a função de auxiliar as atividades da técnica Seis Sigma dentro da sua área de responsabilidade;
- *Master Black Belt*: é o papel de maior nível no que tange ao conhecimento técnico. Fornece conhecimento e liderança das técnicas Seis Sigma e orienta os *Black Belts*. Deve conhecer profundamente as técnicas estatísticas e possuir habilidade de ensinar;
- *Black Belt*: atua na liderança da equipe do projeto, em tempo integral. Deve estar ativamente envolvido nos processos de mudanças organizacionais e desenvolvimento. Deve possuir conceitos estatísticos e ser analítico;
- *Green Belt*: podem ser líderes de projetos, e são apoiados pelos *Black Belts*.

Os papeis definidos para a equipe de implantação dentro do Seis Sigma nem sempre são seguidos nas organizações como prega a literatura. Eles podem variar de acordo com o tamanho e estrutura da organização, podendo alguns acumular funções, ou seja, exercer mais de um papel dentro da técnica Seis Sigma (PYZDEK, 2003).

PATROCINADOR / ESPECIALISTAS		NÍVEL DE ATUAÇÃO	PRINCIPAIS ATRIBUIÇÕES
Patrocinadores	*SPONSOR*	Principal executivo da empresa	Promover e definir as diretrizes para implementação da técnica Seis Sigma.
	SPONSOR FACILITADOR	Diretoria	Assessorar o *Sponsor* da técnica Seis Sigma na implementação do programa.
	CHAMPION	Gerência	Apoiar os projetos e remover possíveis barreiras para seu desenvolvimento.
Especialistas	*MASTER BLACK BELT*	Especialista	Assessorar os *Sponsors* e *Champions* e atuar como mentores dos *Black Belts* e *Green Belts*.
	BLACK BELT	Especialista	Liderar equipes na condução de projetos multifuncionais (preferencialmente) ou funcionais.
	GREEN BELT	Especialista	Liderar equipes na condução de projetos funcionais ou participar de equipes lideradas por *Black Belts*.
	YELLOW BELT	Supervisão	Supervisionar a utilização das ferramentas da técnica Seis Sigma na rotina da empresa e executar projetos mais focados e de desenvolvimento mais rápido que os executados pelos *Green Belts*.
	WHITE BELT	Operacional	Executar ações na operação de rotina da empresa que irão garantir a manutenção, a longo prazo, dos resultados obtidos por meio dos projetos.

Quadro 1- Patrocinadores e especialistas. Fonte: Werkema (2010)

2.2. O DMAIC

Segundo Eckes (2001) e Werkema (2010), o DMAIC é um procedimento de melhoria dos processos já existentes. O método DMAIC está apoiado no uso de técnicas estatísticas e ferramentas de gestão da qualidade que são utilizadas seguindo um método disciplinado dividido em cinco fases: *Define, Measure, Analyze, Improve e Control,* (definir, medir, analisar, melhorar e controlar) (PARAST, 2011). O modelo DMAIC concentra uma serie de ferramentas estruturadas para essas fases.

Para Rotondaro (2010), a primeira etapa do DMAIC, *"Define"*, consiste em definir claramente o problema, a variação indesejável de um processo, para que seja eliminada ou minimizada a variação. Para isso os principais passos da fase "D" são:

a) Definir claramente os requisitos críticos do cliente ou "voz do cliente" (VOC) e transformar esses requisitos em características críticas para a qualidade (CTQ). É fundamental essa etapa para o procedimento, pois leva a visão do cliente para dentro do processo;

b) Definir uma equipe bem preparada para aplicar as ferramentas da técnica Seis Sigma;

c) Mapear os processos críticos e identificar os que têm relação com as características críticas para a qualidade, e os que estão gerando resultados insatisfatórios, como: problemas funcionais, problemas de qualidade, erro de forma, insatisfação do cliente, etc.;

d) Realizar uma análise do custo benefício desse projeto;

e) Compilar os dados e submeter à gerência da empresa a proposta do projeto;

Nesta primeira fase são utilizadas basicamente as seguintes informações e ferramentas: dados internos da organização, dados financeiros, objetivo e meta, dados do cliente, análise de custo benefício, priorização dos processos críticos do negócio, mapeamento dos macroprocessos prioritário e QFD (desdobramento da função qualidade).

As atividades e ferramentas desta fase estão sumarizadas no Quadro 2.

D	ATIVIDADES	FERRAMENTAS
DEFINE: definir com precisão o escopo do projeto		- Mapa de raciocínio (manter atualizado durante todas as etapas do DMAIC)
	Descrever o problema do projeto e definir a meta	- Project Charter
	Avaliar: histórico do problema, retorno econômico, impacto sobre clientes / consumidores e estratégias da empresa.	- Project Charter; - Métricas do Seis Sigma; - Gráfico sequêncial; - Carta de Controle; - Análise de Séries Temporais; - Análise Econômico;
	Avaliar se o projeto é prioritário para a unidade de negócio e se será patrocinado pelos gestores envolvidos.	
	O projeto deve ser desenvolvido? Não → Selecionar novo projeto; Sim	
	Definir os participantes da equipe e suas responsabilidades, as possíveis restrições e suposições e o cronograma preliminar.	- Project Charter
	Identificar as necessidades dos principais clientes do projeto.	- Voz do cliente - VOC (Voice of the customer)
	Definir o Principal processo envolvido no projeto.	- SIPOC

Quadro 2 - Fase "*Define*" do DMAIC. Fonte: Werkema (2010)

Como a técnica Seis Sigma trabalha com fatos e dados, na fase *Measure* o processo em análise será desenhado e medido em suas principais variáveis, seguindo os seguintes passos (ROTONDARO, 2010):

a) Mapear o processo e subprocessos em análise, definindo as entradas e saídas. Estabelecer as relações $Y = f(x)$ no qual Y é considerado a variação do processo (variável de saída) e X é a variável que afeta o processo (variável de entrada).

b) Analisar o sistema de medição (MSA) e ajustá-lo as necessidades do processo. Coletar os dados através de um sistema que garanta amostras representativas e aleatórias.

Nesta fase são utilizadas basicamente as seguintes ferramentas: análise do sistema de medição (MSA), ferramentas estatísticas básicas e cálculo de capacidade do processo.

As atividades e ferramentas desta fase estão sumarizadas no Quadro 3.

M	ATIVIDADES	FERRAMENTAS
MEASURE: determinar a localização ou foco do problema	Decidir entre as alternativas de coletar novos dados ou usar dados já existentes na empresa	- Avaliação de sistema de medição (MSA);
	Identificar a forma de estratificação para o problema.	- Estratificação;
	Planejar a coleta de dados	- Plano para coleta de dados; - Folha de verificação; - Amostragem;
	Preparar e testar o sistema de medição	- Avaliação de sistema de medição (MSA);
	Coletar dados	- Plano para coleta de dados; - Folha de verificação; - Amostragem;
	Analisar o impacto das várias partes do problema e identificar os problemas prioritários.	- Estratificação; - Diagrama de pareto;
	Estudar as variações dos problemas prioritários identificados.	- Gráfico sequencial; - Carta de controle; - Análise de séries temporais; - Histogramas; - Boxplot; - Índice de capacidade; - Métricas do Seis Sigma; - Análise multivariada;
	Estabelecer a meta para cada problema prioritário.	- Cálculo matemático;
	A meta pertence à área de atuação Não Atribuir à área responsável e acompanhar o projeto para alcance da Sim	

Quadro 3- Fase "*Measure*" do DMAIC. Fonte: Werkema (2010)

Na fase *Analyze* são analisados os dados coletados na fase anterior, com o uso de ferramentas estatísticas e ferramentas da qualidade. Por meio dessa análise são determinadas as causas que influenciam no resultado do processo, e para isso devem ser seguidos os seguintes passos (ROTONDARO, 2010):

a) Submeter os dados coletados às ferramentas estatísticas e da qualidade, de modo a identificar os Xs causas óbvias e não óbvias. Os Xs são variáveis de entrada do processo;

b) Identificar a capacidade Seis Sigma do processo atual e estabelecer os objetivos de melhoria do projeto.

Na fase de análise dos dados são utilizadas as seguintes ferramentas: Teste de hipótese, FMEA, análise de variância, testes não paramétricos, correlação e regressão simples.

As atividades e ferramentas desta fase estão sumarizadas no Quadro 4.

A	ATIVIDADES	FERRAMENTAS
ANALYZE: determinar as causas do problema prioritário	Analisar o processo gerador do problema prioritário (process door).	- Fluxograma; - Mapa de processo; - Mapa de produto; - Análise do tempo de ciclo; - FMEA; - FTA;
	Analisar dados do problema prioritário e de seu progresso gerador (data door)	- Avaliação do sistema de medição (MSA); - Histograma; - Boxplot; - Estratificação; - Diagrama de dispersão; - Cartas "Mult-Vari";
	Identificar e organizar as causas potenciais do problema prioritário	- Brainstorming; - Diagrama de causa e efeito; - Diagrama de afinidades;
	Priorizar as causas potenciais do problema prioritário	- Diagrama de matriz; - Matriz de priorização;
	Quantificar a importância das causas pontenciais prioritárias (determinar as causas fundamentais)	- Avaliação do sistema de medição (MSA); - Carta de controle; - Diagrama de disperção; - Análise de regressão; - Teste de hipóteses; - Análise de variância; - Planejamento de experimentos; - Análise de tempos de falhas; - Teste de vida acelerados;

Quadro 4- Fase "*Analyze*" do DMAIC. Fonte: Werkema (2010)

Na fase *Improve*, a equipe do projeto deve empenhar esforços atuando sobre as causas raízes identificadas. É nessa fase que são implementadas as melhorias no processo, nas quais a equipe interage com as pessoas que executam as atividades dentro do processo (ROTONDARO, 2010). As ferramentas de apoio nesta fase são: DOE – delineamento de experimentos, plano de ação, manufatura enxuta e cálculo da nova capacidade processo.

As atividades e ferramentas desta fase estão sumarizadas no Quadro 5.

I	ATIVIDADES	FERRAMENTAS
IMPROVE : propor, avaliar e implementar soluções para o problema prioritário	Gerar idéias de soluções potenciais para a eliminação das causas fundamentais do problema prioritário	- Brainstorming; - Diagrama de causa e efeito; - Diagrama de afinidades; - Diagrama de relações;
	Priorizar as soluções potenciais	- Diagrama de matriz - Matriz de priorização;
	Avaliara e minimizar os riscos das soluções prioritárias	- FMEA; - Stakeholder analysis
	Testar em pequena escala as soluções selecionadas (teste piloto)	- Teste na operação; - Testes de mercado; - Simulação;
	Identificar e implementar melhorias ou ajustes para as soluções selecionadas, caso necessário	- Operação evolutiva; - Testes de hipóteses;
	A meta foi alcançada? Não → Retornar à etapa M ou implementar o Design for six sigma; Sim	
	Elaborar e executar um plano para a implementação das soluções em larga escala	- 5W2H; - Diagrama de árvore; - Diagrama de Gantt; - PERT/COM; - Diagrama do processo decisório (PDPC);

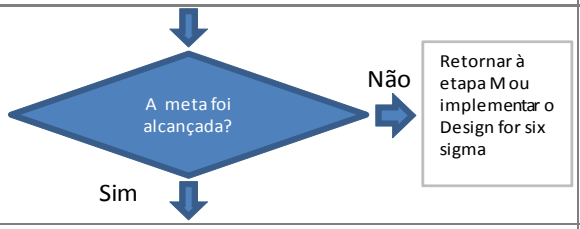
Quadro 5- Fase "*Improve*" do DMAIC. Fonte: Werkema (2010)

Na última fase do DMAIC, *Control*, deve ser estabelecido e validado um sistema de medição e controle para medir continuamente o desempenho do processo, de tal forma que se possa garantir que a capacidade do processo seja perpetuada ao longo do tempo. É

fundamental este monitoramento dos Xs críticos não só para garantir a capacidade do processo estabelecido, mas para indicar também possíveis melhorias futuras (ROTONDARO, 2010).

Nessa ultima fase são utilizadas as seguintes ferramentas: elaboração dos novos procedimentos e instruções, padronização dos procedimentos e instruções, gráficos de controles por variáveis e atributos e CEP para pequenos lotes.

As atividades e ferramentas desta fase estão sumarizadas no Quadro 6.

C	ATIVIDADES	FERRAMENTAS
CONTROL : garantir que o alcance da meta seja mantido a longo prazo	Avaliar o alcance da meta em larga escala	- Avaliação de sistemas de médição (MSA); - Diagrama de pareto; - Carta de controle; - Histograma; - Índices de capacidade; - Métricas do Seis Sigma;
		
	Padronizar as alterações realizadas no processo em consequência das soluções adotadas.	- Procedimentos padrão; - Poka-yoke;
	transmitir os novos padrões a todos os envolvidos	- Manuais; - Reuniões; - Palestras; - on the job training
	Definir e implementar um plano para monitoramento da performance do processo e do alcance da meta.	- Avaliação de sistemas de médição (MSA); - Plano p/ coleta de dados; - Folha de verificação; - Amostragem; - Carta de controle; - Histograma; - Índice de capacidade; - Métricas do Seis Sigma; - Aud. do uso dos padrões;
	Definir e implementar um plano para tomada de ações corretivas caso surjam problemas no processo.	- relatórios de anomalias; - Out of control action plan (OCAP);
	Sumarizar o que foi aprendido e fazer recomendações para trabalhos futuros	- 5W2H; - Diagrama de árvore; - Diagrama de Gantt; - PERT/COM; - Diagrama do processo decisório (PDPC);

Quadro 6- Fase "*Control*" do DMAIC. Fonte: Werkema (2010)

2.2.1. Aplicação do DMAIC

Como mencionado anteriormente, a técnica Seis Sigma pode ser aplicado a processos técnicos e não técnicos (ROTONDARO, 2010). Na literatura observa-se que na sua grande maioria esses projetos são realizados com foco na melhoria de processos com objetivo de reduzir o tempo de ciclo. Abaixo é possível visualizar alguns exemplos de aplicação da técnica Seis Sigma.

Lee e Wei (2010), mencionam a aplicação da técnica Seis Sigma numa empresa chinesa de placa de circuito impresso, com o objetivo de reduzir o tempo de troca do molde de 39,23 para 25 minutos. Depois de implementadas as melhorias o tempo de troca do molde foi reduzido para 19,34 minutos superando o objetivo inicial do projeto.

Silva et al (2011), citam a aplicação da técnica Seis Sigma com o propósito de reduzir o refugo no processo de conformação a frio, para sistemas de direção automotiva. O projeto foi aplicado durante dois meses numa empresa de autopeças do interior de São Paulo, como meta foi definido um índice máximo de refugo de 5% para o volume produzido. Após a conclusão do projeto houve uma redução significativa no indicador de refugo que era de 19,1% e passou a ser de 3,99%.

Marçola et al (2010), descrevem a aplicação da técnica Seis Sigma na melhoria do processo de atendimento de uma empresa de *fast-food*. O objetivo do projeto foi reduzir o tempo de atendimento ao cliente (coleta do pedido e entrega na mesa), que teve uma redução significativa, após implementadas as melhorias, reduzindo esse tempo de 9 para 2,5 minutos.

Santos et al (2011), mencionam os ganhos com a aplicação da técnica Seis Sigma numa área de vendas em uma empresa do setor metal mecânico. O objetivo principal do projeto foi reduzir o tempo de resposta ao cliente (cotação e *follow-up*) em 30%, reduzir a burocracia nas documentações de vendas em 40% e redução do índice de não conformidade com origem em vendas, elevando o índice para pelo menos 5 sigma. Os resultados após a finalização do projeto foram expressivos, a redução do tempo de resposta ao cliente foi de 32%, a burocracia foi reduzida em 79% e as não conformidades chegaram ao nível 6 sigma. O projeto foi conduzido em aproximadamente 3 meses, com dez pessoas na equipe, sendo: um *Black Belt*, dois *Green Belts*, um *Process Owner* e os demais *Yellow Belts*.

Galvani (2010) reporta os ganhos na aplicação de três projetos Seis Sigma, a) redução de sucata: foi aplicado o projeto Seis Sigma na área de manufatura com o objetivo de reduzir em 30% a sucata na linha de empastamento de placas automotivas. Esse projeto teve um tempo de execução de aproximadamente 5 meses e seus resultados foram validados pela área

financeira. b) redução de reclamação do cliente: o projeto foi desenvolvido na área de manufatura durante nove meses, especificamente na fabricação de coletor de admissão, com o objetivo de reduzir as reclamações em 95%. Depois de implementadas as melhorias o resultado foi significante, reduziram-se as reclamações em 100%, e. c) redução do nível de inventário: o projeto foi conduzido na área de *aftermarket* da empresa num período de onze meses, com o objetivo de reduzir 30% do valor de inventário das peças de reposição. Depois de concluída a verificação da eficácia das ações tomadas, identificou-se que a redução foi de 22% contra a meta inicial de redução de 30%. Isso foi considerado satisfatório, pois as ações estavam surtindo efeitos de forma consistente mostrando uma tendência a diminuir.

2.3. Ecoeficência

O *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)*, introduziu em 1992 o termo "ecoeficiência". O WBCSD é um conselho empresarial para o desenvolvimento sustentável, constituído de mais de 130 empresas internacionais. Seus membros associados são oriundos de 30 países diferentes, com atuação em mais de 20 setores industriais. O objetivo principal do WBCSD é servir de catalisador para aproximar o mundo empresarial, a administração pública e outras organizações preocupadas com o desenvolvimento sustentável (WBCSD, 2000a).

Segundo Vellani e Ribeiro (2009), ecoeficiência significa integrar o desempenho ambiental com o desempenho econômico. Desta forma, os gastos com as atividades ambientais devem gerar benefícios financeiros, eliminando a poluição, desperdícios e minimizando consumo dos recursos naturais. Para o WBCSD (1996), a organização alcança a ecoeficiência por meio do fornecimento de bens e serviços a preços competitivos, satisfazendo às necessidades humanas, promovendo qualidade de vida e reduzindo os impactos ambientais. Sucintamente, a ecoeficiência significa produzir mais, gastando-se menos e agredindo menos o meio ambiente. Assim, o termo que melhor traduz a integração da eficiência econômica com a ambiental é denominado como ecoeficiência, (MAY; LUSTOSA; VINHA, 2003).

Em 1996, foi desenvolvida pela Basf, na Alemanha, em conjunto com a consultoria Roland Berger, uma metodologia para análise da ecoeficiência. Consiste em analisar o ciclo de vida do produto ou processo, com o foco em avaliar seu desempenho econômico e ambiental. A Basf definiu cinco aspectos para cálculo do impacto ambiental, sendo: consumo de energia, consumo matérias-primas, potencial de toxidade dos resíduos e produtos, emissões

dos resíduos e potencial de riscos ambientais. Nos custos são considerados além dos gastos com a fabricação, distribuição, também os gastos incorridos no descarte dos produtos (BASF, 2006).

De acordo com Saling (2002), na avaliação do consumo de energia elétrica, procura-se verificar se a empresa utiliza energia elétrica proveniente de fontes limpas e renováveis ou através de combustíveis fósseis. No consumo de matérias-primas examina-se se há insumos renováveis ou recicláveis. É realizada uma análise da toxidade dos resíduos gerados pelos produtos e processos. Identificam-se os gases emitidos na atmosfera, os efluentes líquidos e os resíduos sólidos. Por último, analisam-se os possíveis desastres ecológicos e seus métodos de controle para evitar ou minimizar os impactos ambientais.

A metodologia proposta (BASF, 2006), foca diretamente na avaliação do tempo de ciclo de vida de um produto ou de uma linha de produto, enquanto que a metodologia proposta por *WBCSD* (1996) tem por objetivo medir a ecoeficiência do sistema da empresa como um todo, avaliando o impacto das operações ou serviços sobre o desempenho ambiental da empresa, e não no decorrer do ciclo de vida do produto.

Segundo o *WBCSD*, as empresas devem considerar três objetivos para ecoeficiência: a redução do consumo de recursos, redução do impacto no meio ambiente por meio da disposição adequada dos resíduos e melhoria do valor do produto ou serviço, inclusive prolongando a sua vida útil a fim de minimizar a utilização de recursos naturais (*WBCSD*, 2000b). Em linha com esse conceito, o *WBCSD* (2000a) propõe uma metodologia para medir a ecoeficiência da organização como um todo, por meio da divisão do valor do produto ou serviço pela sua respectiva influência ambiental. Isso mediria e ecoeficiência da empresa, ou seja:

$$\text{ecoeficiência} = \frac{\text{valor do produto}}{\text{influência ambiental}}$$

Como valor do produto o *WBCSD* sugere a utilização do volume físico de produção da empresa expresso em unidades ou massa (peças ou toneladas) ou o emprego de seu equivalente econômico como o volume total de vendas (faturamento líquido). Já para o impacto ambiental dessa produção sugere a adoção de medidas como o consumo de matérias primas (em massa ou valor), o consumo de energia elétrica, a quantidade de emissões de gases do efeito estufa etc. (WBCSD, 2000a)

Segundo o *WBSCD* (2000b) a ecoeficiência é aplicada a qualquer setor da empresa, desde o marketing, desenvolvimento do produto, produção e entrega, com o objetivo de atingir maior valor do produto a partir do menor consumo de materiais, energia e redução das

emissões. O WBCSD ainda identificou sete elementos no negócio da empresa que contribuem para a melhoria da ecoficiência, as quais são:

a) Aumento da reciclabilidade (por exemplo, a reciclagem de embalagens de madeira);
b) Redução do consumo de energia (ex., reduzir o consumo de energia em horários de picos);
c) Redução do consumo de material (ex., redução da quantidade de componentes ou matéria-prima);
d) Eliminação de substâncias tóxicas (ex., eliminação de componentes tóxicos);
e) Prolongamento do ciclo de vida do produto (ex., estender a vida útil do produto);
f) Aumento da intensidade de serviço (ex., acréscimo na intensidade do serviço, como aluguel de carros);
g) Intensificação do uso de materiais renováveis (ex., utilização de materiais alternativos para pavimentação).

Esses sete elementos para a melhoria da ecoeficiência, segundo *WBCSD* (2000b), podem ser classificados em três objetivos alargados: a) redução do consumo de recursos: utilização de materiais, água, solo e energia, envolvendo a durabilidade do produto e reciclabilidade, b) redução do impacto na natureza: redução das emissões líquidas, gasosas, substâncias tóxicas e eliminação de desperdícios e c) aumento do valor do produto ou serviço: fornecer ao cliente a mesma funcionalidade com menos materiais, beneficiando através da flexibilidade, ou seja, concentrando os esforços nas necessidades do que de fato os clientes querem.

O *WBSCD (*2000b), afirma que algumas empresas têm um quarto objetivo, que seria um sistema de gestão ambiental. Esse sistema é um meio de assegurar que todos os riscos e oportunidades sejam identificados e tratados de forma eficiente. Normalmente, as empresas adotam para essa finalidade a ISO14001, porém podem ser utilizados outros instrumentos estratégicos para gerir os aspectos ambientais tais como: *Balanced Scorecard* e *Value Based Manangement* (gestão baseada no valor).

Para identificação de oportunidades ecoeficientes o *WBCSD* (2000b) definiu um diagrama, conforme a Figura 2, que possibilita à empresa ter uma visão global da ecoeficiência. Auxilia assim, a encontrar oportunidades tanto interna quanto externamente. Para isso, são sugeridas quatro áreas potenciais para identificação de oportunidades de melhoria da ecoeficiência:

a) Reengenharia dos processos: reduzir o consumo de materiais, evitar riscos e minimizar os custos. Os colaboradores precisam estar envolvidos para identificar as oportunidades e fazer as mudanças;

b) Revalorizar os subprodutos: as sobras de processos, que são consideradas como desperdícios, podem ter valor para outras empresas.

c) Reconceber seus produtos: produtos menores e mais simples, com menores variedades de materiais, sendo mais fáceis de desmontar para reciclagem. Produtos projetados com regras de concepção ecológica, na sua maioria são mais baratos de produzir e fáceis de utilizar.

d) Repensar os mercados: não só reconceber seus produtos, mas também ir ao encontro das necessidades dos clientes ou outra parte interessada.

Figura 2 - Procurando oportunidades ecoeficientes. Fonte: WBCSD (2000B)

2.4. Análise do ciclo de vida

A análise do ciclo de vida (ACV) conhecida também pelo seu termo em inglês *"Life Cycle Assessment"* é uma ferramenta de gestão ambiental e gerenciamento do ciclo de vida do produto ou serviço do "berço" ao "túmulo", ou seja, da extração da matéria-prima até a sua disposição final (FIGURA 3), (HUNT et al., 1996; CHEHEBE, 2002; INGWERSEN et al., 2012). Para Coltro et al. (2007), a avaliação do ciclo de vida permite avaliar o aspecto

ambiental potencial associado a um processo, produto ou serviço, durante todo seu ciclo de vida. Entretanto, a ACV também contribui para a identificação em quais estágios do ciclo de vida há contribuições mais significativas para o impacto no meio ambiente, decorrente do processo ou produto estudado.

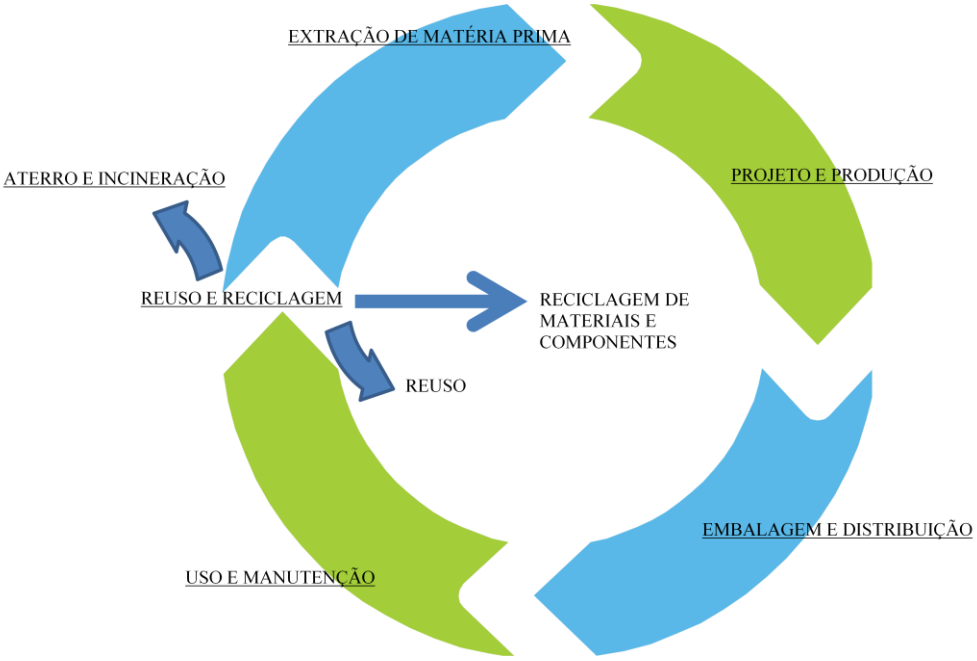


Figura 3 - Ilustração simplificada da abordagem ACV. Fonte: adaptado (FUKUROZAKI, 2011)

Os primeiros conceitos da ACV surgiram na década de 60. A indústria Coca Cola, em 1967, quantificou o uso de matérias-primas, energia e emissões ambientais em diversos processos empregados na fabricação de embalagens, por meio de um estudo realizado pelo *Midwest Research Institute*, com o objetivo de identificar em qual estágio se consumia menos matéria-prima e energia e se gerava menores emissões de poluentes, (CARVALHO, 2010).

Coltro at al. (2007) destaca que muitos estudos de ACV aparentemente iguais, davam resultados diferentes antes da criação de normas para padronização da técnica de ACV. A *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) foi à instituição que mais contribuiu para esse processo por meio da publicação do *Guidelines for Life Cycle Assessment – a Code of Practice* (Guia para a Análise do Ciclo de Vida – um Código de Práticas) que acabou por orientar na criação da série das normas ISO 14040 relativas à ACV.

O método de ACV apresentado na NBR 14044 (2009b) consiste de quatro etapas identificadas por: a) definição de objetivos e escopo, b) análise de inventário, c) avaliação de impacto e d) interpretação de resultados, mostradas na FIGURA 4 e detalhadas a seguir.

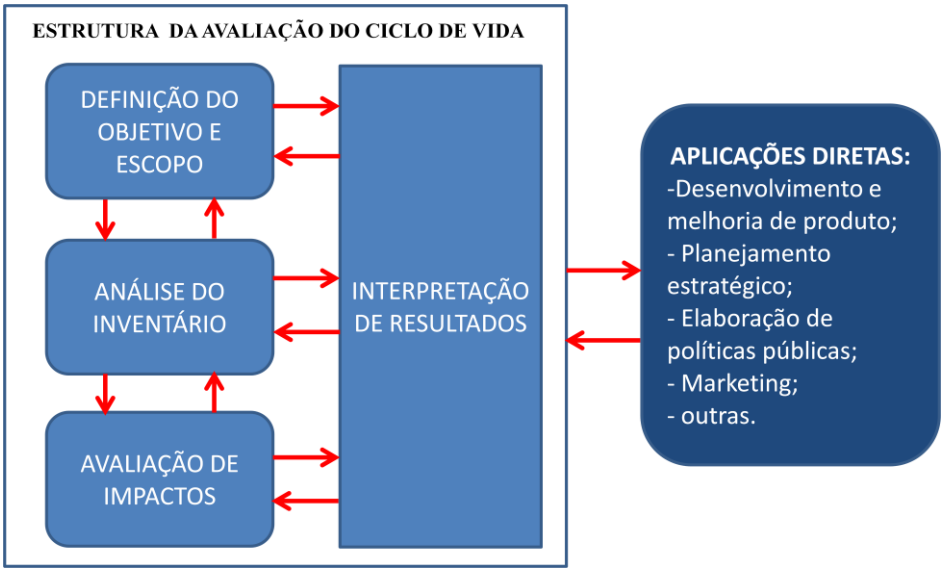


Figura 4 - Estrutura de ACV NBR ISO 14040. Fonte: ABNT (1997)

a) Definição de objetivos e escopo: o objetivo deve declarar a pretensão do estudo de ACV. O escopo deve definir a extensão e o grau de profundidade do estudo e estar alinhado com os objetivos. Essa fase é crucial para o sucesso da condução do estudo e para sua relevância e utilidade, (ABNT, 2009a);

b) Análise de inventário: nessa fase é realizada a coleta de dados e definido procedimento de cálculo para mensurar as entradas e saídas para todos os processos, por exemplo, quantidade de emissões para o ar, descarga de efluentes líquidos, etc., (COLTRO at al., 2007);

c) Avaliação de impacto: é realizada a avaliação da significância dos impactos ambientais potenciais, utilizando-se os resultados da fase anterior, na qual os dados são interpretados do ponto de vista dos impactos ambientais, por exemplo, mudanças climáticas, acidificação, etc., (BASTOS; POSSAMAI, 2002);

d) Interpretação: reúne os resultados referentes à análise de inventário e avaliação de impacto, constituindo-se basicamente na conclusão do estudo. Esta fase tem por objetivo apoiar a tomada de decisão, identificando o processo, produto ou serviço que cause menos impacto ambiental (CHEHEBE, 2002; COLTRO at al., 2007).

Em atendimento a norma ISO 14040, após a finalização do estudo de ACV deve ser realizada uma análise crítica dos resultados encontrados para diminuir a probabilidade de mal entendidos ou efeitos negativos em relação às partes interessadas externas (ABNT, 1997).

A técnica de ACV exibe limitações, reconhecidas pela própria norma que a rege (ABNT, 2009a), tais como: a falta de exatidão decorrente dos casos em que haja barreira de acesso ou indisponibilidade dos dados, limitações dos métodos usados para análise de

inventário e avaliação de impacto, e a possível subjetividade nas escolhas e suposições feita na análise do ciclo de vida. A ACV tem obstáculos para ser considerado um instrumento de ecoeficiência, pois sua estrutura contempla apenas aspectos e impactos ambientais, não sendo considerados, por enquanto, os aspectos econômicos que são tratados em estudos separados, como: custo do ciclo de vida (*Life Cycle Cost, LCC*) que tem sido integrado passo a passo a ACV.

2.5. Sistema de gestão ambiental (SGA)

Segundo Fryxell e Szeto (2002), nos últimos anos as organizações têm sofrido maior pressão para administrar melhor a questão ambiental e por esse motivo há um aumento na implantação de Sistemas de Gestão Ambiental (SGA).

Baseado em melhoria contínua, um SGA pode ser definido como uma ferramenta de identificação de problemas e soluções ambientais, de acordo com Perotto et al. (2008).

Maimon (1996) afirma que medidas de gestão ambiental podem alterar a imagem da organização para fins institucionais, e estão sendo consideradas cada vez mais como prioridades nas etapas futuras de gestão empresarial e de investimentos financeiros. Conforme Melnyk, Sroufe e Calantone (2002) o SGA tem como propósito coordenar e monitorar as atividades da organização relacionadas ao meio ambiente, visando manter a conformidade com a legislação e a redução dos resíduos gerados e dos impactos ambientais significativos.

Além de contribuir com o cumprimento da legislação, um SGA ajuda a identificar as oportunidades de progressos na redução do consumo de materiais e energia e melhora a eficiência dos processos, de acordo com Chan e Wong (2006).

Um SGA pode ser estabelecido segundo princípios que sejam de interesse da organização que vai adotá-lo. No entanto, é mais usual que ele seja baseado na norma NBR ISO 14001 - Requisitos com orientações para uso, que faz parte do conjunto ISO 14000 - Sistema de Gestão Ambiental que especifica os requisitos gerais para o estabelecimento, auditoria e operação de um sistema de gestão ambiental. As normas NBR ISO 14001 se aplicam a todos os tipos de organizações e portes, não havendo requisitos absolutos para o desempenho ambiental. A certificação com base na NBR ISO 14001 tem como objetivo transmitir confiabilidade às partes interessadas (ABNT, 2005).

A estrutura da norma ISO 14001 pode ser vista no Quadro 7.

ESTRUTURA DA NORMA NBR ISO 14001:2004	
Prefácio	Esta norma foi elaborada no comitê de Gestão Ambiental (ABNT/CB-38)
Introdução	Esta norma tem por objetivo prover as organizações de elementos de um sistema de gestão ambiental (SGA) eficaz que possa ser integrados a outros requisitos da gestão, e auxiliá-las a alcançar seus objetivos ambientais e econômicos.
1 - Objetivo	Esta norma se aplica a qualquer organização que deseje estabelecer, implementar e aprimorar um SGA, assegurar-se da conformidade com a sua política ambiental definida e demonstrar conformidade com esta norma.
2 – Referências normativas	Não há referências normativas citadas.
3 – Termos e definições	Neste item são esclarecidos os termos e definições contidos nesta norma.
4 – Requisitos do sistema de gestão ambiental	Define todos os requisitos necessários para implementar o SGA.
4.1 – Requisitos gerais	A organização deve estabelecer, documentar, implementar, manter e melhorar o SGA em conformidade com os requisitos desta norma.
4.2 – Política ambiental	Deve ser definida e divulgada por toda a organização.
4.3 – Planejamento	Devem ser identificados os aspectos ambientais, determinar como esses requisitos legais e outros se aplicam aos seus aspectos ambientais e estabelecer objetivos, metas e programas para melhoria de seu SGA.
4.4 – Implementação e operação	A organização deve assegurar recursos, funções, responsabilidades e autoridades definidas. Determinar competência, treinamento e conscientização, estabelecer um processo de comunicação. Determinar as documentações, controle de documentos e controle operacional.
4.5 – Verificação	A organização deve monitorar e medir o seu desempenho, avaliar periodicamente o atendimento aos requisitos legais e outros aplicáveis, identificar e corrigir não conformidades reias ou potenciais. Controlar seus registros e auditar seu SGA em intervalos planejados.
4.6 – Análise pela administração	A Alta Administração deve analisar periodicamente em intervalos planejados seu SGA, para assegurar sua continuada adequação, pertinência e eficácia.
Anexo A – Orientações para uso desta norma	Requisitos gerais para auxiliar na implantação do SGA
Anexo B – correspondência entre ABNT NBR ISO 14001:2004 e a ABNT NBR ISO 9001:2000	Demonstra a correspondência entre os sistemas de gestão.
Bibliografia	ISO 9001:2000 (sistema de gestão da qualidade – fundamentos e vocabulários), ISSO 9001:2000 (sistema de gestão da qualidade – requisitos), Isso 19011:2002 (diretrizes para auditorias de sistemas de gestão da qualidade e/ou ambiental) e ISSO 14001:2004 (*environmental management systems – requirements with guidance for use*)

Quadro 7- Estrutura da norma NBR ISO 14001:2004. Fonte: ABNT (2005)

Segundo Valle (2002), uma das vantagens da certificação do SGA, com base na ISO 14001, é a padronização das rotinas e dos procedimentos necessários para a organização certificar-se ambientalmente. A norma ISO 14001 não substitui nenhuma legislação aplicável ao negócio da organização, mas reforça ao exigir seu cumprimento na íntegra para que seja obtida a certificação.

De acordo com Oliveira et al. (2010), os benefícios de implantar um sistema de gestão ambiental com base na NBR ISO 14001 encontrados na literatura são muitos. Entre eles estão: incentivos reguladores, redução de riscos, acesso a novos mercados, acesso a mais capital, melhor acesso a seguro, melhoria do desempenho ambiental, melhoria na relação com os funcionários, melhoria na imagem pública, vantagens competitivas dentro de segmentos específicos, atendimento das exigências de clientes, conscientização ambiental. Para Sambasivan e Fei (2008), os benefícios somente serão alcançados se forem vinculados a fatores como o comprometimento da alta direção, a gestão da mudança e o monitoramento dos aspectos externos, sociais e técnicos.

2.6. Indicadores de desempenho ambiental

De acordo com Mitchell (1996), indicador de desempenho é uma ferramenta que auxilia na obtenção de informações sobre uma dada realidade, tendo como característica principal o poder de sintetizar diversas informações, retendo apenas os dados essenciais das informações analisadas. Pode-se dizer que os indicadores de desempenho servem para a organização monitorar seus processos. Eles servem para medir o grau de sucesso de uma estratégia em relação ao objetivo proposto. No entanto, esse indicador deve ser muito bem observado quanto à sua dificuldade de obtenção, pois o custo para sua mensuração pode inviabilizar sua utilização.

Os indicadores de desempenho ambiental têm como objetivo demonstrar as práticas organizacionais no sentido de minimizar os impactos ambientais significativos decorrentes de suas atividades, conforme Campos (2008). Segundo Kaplan e Norton (1997), o que não pode ser medido não pode ser gerenciado e, consequentemente, não há como tomar ações. Sendo assim, as organizações que não monitoram seus indicadores de desempenho ambiental podem não estar gerenciando sua performance em relação ao meio ambiente.

Segundo Luz et al. (2006), nos SGAs os indicadores de desempenho ambiental mais utilizados deveriam ser aqueles mais fáceis de medir ou disponíveis na empresa. Na maioria das organizações os gestores têm uma menor preocupação na identificação dos indicadores

que tem maior relevância para o desempenho ambiental, devido à dificuldade em definir aqueles que representem o objetivo estratégico e o meio para atingi-lo. A norma NBR ISO 14031 (versão 2004) Gestão Ambiental – Avaliação de desempenho ambiental - Diretrizes – define as diretrizes específicas para tratar a avaliação de desempenho ambiental e lista mais de 100 indicadores ilustrativos. Por isso é necessário definir os mais relevantes e que sejam aplicados aos aspectos significativos para a organização considerada (ABNT, 2004). O objetivo central da ISO14031 é ser um processo e ferramenta de gestão para determinar se o desempenho ambiental da organização está adequado aos critérios estabelecidos pela alta administração. Segundo essa norma, convém que as organizações que possuam um sistema de gestão ambiental, analisem seu desempenho ambiental comparando-o com a política ambiental, seus objetivos e metas e outros critérios de atuação em relação ao meio ambiente. Se a organização em questão não possuir um sistema de gestão ambiental, essa análise de desempenho ambiental pode auxiliar a organização em (ABNT, 2004): a) identificação dos aspectos ambientais, b) determinação dos aspectos que serão tratados como significativos, c) estabelecimento de critérios para seu desempenho ambiental e d) avaliação do seu desempenho ambiental com base nestes critérios.

Tachizawa (2005) sugeriu que para cada indicador seja definida uma meta a ser atingida com prazo para sua obtenção e uma visualização gráfica que se baseie em dados e em uma série histórica para fins de comparação com o mercado por meio de *benchmarking*.

A NBR ISO 14031 definiu como modelo de processo de avaliação do desempenho ambiental o PDCA (*Plan; Do; Check* e *Act*) cujas etapas são as seguintes: Planejar *(Plan)*: planejamento e seleção de indicadores, Fazer *(Do)*: utilização de dados e informações, Checar *(Check)*: análise crítica e Agir *(Act)*: corrigir e / ou melhorar;

Convém que a organização faça regularmente a coleta de dados, com frequências planejadas e de fontes apropriadas de forma assegurar a confiabilidade dos dados. Os dados devem ser analisados e convertidos em informações, expressos como indicadores, descrevendo o desempenho ambiental da organização (ABNT, 2004).

No Quadro 8 baseado na NBR ISO 14031:2004 é possível visualizar exemplos de indicadores para os requisitos especificados na NBR ISO 14001:2004.

EXEMPLOS DE INDICADORES DE DESEMPENHO	
REQUISITOS ISO 14001:2004	**NOME DOS INDICADORES DE DESEMPENHO**
4.2 - Política ambiental	- Nº de objetivos e metas atingidos - Nº de iniciativas implementadas para prevenção da poluição
4.3.1 - Aspectos ambientais	- Quantidade de materiais usados por unidade de produto - Quantidade de água reutilizada - Quantidade de materiais perigosos usados na produção - Quantidade ou tipo de resíduos gerados pelos prestadores de serviços
4.3.2 - Requisitos legais e outros	- Nº de multas e penalidades ou os custos a elas atribuídos
4.3.3 - Objetivos, metas e programas	- Nº de sugestões dos empregados para a melhoria ambiental - Nº de empregados que participam em programas ambientais
4.4.1 - Recursos, funções, responsabilidades, autoridades	- Retorno sobre o investimento para projetos de melhoria ambiental - Economia obtida através da redução do uso dos recursos, da prevenção de poluição ou da reciclagem de resíduos.
4.4.2 - Competência, treinamento e conscientização	- Nº de iniciativas locais de limpeza ou reciclagem, patrocinadas ou auto-implementadas
4.4.3 - Comunicação	- Nº de consultas ou comentários sobre questões relacionadas ao meio ambiente
4.4.6 - Controle operacional	- Nº de partes de equipamentos com peças projetadas para fácil desmontagem, reciclagem e reutilização - Consumo médio de combustível da frota de veículos - Nº de horas de manutenção preventiva dos equipamentos/ano
4.4.7 - Preparação e resposta a emergências	- Nº de simulados de emergências realizados - Percentagem de simulados de preparação e respostas a emergências que demonstraram a prontidão planejada
4.5.1 - Monitoramento e medição	- Nº de produtos que podem ser reutilizados ou reciclados - Duração do uso do produto
4.5.2 - Avaliação dos requisitos legais e outros	- Tempo para responder ou corrigir os incidentes ambientais - Grau de atendimento a regulamentos
4.5.3 - Não conformidade, ação corretiva e ação preventiva	- Nº de ações corretivas identificadas que foram encerradas ou não

Quadro 8- Exemplo de indicadores de desempenho ambiental. Fonte: ABNT (2004)

Já em relação à ecoeficiência, o *WBCSD* (2000b) recomendou que os indicadores de ecoeficiência sejam integrados ao sistema de gestão, devendo ser divulgados dentro da organização. Os indicadores devem estar ligados intimamente com os aspectos ambientais para que haja uma melhoria do desempenho ambiental. Para ajudar a manter a flexibilidade de comunicação das organizações, o *WBCSD* (2000b) definiu dois tipos de indicadores, os genéricos que atendem aos seguintes critérios: a) o indicador está relacionado com uma preocupação ambiental global ou com um valor global para o mundo dos negócios, b) é relevante e significativo praticamente para todos os negócios, c) os métodos de medição estão estabelecidos e as definições são globalmente aceitas. Quando os indicadores não atendem a esses três critérios, são considerados indicadores específicos do negócio, o que significa que devem ser definidos consoantes as peculiaridades do negócio (por exemplo: a medição de emissões gasosas provenientes de uma refinaria, que é diferente da realizada em uma empresa de produção de energia). O *WBCSD* afirma que nem todos os indicadores são aplicáveis a todas as empresas e que cada empresa deve definir seus próprios indicadores específicos. Nesse caso, é recomendada a utilização da ISO14031, na orientação da seleção dos indicadores específicos do negócio para a avaliação do desempenho ambiental. O indicador de desempenho operacional dentro da ISO14031 é o de importância relevante para medir a ecoeficiência.

Para a seleção de indicadores de valor, o *WBCSD* (2000b) reforça que depende de que forma os indicadores de ecoeficiência serão utilizados para a tomada de decisões. Pois, por exemplo, na área produtiva os engenheiros podem pretender medir a ecoeficiência em termos de volume de massa ou produto a serem produzidos; já na área financeira, os analistas podem querer fazê-lo por meio de volumes globais de vendas, para avaliarem os riscos e benefícios econômicos. O *WBCSD* (2000b) recomenda que para a seleção de indicadores e termos contabilísticos as empresas devam utilizar métodos reconhecidos. Indicadores do valor funcional têm por objetivo medir a função que um produto ou serviço providencia ao utilizador final. Na sua maioria fornecem a mais pura expressão da ecoeficiência, pois relacionam os atributos ambientais do produto com o valor que proporciona. No entanto, *WBCSD* (2000b) alerta sobre as diversas limitações desta abordagem, como: a) dificuldade de quantificar com clareza a função de um produto, (por exemplo: como se quantifica o valor funcional de televisores ou de cosméticos?), b) quando o mesmo produto desempenha funções múltiplas, (por exemplo: as toalhas de papel têm uma infinidade de utilizações no lar), c) parâmetros secundários de valor para o utilizador, (por exemplo: conforto e estética, não são

fáceis de se considerar numa quantificação) e d) é muito importante reconhecer que as estimativas de ecoeficiência não podem ser agregadas para produtos com diferentes funções.

Durante a criação deste conceito, o *WBCSD* (2000b) estabeleceu indicadores genéricos atendendo os três critérios mencionados anteriormente, que são passíveis de utilização por todas as empresas. Para os indicadores de valor do produto ou serviço, utilizam-se: a) quantidade de mercadoria produzida ou serviços prestados aos clientes e b) vendas liquidas. Já para a influência ambiental durante a criação do produto ou serviço, propõem-se: a) consumo de energia, b) consumo de materiais, c) consumo de água, d) emissões de GEE (emissões de gases do efeito estufa), e) emissões de SDCO (emissões de substâncias deterioradoras da camada de ozônio). Na Tabela 1 é possível visualizar um exemplo da medição da ecoeficiência por meio de indicadores genéricos, em que sua evolução é acompanhada no decorrer do tempo.

Tabela 1 - Medição da ecoeficiência

MEDIÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA		
Indicadores	**Ano 2008**	**Ano 2009**
Kg material processado / giga-joule energia elétrica	6,0	7,0
US$ vendas / giga-joule energia elétrica	9400,00	9450,00
Kg material processado / ton CO2 e GEE	42,9	51,0
US$ vendas / ton CO2 e GEE	67100,00	88400,00

O *WBCSD* (2000b) afirma que os indicadores genéricos, por si só, podem não representar o desempenho da ecoeficiência da empresa. Por isso, deve-se associar normalmente a estes indicadores genéricos os específicos do negócio e índices da ecoeficiência para determinar o perfil do desempenho ambiental e econômico da empresa. Segundo o *WBCSD* (2000b) os indicadores de ecoeficiência devem ser baseados em oito princípios básicos: a) ser significativos e relevantes na proteção do meio ambiente, contribuindo com a melhoria da qualidade de vida, b) reconhecer a diversidade inerente a cada negócio, c) serem mensuráveis, claros, transparentes e verificáveis, d) serem compreensíveis e significativos para as partes interessadas, e) levar em consideração as questões significativas e relevantes para a atividade da empresa, f) prover informações para os órgãos de decisão, com o propósito de melhorar o desempenho da organização, g) levar em consideração avaliações gerais das atividades da empresa, produtos e serviços, concentrando nas áreas controladas diretamente pela gestão, e h) Apoiar o *benchmarking* e verificar a

evolução. Nos Quadros 9 e 10 podem ser visualizados exemplos de indicadores baseados no valor do produto, serviço e na influência ambiental.

CATEGORIA	ASPECTOS	INDICADORES
Valor do produto / serviço	Volume	- unidades vendidas; - número de colaboradores; - espaço; - unidade estatística;
	Massa	- quantidade vendida (kg) - quantidade produzida(kg)
	Monetário	- vendas líquidas / volume de vendas; - margem líquida; - resultados líquidos; - valor por ação; - obrigações (custos dos seguros); - reservas / provisões; - investimentos e desinvestimentos; - custos (produção, energia, etc.);
	Função	- desempenho do produto; - serviços prestados; - produção agrícola; - eficácia agrícola; - durabilidade / tempo de vida do produto; - capacidade de transporte;
	Outras informações relevantes	- preço do produto; - quota de mercado; - margens; - mix do mercado;

Quadro 9- Lista de aspectos e exemplos de indicadores (valor do produto/ serviço). Fonte: WBCSD (2000b)

CATEGORIA	ASPECTOS	INDICADORES
Influência Ambiental	Consumo de energia	- gigajoules consumidos; - tipo de combustível fóssil; - fontes; - emissões;
	Consumo de materiais	- toneladas consumidas; - tipo (matérias-primas); - fontes (renováveis, reciclados, etc.); - características (algum risco ambiental);
	Consumo de recursos naturais	- toneladas consumidas; - fonte; - utilização do solo; - água utilizada fora do processo;
	Produção de rejeito	- antes do tratamento; - técnica de tratamento; - descargas para o solo ou água; - emissões gasosas; - descargas de metais pesados; - descargas de poluentes; - descargas tóxicas;
	Acontecimentos imprevistos	- descargas acidentais;
	Produto / serviço	- características (reciclabilidade, reutilização, etc);
	Resíduos de embalagem	- toneladas vendidas; - fontes;
	Emissões durante a utilização e a eliminação	- emissões para o solo, água e ar do uso e eliminação

Quadro 10- Lista de aspectos e exemplos de indicadores (influência ambiental). Fonte: WBCSD (2000b)

3. MÉTODOS DE PESQUISA

Neste capítulo está descrita a metodologia adotada para a realização deste trabalho, bem como o procedimento para medir o nível de ecoeficiência de um processo industrial. Foi considerada dentre as várias metodologias de pesquisa existentes a pesquisa-ação, que se demonstra a mais adequada para o desenvolvimento aqui apresentado, pois o objetivo proposto está ligado diretamente com a mudança na prática de um projeto Seis Sigma, no qual é possível obter um aprendizado e também a geração de conhecimento cientifico por meio da ação.

3.1. A escolha do método de pesquisa

Na pesquisa-ação de acordo com Mello (2012), o termo pesquisa se refere à produção do conhecimento cientifico e o termo ação, a uma modificação intencional de uma dada realidade. Para Coughlan e Coughlan (2002) a pesquisa-ação é uma abordagem científica para estudar a resolução de uma questão social ou organizacional, envolvendo as pessoas que vivem essa questão diretamente. A pesquisa-ação é um processo participativo, que procura reunir a teoria e a prática, em busca de soluções objetivas de interesse do pesquisador (REASON, BRADBURY, 2001). Para Schwab (2005) uma pesquisa é válida quando suas conclusões ou inferências são verdadeiras. No caso do projeto Seis Sigma em estudo, essa metodologia aplica-se de maneira adequada, pois o projeto será conduzido por um grupo participativo com foco na solução prática de um problema. Para a execução desse processo foram utilizadas as seguintes etapas: planejar, tomar ação, avaliar a ação, planejar novamente e recomeçar o ciclo (ZUBER-SKERRIT; PERRY, 2002). Essa abordagem é participativa, uma vez que todos os membros envolvidos no estudo proposto participam ativamente do seu desenvolvimento. Fez parte do grupo de pesquisa o próprio autor da presente dissertação, uma vez que atuou como *Black Belt* do projeto Seis Sigma tratado na pesquisa-ação. A pesquisa-ação deve ser concorrente com a ação, com o objetivo de tornar a ação eficaz e gerar conhecimento científico uma vez que a sua meta principal não é apenas a resolução de um problema imediato, mas também uma contribuição ao conhecimento científico (CAUCHICK MIGUEL, 2011).

Reforçando esses conceitos, Zumber-Skerrit e Fletcher (2007), afirmam que a pesquisa-ação tem como objetivo realizar trabalhos com pequenos grupos, motivados, interessados, que tenham conhecimento, e estejam interessados em resolver o problema e

gerar conhecimento cientifico. Thiollent (2007) ressalta que para uma pesquisa ser qualificada como pesquisa-ação é vital a implementação de uma ação por parte da equipe implicada com o problema em estudo. O projeto Seis Sigma aqui desenvolvido foi conduzido com um pequeno grupo, no qual todos os participantes são especialistas no processo estudado. Este método de pesquisa requer estudo profundo e detalhado sobre a investigação da causa. As ferramentas utilizadas dentro do projeto Seis Sigma propiciaram uma investigação aprofundada da causa raiz do problema estudado. Dentre elas destacam-se: o diagrama de causa e efeito, o *brainstorm*, a coleta de dados e as ferramentas estatísticas, o que torna a pesquisa-ação ideal para este tipo de pesquisa.

É interessante notar, por outro lado, que frequentemente os pesquisadores aprendem a fazer na maioria das vezes pesquisas quantitativas durante a sua formação acadêmica. No entanto, a pesquisa-ação é predominantemente qualitativa, e para muitos pesquisadores ela torna-se uma nova e excitante experiência (ZUMBER-SKERRIT; FLETCHER, 2007).

O trabalho de pesquisa-ação aqui proposto foi realizado com base em dois ciclos iniciais como mostrados na Figura 5. A equipe do projeto Seis Sigma, liderada pelo autor deste trabalho como seu *Black Belt*, iniciou o ciclo 1, que envolveu: a) planejar a fase 1 que consistiu em se implementar o procedimento Seis Sigma convencional, sem a consideração das variáveis ambientais, b) agir: tomou as ações necessárias para implementar o plano definido na etapa anterior, c) observar: mediu os resultados obtidos, principalmente com relação aos indicadores que permitiram avaliar o nível de ecoeficiência obtido no processo estudado , d) refletir sobre os resultados: verificou se houve melhoria do nível de ecoeficiência do processo estudado antes e depois da aplicação da técnica Seis Sigma convencional, sem levar em conta as variáveis ambientais. O próximo passo foi à repetição pela equipe de um novo ciclo, a fase 2, considerando agora as variáveis ambientais como parte do DMAIC, em linha com a proposta feita por este estudo. Repetiu-se assim a mesma sequência de eventos: a) planejar a fase 2 que envolveu a implementação da técnica Seis Sigma, considerando agora as variáveis ambientais, b) agir: implantou o plano estabelecido na fase anterior, c) observar: mediu os resultados observados, com destaque para os indicadores de desempenho ambientais que mostraram como evoluiu o nível de ecoeficiência do processo estudado em relação ao obtido no ciclo1, d) refletir sobre os resultados: comparou-se os resultados alcançados nos ciclos 1 e 2 para verificar se efetivamente a utilização dos indicadores ambientais incorporados ao DMAIC geraram um maior nível de ecoeficiência no processo avaliado e, por consequência, na empresa como um todo. Por fim, refletiu-se sobre

todo o processo da pesquisa-ação e relatou o que se aprendeu e o que foi feito por meio deste trabalho.

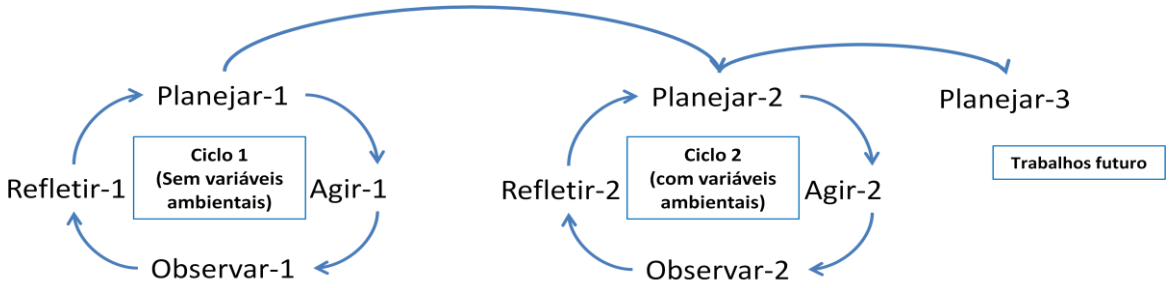


Figura 5 - Desenvolvimento dos projetos com pesquisa-ação. Fonte: adaptado de Zuber-Skerrit e Perry (2002)

3.2. A medida do nível de ecoeficiência

O desenvolvimento metodológico que se propõe para esta dissertação pressupõe que se possa medir o nível de ecoeficiência de um processo industrial ou da empresa como um todo. De acordo com o já exposto neste trabalho, a medida da ecoeficiência deveria envolver a utilização de indicadores desempenho que procurassem relacionar o valor do produto ou serviço com sua influência ambiental, sendo, portanto, medidas do tipo quanto maiores, melhores (WBCSD, 2000a). Como indicadores com essas características, os mesmos autores sugerem, por exemplo, Kg de material produzido por giga-joule de energia consumida e Kg de material produzido por tonelada de CO_2 equivalente emitido pela empresa em questão.

Embora o conceito de ecoeficiência venha sendo utilizado para realizar avaliações do desempenho ambiental e econômico da empresa como um todo, não se encontrou na literatura qualquer limitação à sua consideração para medir tais variáveis de maneira mais restrita, como no âmbito de um processo industrial específico ou mesmo de um equipamento individualizado.

Ocorre, contudo, que a medida da ecoeficiência de uma empresa é usualmente feita, como se demonstrou na revisão da literatura, por meio do acompanhamento, ao longo do tempo, dos indicadores de desempenho selecionados para essa medição. Isso é feito de maneira isolada para cada indicador, isto é, a ecoeficiência aumenta à medida que os índices selecionados crescem com o passar do tempo (geralmente como decorrência de ações específicas tomadas com essa finalidade).

Mas, há que se destacar uma dificuldade metodológica para se avaliar a evolução da ecoeficiência em razão da possível variação de indicadores de desempenho diferentes em sentidos opostos. Explique-se melhor. Imagine-se, por exemplo, que para aumentar o volume de material produzido por tonelada de CO_2 equivalente emitido pela empresa, processo ou máquina se decida pela instalação de equipamento adicional para alcançar esse objetivo. Em decorrência dessa nova instalação, suponha-se que a quantidade de material produzido por giga-joule de energia consumida diminua em função de um aumento no consumo da energia elétrica necessária para movimentar o maquinário recém-adquirido. Nesse caso, o que aconteceu com a ecoeficiência como um todo? Aumentou? Diminuiu? Não se alterou? Note-se que mesmo que as variações fossem equivalentes (por exemplo, 10% de redução nas emissões de CO_2 com 10% de aumento no consumo de energia), as propostas de medida da ecoeficiência não contemplam formas de se avaliar de maneira conjunta tais modificações, como também foi possível verificar na revisão bibliográfica.

Por isso, este trabalho propõe uma maneira de medir o nível de ecoeficiência de um processo industrial por meio da proposta de uma grandeza única que possa refletir o resultado global da sua evolução, mesmo que as variáveis consideradas nessa avaliação caminhem em sentidos opostos.

3.3. A medida do nível de ecoeficiência de um processo industrial

Segundo Chase et al. (2006, p.115) um processo é *"qualquer parte de uma organização que transforma as entradas em saídas que, espera-se, tenham um valor maior para a organização do que as entradas originais"*. Fazem parte do processo industrial em particular os equipamentos e ferramentas, a mão de obra, as matérias primas e componentes além de todos os demais recursos necessários para fazer essa transformação ocorrer como energia, recursos financeiros, instalações industriais etc.

Para os efeitos deste trabalho, uma área de processo industrial ou simplesmente um processo industrial foi considerado como um conjunto de equipamentos com operações relacionadas que produzem bens intermediários ou finais dentro de uma planta fabril. Dessa forma, avaliar a ecoeficiência de um processo significa, para este estudo, aferir o desempenho econômico e ambiental desse conjunto de equipamentos de modo a poder medir, continuamente, se a relação entre o valor dos produtos produzidos e sua influência ambiental está aumentando no decorrer do tempo. Para isso, este trabalho propõe inicialmente uma forma de medir o nível de ecoeficiência de um equipamento específico para, a seguir, se

estender essa conceituação para uma área de processo no quais diversos equipamentos estejam em operação.

3.3.1. A medida do nível de ecoeficiência de uma fase do processo

Considere-se determinada fase do processo *M* para a qual *n* indicadores de desempenho foram estabelecidos para medir a sua ecoeficiência. Sejam e_1, e_2, e_3,....., e_n os valores assumidos por esses indicadores num determinado instante *t*. Esses valores podem ser representados num gráfico do tipo radar composto por eixos igualmente espaçados entre si por um ângulo $\alpha = 360^o/n$ ($n \geq 3$). Essa representação define no plano uma área *A* equivalente à soma das áreas dos triângulos formados por dois indicadores consecutivos, como ilustra a Figura 6. Dessa forma a área A poderá ser calculada conforme a relação 1.

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \cdots + A_n \quad (1)$$

Contudo, a Matemática ensina que a área de um triângulo qualquer pode ser determinada pelo produto de dois de seus lados pelo seno do ângulo formado entre eles, divido por 2.

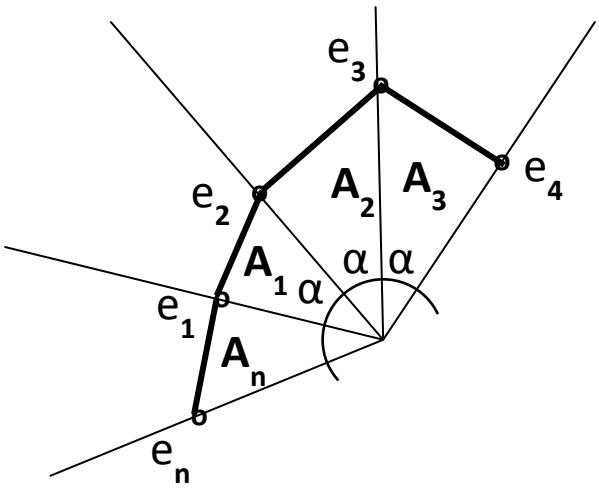


Figura 6 - Gráfico tipo radar formado pelos n indicadores de desempenho para medir a ecoeficiência do equipamento M

Com base nessa consideração, a relação 1 poderá então ser expressa por:

$$A = \frac{e_1 \times e_2}{2} sen\alpha + \frac{e_2 \times e_3}{2} sen\alpha + \frac{e_3 \times e_4}{2} sen\alpha + \cdots + \frac{e_n \times e_1}{2} sen\alpha \quad (2)$$

ou

$$A = [e_1 \times e_2 + e_2 \times e_3 + e_3 \times e_4 + \cdots + e_n \times e_1] \times \frac{sen\alpha}{2} \quad (3)$$

Observa-se na relação (3), que quanto maiores forem os valores assumidos pelos indicadores de desempenho, maior será a área *A* calculada. Por outro lado, o desenvolvimento teórico já apresentado também permite afirmar que quanto maiores forem os valores dos indicadores de desempenho maior será o nível de ecoeficiência. Por isso, este trabalho propôs como medida do nível de ecoeficiência de uma fase do processo *M* no instante *t* (E'_{Mt}), a área do gráfico radar cujos componentes são os valores assumidos pelos indicadores de desempenho selecionados para medir a ecoeficiência do equipamento considerado no mesmo instante *t*, ou seja:

$$E'_{Mt} = [e_1 \times e_2 + e_2 \times e_3 + e_3 \times e_4 + \cdots + e_n \times e_1] \times \frac{sen\alpha}{2} \quad (4)$$

Ocorre que em um processo industrial no qual diferentes tipos de equipamentos estejam em operação, o número de indicadores de desempenho considerados para cada um deles poderá não ser uniforme. Veja-se o exemplo de uma área de usinagem na qual há, dentre outros, dois equipamentos bem distintos: a) um torno CNC de grande porte para o qual cinco indicadores de desempenho tenham sido definidos para medir adequadamente seu nível de ecoeficiência (n^o de peças usinadas / KWh de energia consumida, n^o de peças usinadas / litro de óleo solúvel consumido, n^o de peças usinadas / Kg de cavaco removido, n^o de peças usinadas / aresta de inserto utilizado e n^o de peças usinadas / Kg de CO_2 equivalente emitido pelo superaquecimento do fluido de corte) e b) uma simples furadeira de coluna que utiliza somente dois indicadores (n^o de peças usinadas / KWh de energia consumida e n^o de peças usinadas / Kg de cavaco removido). A aplicação da relação (4) nas duas situações descritas não gerará, por razões óbvias, medidas de ecoeficiência que sejam comparáveis entre si. Para contornar essa dificuldade, este trabalho propõe relativizar a medida do nível de ecoeficiência de um equipamento de maneira proporcional ao número de indicadores de desempenho empregados em cada caso. Para isso, propõe-se adequar a relação (4) a essa situação, dividindo o resultado obtido pelo número de indicadores utilizados ou:

$$E_{Mt} = \frac{E'_{Mt}}{n} = [e_1 \times e_2 + e_2 \times e_3 + e_3 \times e_4 + \cdots + e_n \times e_1] \times \frac{sen\alpha}{2n} \quad (5)$$

Por outro lado, devido à forma já mencionada para a seleção dos indicadores de desempenho para avaliar a ecoeficiência, a pior situação em termos de ecoeficiência ocorreria, no limite, quando o valor do produto fosse desprezível em relação ao seu impacto ambiental, ou seja, quando todos os indicadores de desempenho apresentassem valores iguais a zero. Assim, o ponto de pior desempenho em termos de ecoeficiência para o equipamento em consideração poderia ser caracterizado por uma área *A* = 0, em decorrência do fato que os

valores dos indicadores de desempenho selecionados para medir a ecoeficiência do equipamento apresentassem valores nulos.

Do desenvolvimento até aqui mostrado pode-se concluir que, pelo menos em teoria, a pior situação em termos de ecoeficiência de uma fase do processo ocorreria quando $E_{Mt} = 0$. A partir desse mínimo, qualquer melhoria observada em pelo menos dois dos indicadores considerados, implicaria na obtenção de um $E_{Mt+1} > 0$, porque no gráfico radar (com $n \geq 3$) pelo menos um dos seus triângulos teria uma área diferente de zero. De maneira análoga, à medida que os indicadores de desempenho fossem melhorando, a área A ou o E_{Mt+2} iria aumentando. Em resumo, quanto maior for o E_M de um equipamento melhor o nível de sua ecoeficiência global.

Até o presente momento definiu-se um gráfico radar para $n \geq 3$, porque para um número de indicadores de desempenho igual a 1 ou 2 os conceitos acima desenvolvidos não se aplicam como propostos. Por isso, propõe-se adotar os seguintes critérios de avaliação nos dois casos não anteriormente considerados:

a) n = 1 – o equipamento possui um único indicador de desempenho *(e_1)* para medir a sua ecoeficiência. Nesse caso, propõe-se que o valor da ecoeficiência desse equipamento seja dado pelo próprio valor do indicador considerado, ou seja:

$$E_{Mt} = e_1 \tag{6}$$

b) n = 2 – o equipamento possui apenas dois indicadores *(e_1 e e_2)* para medir a sua ecoeficiência. Aqui se propõe que o valor da ecoeficiência desse item seja determinado pela área do triângulo formado pelos dois indicadores considerados, formando um ângulo de 90º entre eles. Dessa forma:

$$E_{Mt} = [e_1 \times e_2] \times \frac{sen90°}{2\times2} = \frac{e_1 \times e_2}{4} \tag{7}$$

Deve-se também ressaltar que a dificuldade metodológica anteriormente mencionada para se avaliar a evolução da ecoeficiência quando indicadores diferentes se deslocam em sentidos contrapostos, também fica solucionada com a presente proposição. A simples consideração dos indicadores com os novos valores no cálculo do E_{Mt+1} poderia mostrar o efeito combinado das alterações opostas no nível da ecoeficiência global do equipamento. Assim, como resultado desse novo cálculo, se $E_{Mt+1} > E_{Mt}$, a ecoeficiência teria aumentado. Caso contrário, ($E_{Mt+1} < E_{Mt}$), ela teria diminuído.

Um argumento possível contra o procedimento sugerido é o fato de que os indicadores de ecoeficiência poderiam envolver medidas de diferentes grandezas que podem impor limitações na condução da medição. Considere-se um exemplo extremo para ilustrar este

ponto. Dois indicadores de ecoeficiência frequentemente utilizados em equipamentos de usinagem são o número de peças usinadas por MWh de eletricidade consumida e o número de peças usinadas por litro de óleo solúvel consumido. Os valores típicos para esses indicadores são respectivamente, por exemplo, 0,25 e 122,4. Sob tais circunstâncias, um aumento em 10% no número de peças usinadas por MWh (um aumento do indicador para 0,28) pode ser compensada por uma redução de cerca de 1,0% do número de peças usinadas por litro de óleo solúvel consumido, através do cálculo do nível de ecoeficiência global do equipamento, por meio da expressão (5). Para superar esta dificuldade este trabalho recomenda que os indicadores de ecoeficiência tenham as mesmas ordens de grandeza, idealmente compreendidos entre 1,0 e 99,0 para evitar que, como resultado dos sucessivos produtos no cálculo da relação (5), se obtenha um número excessivamente alto para o nível de ecoeficiência do equipamento estudado. Para essa finalidade deve-se ajustar as unidades de medida de cada indicador. Assim, no exemplo acima, a unidade de medida para o primeiro indicador poderia ser alterada do número de peças usinadas por MWh de eletricidade consumida (0,25) para o número de peças usinadas por 10KWh de eletricidade consumida (25,0). Da mesma maneira o segundo indicador seria alterado de 122,4 peças usinadas por litro de óleo solúvel consumido para 12,24 centilitros de óleo solúvel consumido. Ao fazer isso, os dois indicadores passariam agora a atender a recomendação retro mencionada.

Finalmente, é também relevante levar em consideração que o procedimento proposto dá igual importância para todos os indicadores de ecoeficiência utilizados nos cálculos. É possível argumentar que índices diferentes podem ter importâncias distintas. Este problema poderia ser contornado mediante a atribuição de pesos diferentes para cada indicador, ponderando assim o cálculo do valor médio apresentado na expressão (5). No entanto, esta consideração transcende o escopo do presente trabalho, uma vez que implicaria numa ampla discussão sobre a importância relativa de cada um dos indicadores, exigindo provavelmente uma validação empírica extensiva.

3.3.2. A medida do nível de ecoeficiência de uma área de processo

Para estender o conceito da medida do nível de ecoeficiência para uma área de processo industrial, seja P um processo composto por i equipamentos, designados por M_1, M_2, M_3, ..., M_i. Com base no desenvolvimento anteriormente feito, considere-se que cada

equipamento possui um conjunto de *n* indicadores de desempenho selecionados para medir sua respectiva ecoeficiência.

Também pelo proposto no item 3.3.1. acima, pode-se determinar a ecoeficiência global de cada equipamento que compõe o processo analisado calculando-se:

$$E_{M1t} = [e_{11} \times e_{12} + e_{12} \times e_{13} + e_{13} \times e_{14} + \cdots + e_{1n} \times e_{11}] \times \frac{sen\alpha}{2n}$$
$$E_{M2t} = [e_{21} \times e_{22} + e_{22} \times e_{23} + e_{23} \times e_{24} + \cdots + e_{2n} \times e_{21}] \times \frac{sen\alpha}{2n}$$
$$E_{M3t} = [e_{31} \times e_{32} + e_{32} \times e_{33} + e_{33} \times e_{34} + \cdots + e_{3n} \times e_{31}] \times \frac{sen\alpha}{2n} \quad (8)$$
$$\vdots$$
$$E_{Mit} = [e_{i1} \times e_{i2} + e_{i2} \times e_{i3} + e_{i3} \times e_{i4} + \cdots + e_{in} \times e_{i1}] \times \frac{sen\alpha}{2n}$$

Contudo, de maneira geral pode-se assumir que a ecoeficiência global do processo como um todo resulta da somatória da ecoeficiência de cada uma de suas partes, ou seja, de cada um dos equipamentos que o compõe. Com base nesse pressuposto, pode-se afirmar que a medida da ecoeficiência do processo no instante *t* poderá ser determinada por meio da soma dos valores assumidos pela medida de ecoeficiência de cada um dos equipamentos que participa da área de produção estudada. Assim, tem-se o valor da ecoeficiência do processo *P* no instante *t* (E'_{Pt}) calculado pela seguinte relação:

$$E'_{Pt} = \sum_{q=1}^{i} E_{M_{qt}} \quad (9)$$

No entanto, essa forma de calcular a ecoeficiência do processo fará com que ela, em princípio, seja função do número de equipamentos existentes no processo avaliado. De maneira geral, quanto mais equipamentos existir em uma área de processos, maior será o valor calculado para a sua ecoeficiência. Tal fato introduz um fator complicador quando se queira comparar, por exemplo, as ecoeficiências de duas áreas de processo distintas nas quais haja números diversos de equipamentos em cada uma. Por isso, para evitar esse tipo de restrição, este trabalho propôs que a ecoeficiência de uma área de processo *P* em um instante *t* seja determinada como a média dos níveis de ecoeficiência dos *"i"* equipamentos nela contidos, ou seja:

$$E_{Pt} = \frac{\sum_{q=1}^{i} E_{M_{qt}}}{i} \quad (10)$$

De maneira análoga ao desenvolvimento feito para o caso de equipamento único, verifica-se também no caso de uma área de processo, que a pior situação em termos de ecoeficiência ocorreria, quando, no limite, os níveis de ecoeficiência de todos os equipamentos desse processo apresentassem valores iguais a zero. Ou seja, o ponto de pior

desempenho em termos de ecoeficiência para o processo em análise seria aquele com valor nulo, já que nesse caso a média calculada pela relação (10) seria igual a zero.

Da mesma maneira que as ponderações feitas para o caso de um equipamento único, pode-se depreender que, pelo menos em teoria, a pior situação em termos de ecoeficiência do processo seria observada quando $E_{Pt} = 0$. A partir desse ponto, qualquer melhoria observada em qualquer dos equipamentos desse processo, resultaria na obtenção de um $E_{Pt+1} > 0$, uma vez que se teria pelo menos um equipamento para o qual a sua ecoeficiência seria diferente de zero. De maneira semelhante, à medida que os indicadores de desempenho dos equipamentos individuais fossem melhorando, o valor da ecoeficiência do processo (E_{Pt+2}) iria aumentando. Ou seja, quanto maior for o E_P de um processo melhor o nível de sua ecoeficiência global.

Por outro lado, a melhoria do nível de ecoeficiência alcançada no processo, só pode ser considerada como uma empresa ecoeficiente, se no mínimo a empresa estiver atendendo os requisitos legais, ou seja, atendendo as legislações incidentes ao seu ramo de atividade.

3.4. O planejamento da ação

A empresa usada para sustentar a pesquisa-ação proposta por este trabalho pertence ao setor metal mecânico, com cerca de 500 funcionários e realiza operações na manufatura de fundidos e usinados não ferrosos, atendendo a seus clientes sob pedido. Seus principais segmentos de atuação são: mineração (50% de seu faturamento), energia (25%), tratores (15%) e outros (10%). Tem 60 % de suas vendas realizadas para o mercado nacional e 40% para o internacional. A empresa tem a técnica Seis Sigma implementado há 8 anos, durante os quais já desenvolveu mais de 25 projetos na área de usinagem, na sua grande maioria voltados para redução do tempo de ciclo ou de setup. A técnica Seis Sigma tem demonstrado ser, nesta empresa, uma ferramenta eficaz para a melhoria dos processos industriais. Em busca de melhoria continua a empresa certificou-se na ISO 9001, ISO/TS 16949 e também focada na melhoria do seu desempenho ambiental implementou e certificou o seu sistema de gestão ambiental baseado na ISO 14001. Tem como objetivos ambientais a redução do consumo de recursos naturais e mitigação de resíduos gerados no processo produtivo. Busca o atendimento às legislações incidentes ao seu negócio, o que torna obrigatório o atendimento de 152 legislações, das quais 82 são específicas ao seu ramo de atuação.

Dentre os processos industriais da empresa escolhida, este trabalho selecionou para desenvolver a pesquisa-ação aqui proposta a usinagem, por se tratar de uma área na quais diversas variáveis que afetam a ecoeficiência estão presentes, além de representar a área de

maior investimento e de maior relevância para a qualidade dos produtos fornecidos pela empresa.

A área de usinagem escolhida para o estudo em questão produz 9 tipos de peças distintas, que são usinadas em 11 equipamentos diferentes, de acordo com o quadro 11. O processo estudado consiste em usinar as peças em máquinas convencionais e CNC, que estão dispostas na área de usinagem, conforme layout esquemático mostrado na Figura 7.

Peças	**Máquinas**										
	Traub 01	Traub 02	Torno revolver 01	Torno revolver 02	Torno revolver 03	Furadeira 01	Retificadora 01	Nexus 250 01	Nexus 100 01	Turn 6G 01	BND 42T5 01
A		x	x	x			x		x		
B		x	x	x		x	x	x			
C	x				x			x			
D				x							x
E				x						x	
F				x						x	
G				x							x
H				x						x	x
I				x						x	

Quadro 11- Máquinas x peças

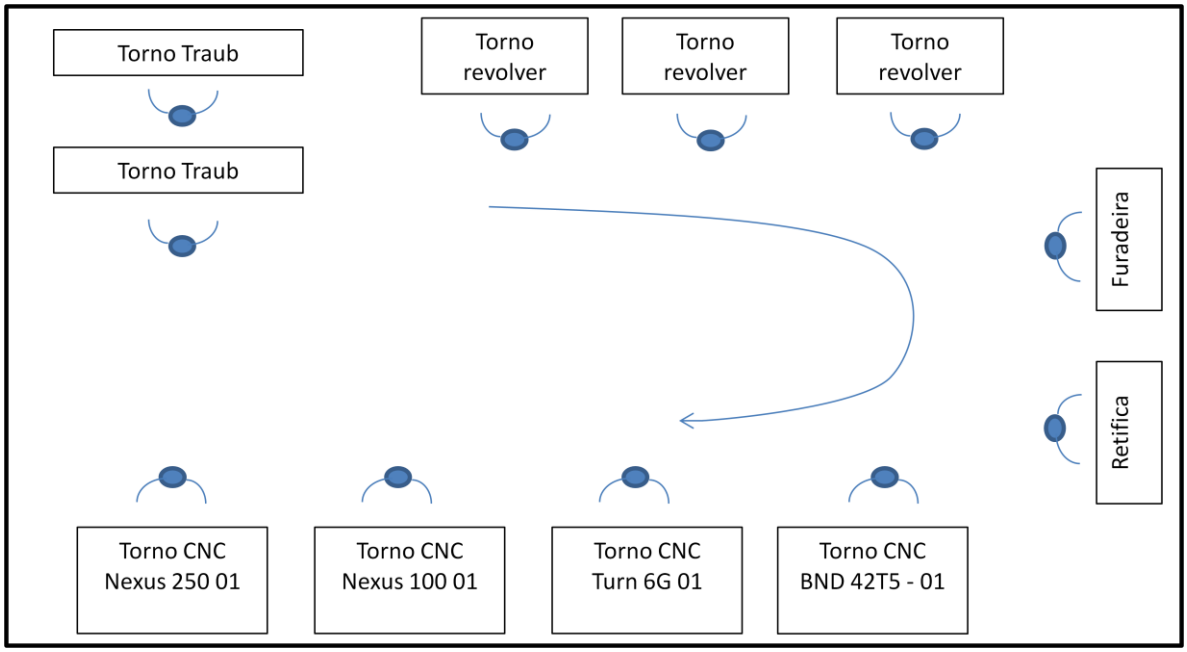


Figura 7 - Leiaute ilustrativo do processo de usinagem

Para maior clareza, descreve-se sucintamente cada um dos equipamentos que compõem a área de processo escolhida:

- Tornos Traub: utilizados para cortar as barras de 2 metros de comprimento em blanks. Nesta operação são utilizados óleo solúvel, energia elétrica, insertos para usinagem e é gerado resíduo de cavaco durante a operação.
- Tornos revolver: empregados na operação de quebra de cantos vivos e eliminação de rebarbas. Durante a operação consomem energia elétrica, insertos e não é necessário o uso de refrigeração (óleo solúvel). Há uma pequena geração de resíduo de cavaco.
- Furadeira: utilizada neste processo para realizar a furação de diâmetro de 8 mm em apenas um item do escopo. Nesta operação é consumida energia elétrica e não se utilizam inserto ou óleo solúvel. Gera apenas uma pequena quantidade de cavaco para o processo.
- Retificadora: utilizada para acabamento superficial de dois itens do escopo, na qual é consumida energia elétrica e óleo solúvel. Não se utilizam insertos e não se gera cavaco, em volume mensurável.
- Tornos CNC: utilizados para realizar praticamente todas as operações de usinagem nos itens do escopo. Nesta operação são realizados desde desbastes até o acabamento. São consumidos energia elétrica, óleo solúvel, insertos e são gerados cavacos durante a usinagem.

Em uma análise preliminar do processo sob o enfoque da ecoeficiência, pode-se notar que as máquinas convencionais como: Torno Traub, Torno revolver, Furadeira e Retificadora apresentam consumo de energia elétrica, óleo solúvel, insertos e geração de cavaco não significantes em relação aos demais equipamentos da área, o que as torna desinteressantes para avaliar melhorias obtidas na ecoeficiência como decorrência da utilização da abordagem Seis Sigma. Por essa razão, somente os tornos CNC serão considerados na presente pesquisa-ação, já que, do ponto de vista da possibilidade de se implementar melhorias, estes são os equipamentos nessa área de processo que permitirão ganhos significativos tanto nas variáveis do processo como nas da ecoeficiência. No entanto, devem-se considerar os demais equipamentos a partir de determinado momento em que sejam esgotados ou aproximados os ganhos significativos, ou seja, os equipamentos podem se tornar interessantes para um novo projeto Seis Sigma. Os tornos CNC utilizados no processo de fabricação e que serão considerados no presente estudo são:

a) Torno M_1 - Modelo Quik Turn Nexus 100 – II. Fabricado pela Mazak, tem capacidade de usinar diâmetros de até 280 mm, com deslocamento de seus eixos

“x” 190mm e “z” 330mm, com sua potência instalada de 11 kW. Este equipamento ocupa uma área de 1880 x 1630mm e possui demais características conforme a Figura 8.

Modelo: QUICK TURN NEXUS 100-II		
	Fabricante	MAZAK
	Diâmetro máximo de usinagem	Ø 280 mm
	Deslocamento dos eixo (X / Z)	190 / 330 mm
	Capacidade de armazenamento de ferramentas	12
	Velocidade máxima	6000 rpm
	Potência instalada	11 kW
	Dimensões (tamanho do equipamento)	1880 x 1630 mm

Figura 8 - Característica do Torno CNC Nexus 100 – II (Fonte: manual Mazak)

b) Torno M_2 – Modelo Quik Turn Nexus 250 – II, detalhado na Figura 9, foi fabricado pela Mazak, tem capacidade de usinar diâmetros de até 380 mm, com deslocamento de seus eixos “x” 230mm e “z” 575mm, com sua potência instalada de 26 kW, ocupando uma área de 2930 x 1978mm.

Modelo: QUICK TURN NEXUS 250-II MS		
QUICK TURN NEXUS 200 M/Y shown	Fabricante	MAZAK
	Diâmetro máximo de usinagem	Ø 380 mm
	Deslocamento dos eixo (X / Z)	230 / 575 mm
	Capacidade de armazenamento de ferramentas	12
	Velocidade máxima (eixo principal)	4000 rpm
	Velocidade máxima (eixo secundário)	6000 rpm
	Velocidade máxima (mandril)	4500 rpm
	Potência instalada	26 kW
	Dimensões (tamanho do equipamento)	2930 x 1978 mm

Figura 9 - Característica do Torno CNC Nexus 250 – II (Fonte: manual Mazak)

c) Torno M_3 – Torno modelo Quik Turn 6G, mostrado na Figura 10, também fabricado pela Mazak, tem capacidade para usinar diâmetros de no máximo 42 mm, com deslocamento de seus eixos “x” 300mm e “z” 240mm, com sua potência instalada de 5,5 kW. Este equipamento ocupa uma área de 1570 x 1592mm.

Modelo: QUICK TURN 6G		
	Fabricante	MAZAK
	Diâmetro máximo de usinagem	Ø 42 mm
	Deslocamento dos eixo (X / Z)	300 / 240 mm
	Velocidade máxima	7000 rpm
	Potência instalada	5,5 kW
	Dimensões (tamanho do equipamento)	1570 x 1592 mm

Figura 10 - Característica do Torno CNC Turn 6G (Fonte: manual Mazak)

d) Torno M_4 – Modelo BND 42T5 fabricado pela Miyano e mostrado na Figura 11, tem capacidade para usinar diâmetros de no máximo 42 mm, com deslocamento de seus eixos “x” 100mm e “z” 185mm, com sua potência instalada de 6 kW. Este equipamento ocupa uma área de 1270 x 2110mm.

Modelo: BND 42T5		
	Fabricante	MIYANO
	Diâmetro máximo de usinagem	Ø 42 mm
	Deslocamento dos eixo (X / Z)	100 / 185 mm
	Capacidade de armazenamento de ferramentas	12
	Velocidade máxima	5000 rpm
	Potência instalada	6 kW
	Dimensões (tamanho do equipamento)	1270 x 2110 mm

Figura 11 - Característica do Torno CNC BND (Fonte: manual Miyano)

Em termos de ecoeficiência, os principais aspectos ambientais identificados nos equipamentos considerados para este estudo são: o consumo e o descarte de óleo solúvel, proveniente da base de 95% de água e 5% de óleo solúvel, o consumo de energia elétrica para funcionamento dos motores principais e auxiliares, controladores e acessórios, o consumo de insertos utilizados para o corte do material durante a usinagem e o descarte dos resíduos de cavaco provenientes do corte do material na máquina. Os respectivos indicadores de desempenho foram selecionados com base nos aspectos ambientais retro mencionados e levam em consideração o valor do produto dividido pela sua influência ambiental. Dessa forma, utilizou-se neste trabalho os indicadores de desempenho para a ecoeficiência dos equipamentos estudados conforme definidos na Tabela 2, seguindo as recomendações do WBCSD (2000a).

Tabela 2 - Indicadores de desempenho para o cálculo da ecoeficiência dos tornos CNC

Indicadores de Desempenho dos Tornos CNC	
e_1	Número de peças usinadas / kWh
e_2	Número de peças usinadas / centilitro de óleo solúvel
e_3	Número de peças usinadas / 100g de cavaco gerado
e_4	Número de peças usinadas / cada aresta de corte do inserto

Com base nos indicadores selecionados e no desenvolvimento proposto no item 3.3.1 acima, pode-se calcular a ecoeficiência de cada um dos tornos CNC considerados na presente pesquisa ação (E_{Mqt}) num instante *t*, aplicando-se a relação (5) aos indicadores da Tabela 2:

$$E_{Mqt} = \left[e_{1qt} \times e_{2qt} + e_{2qt} \times e_{3qt} + e_{3qt} \times e_{4qt} + e_{4qt} \times e_{1qt}\right] \times \frac{sen90°}{2\times4} \qquad 1 \leq q \leq 4 \quad (11)$$

ou

$$E_{Mqt} = \frac{1}{8}\left[e_{1qt} \times e_{2qt} + e_{2qt} \times e_{3qt} + e_{3qt} \times e_{4qt} + e_{4qt} \times e_{1qt}\right] \quad 1 \leq q \leq 4 \qquad (12)$$

De maneira análoga e apoiada no que acima se expos, pode-se também determinar a ecoeficiência da área de processo estudada (tornos CNC) num instante *t* por meio da utilização da relação (10):

$$E_{Pt} = \frac{\sum_{q=1}^{i} E_{Mqt}}{i} = \frac{E_{M1t}+E_{M2t}+E_{M3t}+E_{M4t}}{4} \qquad (13)$$

Como já mencionado anteriormente, para poder validar a possibilidade de aplicação a situações do mundo real e a relevância da técnica Seis Sigma incorporando variáveis ambientais, este trabalho aplicou os conceitos aqui propostos à área de processo de usinagem selecionada, ou seja, aos 4 tornos CNC escolhidos *(M_1, M_2, M_3 e M_4).* Para isso foi inicialmente feita a medida da ecoeficiência desse processo antes de se aplicar o projeto Seis Sigma *(E_{P1}).* Isso foi realizado por meio da aplicação das relações (12) e (13) aos indicadores de desempenho da Tabela 2, obtidos para os referidos equipamentos antes do início de aplicação do projeto Seis Sigma.

Em seguida, foi aplicado ao processo escolhido o DMAIC convencional, sem considerar as variáveis ambientais, quando então e foi medido o novo grau de ecoeficiência desse processo *(E_{P2}),* por meio da medição dos indicadores de desempenho selecionados após a implementação das melhorias sugeridas pelo projeto Seis Sigma correspondente. É interessante destacar que mesmo sem a preocupação com o meio ambiente as melhorias de processo introduzidas aumentaram o nível de ecoeficiência dos tornos estudados, na medida em que, por exemplo, uma redução nos tempos de ciclo das peças acarretou uma redução no consumo de energia elétrica o que fez com que o número de peças usinadas por KWh aumentasse. Seguindo com a pesquisa-ação, o DMAIC modificado, considerando agora as variáveis ambientais, foi então aplicado sobre o mesmo processo, determinando-se o novo nível da ecoeficiência para os 4 tornos em avaliação *(E_{P3}).* Para concluir os estudos feitos, os resultados obtidos foram comparados para se verificar se existe diferença significativa entre o nível de ecoeficiência sem as considerações ambientais *(E_{P2})* e aquele obtido após a incorporação das variáveis ambientais ao DMAIC *(E_{P3}).* O detalhamento desses procedimentos e respectivos cálculos são apresentados no Capítulo 5.

4. PROCEDIMENTO DE INTEGRAÇÃO DA TÉCNICA SEIS SIGMA (DMAIC) COM METRICAS AMBIENTAIS

Como já descrito anteriormente, um dos objetivos do presente trabalho foi estabelecer um procedimento para integrar as métricas ambientais à técnica Seis Sigma, especificamente ao DMAIC. Em linha com essa meta, o objetivo deste capítulo é propor uma maneira de integrar as métricas ambientais à técnica Seis Sigma, modelo DMAIC, de tal forma que seja possível criar um procedimento que idealmente busca aumentar o ganho na ecoeficiência de um processo industrial ou da empresa como um todo.

Para isso sugeriu-se algumas modificações nas fases do DMAIC, conforme descrito a seguir:

Na fase definir *(Define)* do procedimento Seis Sigma convencional são, em geral, definidas as variáveis do processo estudado. Na versão modificada que aqui se propôs desenvolver são determinadas as variáveis ambientais e serem consideradas e devidamente incorporadas ao DMAIC por meio da utilização de métricas ambientais. Ainda, o *project charter*[1] de um projeto a ser desenvolvido deverá levar em consideração, além das oportunidades de melhoria do processo, também as oportunidades de melhoria ambiental, conforme detalhado abaixo:

a) Caso do negócio: nesta etapa descreve os benefícios de empreender o projeto dando foco nas oportunidades de melhoria do processo e também nas ambientais. Essa descrição é importante para alinhar a equipe com os propósitos do projeto.

b) Resumo da meta: define o objetivo do projeto e é específico, mensurável, atingível, relevante e limitado no tempo. Aqui devem ser identificados dois conjuntos de variáveis: a) a “Y” para a melhoria do processo (variável de saída do processo) e seus respectivos os “x´s” (variáveis de entrada do processo); e b) a “E” para melhoria ambiental (variável de saída ambiental) com os seus “e´s” (variáveis de entrada ambientais). É por meio dessa etapa que será medido o sucesso da equipe, uma vez que as variáveis de saída “Y” e “E” serão os indicadores principais do projeto. A equipe, atacando as variáveis de entrada “x´s” e “e´s”, irá reduzir a variabilidade da saída. A meta proposta serve de direcionamento do projeto para à equipe.

[1] *Project charter* – é carta do projeto composta pelo caso do negócio, meta, cronograma, lista de oportunidades, escopo e equipe do projeto. Vide exemplo no quadro 12.

c) Lista de oportunidades: descreve aqui o porquê devem-se tomar as iniciativas de melhoria. Para a equipe do projeto é fundamental saber as oportunidades de ganho para que haja uma motivação em executar o projeto. Nessa lista devem-se colocar as oportunidades de ganhos do processo e também os ambientais, derivando-se as variáveis identificadas no resumo da meta. Para criar esta lista devem-se observar as oportunidades em empreender o projeto. Essa lista é feita pela equipe, por meio da ferramenta *brainstorm*.

No Quadro 12 que ilustra o Project Charter, é possível visualizar um exemplo incorporando as métricas ambientais às variáveis de processo usualmente consideradas em projetos Seis Sigma.

No mapeamento do processo é feito um fluxograma, mapeando todo o processo definido no escopo do projeto. Após o mapeamento utiliza-se a ferramenta SIPOC[2] *(Supplier, Input, Process, Output, Customer)* para identificar as etapas do processo, os "Y", "x", "E", "e" e as oportunidades de melhoria. O mapa de processo é base para a comunicação, identificação dos ganhos rápidos e proporciona uma visão passo a passo do processo em estudo. O SIPOC é elaborado em conjunto com a equipe, identificando os fornecedores, as entradas, os processos, as saídas e os clientes. Após definido o SIPOC são identificados os indicadores de entrada, de processo e de saída. No SIPOC e nos indicadores identificados são contempladas as variáveis de processo e variáveis ambientais.

[2] SIPOC – Mapa de gestão do processo, no qual é possível visualizar todas as entradas e seus fornecedores, o processamento das entradas e as saídas para o cliente.

PROJECT CHARTER	
Caso do Negócio	Com uma projeção para 2012 de um mercado cada vez mais competitivo e mais exigente em relação à qualidade, prazo de entrega e consciência ambiental, identificamos a necessidade de ações de melhorias na gestão da linha de produção para que possamos reduzir o tempo de ciclo do produto, atender os clientes no prazo, e melhorar a ecoeficiência do processo.
Resumo da Meta	Y= reduzir o tempo de ciclo em 10% até agosto de 2012. x_1= Preparação (setup); x_2= Programação de produção; x_3= Programa CNC; x_4= Ferramental; x_5= Plano de controle. E= aumentar o nível de ecoeficiência do processo em 10% até agosto 2012. e_1= consumo de óleo solúvel; e_2= consumo de energia elétrica; e_3= consumo de inserto de usinagem; e_4= geração de resíduo de cavaco;
Lista de Oportunidades	Processo • Aumento da capacidade produtiva; • Redução de atraso ao cliente; • Competitividade; Meio Ambiente • Redução do consumo de recursos naturais; • Redução de resíduos; • Aumento da consciência ambiental da empresa; Geral • Melhoria da imagem com os colaboradores e clientes.

Quadro 12- Exemplo de *Project Charter* considerando as variáveis de processo e também as ambientais

Na fase medir *(Measure)* é determinado o plano de medição contemplando ambas as variáveis (do processo e ambientais), bem como avaliado o método de medição e coleta de dados. Esse plano de medição é para os indicadores identificados na criação do SIPOC, sejam eles indicadores de entrada, de processo e de saída. Para uma boa coleta de dados é realizada uma análise do sistema de medição (MSA) e também avaliada a capacidade do processo. Essa etapa é fundamental, pois a coleta de dados precisa ser representativa e aleatória. Na fase medir (*Measure*) é comum encontrar ganhos rápidos (*Quick win)*, que são resultados acelerados, fáceis de implementar e de baixo custo. Ao identificar um ganho desses, tanto para a melhoria ambiental como para a melhoria do processo, as ações que o gera são implementada rapidamente. Nesta fase é identificado o estado atual das variáveis do processo e calculado o nível de ecoeficiência como proposto no capítulo 3 deste trabalho. Depois de identificado o nível atual de ecoeficiência, ele é colocado na plataforma ardente (ferramenta

que demonstra o estado atual do projeto e o seu estado desejado futuro). Essa ferramenta é de alta relevância para equipe, pois nela são definidos claramente a meta e o objetivo do projeto.

Na fase analisar *(Analyze)* são estratificados todos os dados utilizando as ferramentas estatísticas, identificando os "x" e "e" e as causas óbvias e não óbvias. Além disso, são definidos a capacidade sigma do processo e o seu nível corrente de ecoeficiência. Nesta fase são identificadas as possíveis causas através da ferramenta diagrama de causa e efeito (Ishikawa), que tem por objetivo apresentar a relação existente entre determinado resultado de um processo (um efeito) e os diversos fatores (causas) que podem influenciar nas variáveis de saída (Y e E). Além dessa ferramenta pode-se utilizar o gráfico de Pareto, com o objetivo de identificar os principais tipos de falhas com base na frequência de ocorrência de cada uma delas. Depois de identificadas as causas podem-se utilizar outras ferramentas estatísticas tais como: a) teste de hipótese, utilizado com o objetivo de decidir se uma afirmação é verdadeira ou não em relação a um parâmetro, b) análise de variância (ANOVA) utilizada para comparar se as várias médias (mais que duas) são iguais, c) FMEA *(failure mode and effect analysis),* análise do modo e do efeito de falha, utilizado para identificar todas as possíveis falhas potenciais, determinar o efeito, priorizar os modos de falha e identificar as ações que possam eliminá-la. Nesta fase o especialista em estatística denominado *Black Belt*, deve aplicar o máximo de ferramentas estatísticas com o objetivo em identificar as causas raízes, tanto do processo como dos fatores ambientais.

Na fase melhorar *(Improve),* a equipe implementa as melhorias sugeridas na fase anterior, uma vez que os dados estatísticos identificados são traduzidos em informações que possibilitam a melhoria do processo e também da ecoeficiência. Nessa fase a equipe interage com as pessoas que executam as atividades e implementam as melhorias. Aqui é criado pela equipe um plano de ação para eliminar as causas raízes com foco no processo e no meio ambiente. Nessa etapa o *Black Belt* aplica junto com a equipe e, aonde possível, conceitos de manufatura enxuta, com o objetivo de obter redução de desperdícios. Quando aplicável, deve-se adotar o DOE *(design of expirements),* delineamento de experimento, que tem por objetivo: a) determinar que fatores ("x´s" e "e´s") possuem maiores influências sobre a resposta ("Y" e "E"), b) determinar como ajustar os fatores ("x´s" e "e´s"), de modo que a resposta ("Y" e "E") tenha o valor desejado, c) determinar como ajustar os fatores ("x´s" e "e´s") de forma que a variação seja a menor possível. Deve ser aplicado pelo *Black Belt* para aumentar a capacidade do processo, reduzindo a variabilidade tanto do processo como a do meio ambiente.

Finalmente, na fase controlar *(Control)*, é estabelecido um plano para monitorar e garantir a perpetuação das melhorias implementadas. Este plano tem por objetivo manter a capacidade sigma e a ecoeficiência do processo. Nesta fase são definidos métodos de controle e é fundamental que o dono do processo *(process owner)* utilize a gestão visual para garantir os ganhos ambientais. Pode-se utilizar também nesta etapa o controle estatístico (CEP) para monitorar a capacidade do processo. A equipe deve preparar as instruções e procedimentos documentados e treinar os envolvidos. Essa ação é fundamental para o alinhamento de todos os envolvidos no procedimento. Para o monitoramento do projeto o *Black Belt* deve propor um *check list* para a auditoria e sua frequência de realização. Os resultados dos indicadores devem ser medidos e analisados. Essa atividade deve ser designada ao dono do processo *(process owner)*, pois caso os resultados tendam a uma deterioração, ele possa tomar ações para reverter o desvio e voltar ao estado no qual foi finalizado o projeto. Convém que os ganhos na melhoria da ecoeficiência sejam avaliados pela área financeira e área de meio ambiente da organização, podendo isso ser feito em conjunto.

Como se oberva, o método DMAIC integrado com métricas ambientais tem por objetivo, além de reduzir a variabilidade do processo, reduzir também a variação dos impactos ambientais. O foco principal é identificar a variável de saída do processo (Y) e a variável de saída ambiental (E). Em resumo, o passo principal do procedimento que aqui se propôs está em identificar na primeira fase *(define)* além das variáveis de saída e as variáveis de entrada do processo de produção também as variáveis de saída e de entrada ambientais. Depois de identificadas as variáveis de entrada e saída e de se mapear o processo, deve-se coletar os dados e medir o estado atual do processo, o nível de ecoeficiência, e propor os níveis futuros tanto das varáveis do processo como da ecoeficiência pós a implementação das melhorias. Na fase analisar (*analyze*) deve-se identificar as prováveis causas de variações do processo e também ambientais após o que a equipe deve implementar as melhorias no processo e ambientais. Na fase controlar (*control*) deverá ser criado um plano de controle que garanta a perenidade dos ganhos econômicos e ambientais.

Em virtude deste procedimento, combinar as melhorias nos processos com a elevação do nível de ecoeficiência como resultado a aplicação da técnica Seis Sigma, propõe-se denominá-lo de *Eco-Six Sigma*.

5. A PESQUISA-AÇÃO

Neste capítulo relata-se o desenvolvimento de uma pesquisa-ação para verificar a possibilidade de aplicação do procedimento descrito no capítulo anterior a situações do mundo real. Inicialmente realizou-se uma primeira fase, na qual, para o processo de usinagem escolhido, foi desenvolvido um projeto Seis Sigma sem considerar as variáveis ambientais. Como parte dessa fase se fez a avaliação dos resultados obtidos, incluindo-se eventuais ganhos na ecoeficiência do processo estudado. Na sequência foi realizada a complementação da fase inicial, levando em conta as variáveis ambientais consideradas como integrantes do procedimento Seis Sigma. Por fim foi realizada a comparação do nível de ecoeficiência do processo estudado antes da aplicação do projeto Seis Sigma, com o obtido, depois da sua efetivação, com e sem considerar as variáveis ambientais.

5.1. O nível de ecoeficiência antes do projeto Seis Sigma

Antes de se iniciar o estudo que verificou a validade da proposta feita por este trabalho, foi feita a determinação do nível de ecoeficiência da área estudada antes do início do projeto Seis Sigma, uma vez que esse valor serviu de base de comparação para se medir a evolução da ecoeficiência à medida que o projeto caminhasse. Na Tabela 3 pode ser visto o nível inicial de ecoeficiência do processo. Para realizar o cálculo utilizou-se o procedimento proposto no capitulo 3 por meio da aplicação das expressões de (8) até (10) para os equipamentos existentes na área de processo selecionada e também para o processo como um todo .

Tabela 3 - Ecoeficiência antes do projeto seis sigma

Ecoeficiência antes do projeto Seis Sigma						
Indicadores de Desempenho						
e1	Peças usinadas / Kw.h					
e2	Peças usinadas / centilitro de óleo solúvel					
e3	Peças usinadas / kg de cavaco gerado					
e4	Peças usinadas / aresta de inserto de usinagem					
Processo	**Indicadores de desempenho**					
Máquina	**e1**	**e2**	**e3**	**e4**	$\mathbf{E_{Mit1}}$	
Nexus 100	7,32	10,39	5,56	40,15	**81,36**	
Nexus 250	2,57	9,80	7,21	36,84	**57,05**	
Turn 6G	11,22	10,05	15,17	49,23	**195,52**	
BND 42T5	12,52	10,96	15,78	39,50	**178,49**	
Nível de ecoeficiência do processo					**128,10**	$\mathbf{E_{Pt1}}$

Na tabela acima pode-se visualizar a ecoeficiência de cada equipamento ($E_{Mit1)}$ como também a ecoeficiência total do processo de usinagem estudado (E_{Pt1}). A máquina Nexus 100 teve como resultado da medição um valor de ecoeficiência de 81,36 que calculada com as demais maquinas do processo estudado teve como resultado da ecoeficiência global do processo 128,10, antes do inicio da aplicação do Seis Sigma tradicional.

5.2. O nível de ecoeficiência com a implantação do projeto Seis Sigma sem considerar as variáveis ambientais

De acordo com o procedimento proposto no Capítulo 3, o projeto Seis Sigma foi aplicado à área de usinagem selecionada, com o objetivo central de reduzir o tempo de ciclo das peças (abordagem tradicional da técnica Seis Sigma). Neste projeto o autor desta dissertação participou como líder da equipe (*Black Belt*), e conduziu o projeto seguindo as fases do DMAIC, conforme detalhado abaixo.

Fase definir (*define*)

Nesta fase a equipe definiu o *project charter* do projeto, composto pelo caso do negócio, resumo da meta, cronograma, lista de oportunidades, escopo e equipe, como mostra o Quadro 13 (*project charter* do projeto 26/12). Para essa elaboração foi definida a equipe, que iniciou o trabalho através do mapeamento macro do processo, aplicando a ferramenta SIPOC, foram identificados os fornecedores, as entradas para processo, o processo, as saídas do processo e os clientes. Após mapeado o processo, foi identificada a variável de saída denominada com a letra "Y" e as variáveis de entrada "X1 até X5". Para a definição da meta foram estratificados os dados históricos dos últimos seis meses de produção das peças e calculada uma média dos tempos de ciclo. Após o qual foi lançado o desafio de reduzir o tempo de ciclo em 10% até julho de 2012. Como já haviam dados históricos, foi possível à equipe definir a plataforma ardente, na qual se mostra o estado atual e o estado futuro, desafiando a equipe a finalizar o projeto. As ferramentas e técnicas aplicadas nessa fase foram: *project charter*, SIPOC, estratificação dos dados e plataforma ardente.

***PROJECT CHARTER* – 26/12**	
Caso do Negócio	Com uma projeção para 2012 de um mercado cada vez mais competitivo e mais exigente em relação à qualidade e prazo de entregas. Identificamos a necessidade de ações de melhorias na gestão da linha de produção para que possamos reduzir o tempo de ciclo do produto e atender os clientes no prazo.
Resumo da Meta	Y= reduzir o tempo de ciclo em 10% até julho de 2012. X1= Preparação (setup); X2= Programação de produção; X3= Programa CNC; X4= Ferramental; X5= Plano de controle.
Cronograma do Projeto	**- Definir:** 05/03/12 – 20/03/12 **- Medir:** 21/03/12 – 07/05/12 **- Analisar:** 08/05/12 – 03/06/12 **- Melhorar:** 04/06/12 – 04/07/12 **- Controlar:** 05/07/12 – 19/07/12 **D** ½ mês | **M** 2 meses | **A** 1 mês | **M** 2 meses | **C** ½ mês
Lista de Oportunidades	• Aumento da capacidade produtiva; • Redução de atraso ao cliente; • Competitividade;
Escopo	**Áreas envolvidas:** Usinagem, máquinas CNC (nexus 100, nexus 250, turn 6G e BND 42T5) peças (A até I). **Fora do escopo:** Demais áreas, máquinas e peças.
Equipe	**Sponsor:** João **Black Belt:** José Carlos **Process Owner:** Valdir **Green Belts:** Marcos e Paulo **Yellow Belts:** Caio, Cleber e Leandro **Team Members:** Rafael, Maria e Anderson.

Quadro 13- *Project Charter* do projeto 26/12

Fase medir (*measure*)

Na fase medir a equipe elaborou o plano de medição e o validou por meio da análise do sistema de medição por meio do R&R (repetitividade e reprodutibilidade). Este plano de medição foi oriundo do mapa do processo (SIPOC) definido na etapa anterior, na qual a equipe definiu seus principais indicadores: o que medir? Como? Quem? Quando? responsável pelos dados e banco de dados, conforme o Quadro 14 (plano de medição). A equipe mediu a capacidade do processo através do controle estatístico por meio de uma carta X barras e R.

As ferramentas e técnicas aplicadas nesta fase foram: SIPOC, CEP, Análise do sistema de medição (MSA) e Plano de medição.

PLANO DE MEDIÇÃO						
Indicadores	**O que medir?**	**Como?**	**Quem?**	**Quando?**	**Responsável pelo os dados**	**Banco de dados**
SETUP	Quantidade de setup retrabalhados	Formulário de ocorrência	Preparador da máquina	21/03/12 até 07/05/12	Marcos	Lançar no excel
Programação	Quantidade de ocorrências de Blanks fora do especificado	Formulário de ocorrência	Preparador da máquina	21/03/12 até 07/05/12	Paulo	Lançar no excel
Programa CNC	Quantidade de programas alterados pela produção	Formulário de ocorrência	Preparador da máquina	21/03/12 até 07/05/12	Paulo	Lançar no excel
Ferramental	Quantidade de troca de ferramenta (inserto)	Formulário de ocorrência	Operadores	21/03/12 até 07/05/12	Marcos	Lançar no excel
	Quantidade de troca de ferramenta durante o processo (suporte)	Formulário de ocorrência	Preparador da máquina	21/03/12 até 07/05/12	Marcos	Lançar no excel
Plano de controle	Quantidade de ocorrências do executado diferente do planejado	Formulário de ocorrência	Líderes	21/03/12 até 07/05/12	Paulo	Lançar no excel
Tempo de ciclo	Tempo de ciclo das peças	Através do apontamento	Preparador / operador	21/03/12 até 07/05/12	Marcos	SAP
Atraso	Quantidade de ordem de produção atrasada	Apontamento	Operadores	21/03/12 até 07/05/12	Paulo	SAP
Não conforme	Quantidade de peças não conforme	Apontamento do não conforme	Preparador / operador	21/03/12 até 07/05/12	Paulo	SAP

Quadro 14- Plano de medição

Fase analisar (*analyze*)

Após coletados os dados na fase anterior, o *Black Belt* estratificou as informações obtidas através de gráfico de Pareto e em conjunto com a equipe aplicou o diagrama de causa e efeito, o que permitiu identificar as seguintes causas raízes: a) falta de padronização do método de preparação (setup), b) sistemática de alteração inadequada dos programas CNC pela produção, c) falta de padronização do ferramental de produção. Durante o processo de validação das causas raízes foi possível observar que: das dezesseis preparações de máquinas, todas foram feitas diferentemente uma das outras, já que cada preparador seguiu seu próprio método. Foi possível também observar que durante as preparações houve dez modificações nos parâmetros dos programas CNC pela produção, sem o envolvimento do programador da área de desenvolvimento de processos. Na última causa raiz verificou-se que não havia ferramentas definidas para cada processo, uma vez que cada preparador definia qual ferramenta utilizar no momento da preparação.

As ferramentas e técnicas aplicadas nesta fase para a análise dos dados foram: gráfico de Pareto, diagrama de causa e efeito (Ishikawa).

Fase melhorar (*improve*)

Na fase melhorar a equipe, com as causas determinadas e validadas, iniciou o processo de implantação das melhoria identificadas, buscando através da matriz de impacto implementar as ações de maior força e menor custo de implementação. Essas foram: a) foi padronizado o método de preparação das máquinas por meio da devida incorporação dessa atividade na folha de processo. Com isso, todos os preparadores foram instruídos e treinados para seguir o mesmo método para preparar e liberar cada uma das máquinas; b) foi estabelecida uma sistemática de alteração do programa CNC. Quando necessário, o preparador deve solicitar à área de desenvolvimento de processos a alteração requerida, já que se estabeleceu que somente o desenvolvimento de processos poderia realizar tais modificações. Após alterado, o programa anterior (antes da alteração) deve ser retirado do diretório de programas da máquina; e c) o ferramental também foi padronizado e especificado na folha de processos. Os preparadores foram treinados para seguir o planejado na folha, na qual as ferramentas estavam identificadas por meio de seu modelo.

As ferramentas e técnicas aplicadas nesta fase para implementar as melhorias foram: matriz de impacto, folha de processos.

Fase controlar (*control*)

A equipe durante a fase controlar padronizou as ações implementadas através de instruções e treinamentos adicionais para os envolvidos. Definiu o plano de controle conforme Quadro 15, que mostra o plano de ação que será monitorado durante um ano pelo *process owner*.

PROJETO 26/12													
PLANO DE CONTROLE													
Atividade	Responsável	2012					2013						
		ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul
Acompanhar o número de alterações de programas cnc, investigar a causa.	Process owner			☐		☐				☐			☐
Auditar pelo menos duas preparações de máquinas por mês se está sendo seguido o planejado (processo, ferramental, etc)	Process owner	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Medir o tempo de ciclo das peças e comparar o real com o planejado. Através do gráfico para cada item.	Process owner	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Quadro 15 - Plano de controle

As ferramentas e técnicas aplicadas nesta fase foram: instruções de trabalho, treinamentos e plano de controle.

Resultado da fase 1 da pesquisa-ação

Após a implementação das melhorias e concedido um prazo para a estabilização dos processos envolvidos, foram medidos os resultados do projeto durante o mês de agosto de 2012. Na Tabela 4 apresentam-se os tempos de ciclo em minutos por peça, comparando os valores obtidos antes das melhorias com aqueles medidos após e definidos pelo projeto Seis Sigma em sua concepção original. A meta definida no *project charter* do projeto era reduzir o tempo de ciclo em 10% para as peças do escopo. Observa-se que esse alvo foi superado, já que a melhoria média obtida foi de12,77%.

Tabela 4 - Tempo de ciclo em minutos por peça

Tempo de ciclo em minutos por peça				
Peças	Antes das melhorias	Depois das melhorias	% melhoria	Média de melhoria
A	0,745	0,663	11,01%	12,77%
B	0,602	0,512	14,95%	
C	1,348	1,186	11,28%	
D	0,870	0,757	12,99%	
E	0,880	0,790	10,23%	
F	1,010	0,858	15,05%	
G	0,790	0,687	13,04%	
H	0,720	0,633	12,08%	
H	0,750	0,652	13,07%	
I	1,390	1,195	14,03%	

Porém, como já se mencionou anteriormente, é de se esperar que, mesmo sem levar em consideração as variáveis ambientais, a redução do tempo de ciclo das peças usinadas em decorrência do projeto Seis Sigma acabe por promover certa melhoria do nível de ecoeficiência do processo analisado. Essa verificação é feita a seguir na Tabela 5, na qual se pode observar que o nível de ecoeficiência do processo ficou em 142,60 superando o valor anterior de 128,10. Para determinar o nível de ecoeficiência do processo utilizaram-se as expressões propostas no capitulo 3.

Tabela 5 - Ecoeficiência depois do projeto seis sigma tradicional

Ecoeficiência depois do projeto Seis Sigma tradicional						
Indicadores de Desempenho						
e1	Peças usinadas / Kw.h					
e2	Peças usinadas / centilitro de óleo solúvel					
e3	Peças usinadas / kg de cavaco gerado					
e4	Peças usinadas / aresta de inserto de usinagem					
Processo	**Indicadores de desempenho**					
Máquina	**e1**	**e2**	**e3**	**e4**	E_{Mit2}	
Nexus 100	8,23	11,68	5,56	42,74	**93,76**	
Nexus 250	2,99	11,24	7,21	37,67	**62,36**	
Turn 6G	12,81	11,49	15,17	50,85	**218,06**	
BND 42T5	14,37	12,58	15,78	39,50	**196,21**	
Nível de ecoeficiência do processo					**142,60**	E_{Pt2}

Deve-se ressaltar que mesmo sem a consideração das variáveis ambientais, a simples aplicação do procedimento Seis Sigma tradicional provocou uma elevação no nível de ecoeficiência do processo estudado da ordem de 11% evoluindo de 128,10 originalmente para 142,60 após o projeto.

5.3. Nível de ecoeficiência considerando as variáveis ambientais

A fase 2 da pesquisa-ação é um complemento da fase 1 anteriormente descrita. Neste estudo foi aplicado o procedimento proposto no capitulo 4, incorporando as variáveis ambientais com foco na melhoria do nível de ecoeficiência do processo. Foram incorporadas nas fases do DMAIC as variáveis ambientais, conforme abaixo:

Fase definir (*define*)

Nesta fase a equipe revisou o project charter levando em consideração as variáveis ambientais. Nesse processo foi necessário revisar o caso do negócio e a lista de oportunidades e propor uma meta para a ecoeficiência. Essa revisão se deu através do mapeamento do processo (SIPOC) na qual além da variável de saída “Y” e as variáveis entrada “x`s” tradicionais consideradas no projeto, foram identificadas a variável de saída ambiental “E” e as variáveis de entrada “e`s”. Esta revisão pode ser vista no Quadro 16 (*project charter* 27/12). A equipe definiu como meta um aumento de 10% na ecoeficiência do processo até agosto de 2012.

Fase medir (*measure*)

Na fase medir a equipe elaborou o plano de medição e o validou levando em consideração as variáveis ambientais identificadas no mapeamento do processo, realizado na etapa anterior. É fundamental definir os principais indicadores (o que medir, como, quem, quando, responsável pelos dados e banco de dados). No Quadro 17 é possível visualizar o plano de medição incorporado as variáveis ambientais.

***PROJECT CHARTER* – 27/12**	
Caso do Negócio	Com uma projeção para 2012 de um mercado cada vez mais competitivo e mais exigente em relação à qualidade, prazo de entregas e consciência ambiental. Identificamos a necessidade de ações de melhorias na gestão da linha de produção para que possamos reduzir o tempo de ciclo do produto, atender os clientes no prazo e proteger o meio ambiente.
Resumo da Meta	**Y= reduzir o tempo de ciclo em 10% até julho de 2012.** X1= Preparação (setup); X2= Programação de produção; X3= Programa CNC; X4= Ferramental; X5= Plano de controle. **E= aumentar o nível de ecoeficiência do processo em 10% até agosto 2012.** e1= consumo de óleo solúvel; e2= consumo de energia elétrica; e3= consumo de inserto de usinagem; e4= geração de resíduo de cavaco;
Cronograma do Projeto	**- Definir:** 05/03/12 – 20/03/12 **- Medir:** 21/03/12 – 07/05/12 **- Analisar:** 08/05/12 – 03/06/12 **- Melhorar:** 04/07/12 – 06/08/12 **- Controlar:** 07/08/12 – 19/08/12 **D** ½ mês | **M** 2 meses | **A** 1 mês | **M** 2 meses | **C** ½ mês
Lista de Oportunidades	• Aumento da capacidade produtiva; • Redução de atraso ao cliente; • Competitividade; • Redução do consumo de recursos naturais; • Redução de resíduos; • Aumento da consciência ambiental da empresa; • Aumento de imagem com os colaboradores e clientes.
Escopo	**Áreas envolvidas:** Usinagem, máquinas CNC (nexus 100, nexus 250, turn 6G e BND 42T5) peças (A até I). **Fora do escopo:** Demais áreas, máquinas e peças.
Equipe	**Sponsor:** João **Black Belt:** José Carlos **Process Owner:** Valdir **Green Belts:** Marcos e Paulo **Yellow Belts:** Caio, Cleber e Leandro **Team Members:** Rafael, Maria e Anderson.

Quadro 16 - *Project Charter* do projeto 27/12

PLANO DE MEDIÇÃO 2						
Indicadores	**O que medir?**	**Como?**	**Quem?**	**Quando?**	**Responsável pelo os dados**	**Banco de dados**
Consumo de óleo solúvel	Quantidade de óleo solúvel consumido	Formulário de ocorrência	Preparador / operador	10/05/12 até 30/05/12	Paulo	Lançar no excel
Consumo de energia elétrica	Consumo de energia elétrica	Formulário de ocorrência	João (elétrica)	10/05/12 até 30/05/12	Paulo	Lançar no excel
Consumo de inserto de usinagem	Quantidade de troca de inserto	Formulário de ocorrência	Preparador / operador	10/05/12 até 30/05/12	Marcos	Lançar no excel
Geração de resíduo de cavaco	Quantidade de cavaco	Formulário de ocorrência	Preparador / operador	10/05/12 até 30/05/12	Marcos	Lançar no excel
SETUP	Quantidade de setup retrabalhados	Formulário de ocorrência	Preparador da máquina	21/03/12 até 07/05/12	Marcos	Lançar no excel
Programação	Quantidade de ocorrências de Blanks fora do especificado	Formulário de ocorrência	Preparador da máquina	21/03/12 até 07/05/12	Paulo	Lançar no excel
Programa CNC	Quantidade de programas alterados pela produção	Formulário de ocorrência	Preparador da máquina	21/03/12 até 07/05/12	Paulo	Lançar no excel
Ferramental	Quantidade de troca de ferramenta (inserto)	Formulário de ocorrência	Operadores	21/03/12 até 07/05/12	Marcos	Lançar no excel
	Quantidade de troca de ferramenta durante o processo (suporte)	Formulário de ocorrência	Preparador da máquina	21/03/12 até 07/05/12	Marcos	Lançar no excel
Plano de controle	Quantidade de ocorrências do executado diferente do planejado	Formulário de ocorrência	Líderes	21/03/12 até 07/05/12	Paulo	Lançar no excel
Tempo de ciclo	Tempo de ciclo das peças	Através do apontamento	Preparador / operador	21/03/12 até 07/05/12	Marcos	SAP
Atraso	Quantidade de ordem de produção atrasada	Apontamento	Operadores	21/03/12 até 07/05/12	Paulo	SAP
Não conforme	Quantidade de peças não conforme	Apontamento do não conforme	Preparador / operador	21/03/12 até 07/05/12	Paulo	SAP

Quadro 17 - Plano de medição 2

Fase analisar (*analyze*)

Depois de coletados os dados na fase anterior, o *Black Belt* os estratificou por meio do gráfico de Pareto e em conjunto com a equipe aplicou o diagrama de causa e efeito (Ishikawa). Isso permitiu identificar, além das mencionadas no caso 1 as seguintes causas raízes: a) falta de gerenciamento do ferramental (inserto), b) sistemática inadequada de definição dos blancks, c) controle inadequado do óleo solúvel. Ao validar as causas raízes foi possível observar que: não havia um gerenciamento da troca dos insertos com um tempo determinado para a troca, pois ficava a critério do operador fazer a troca do inserto quando achasse necessário. Foi também observado que não há um padrão para se determinar a quantidade máxima de sobremetal existente nas peças a serem usinadas. Observou-se que na maioria havia mais de 5mm. Na última causa raiz analisada observou-se que os cavacos eram retirados da máquina mesmo antes de serem decantados e enviados ainda molhados, retendo, portanto óleo solúvel.

Fase melhorar (*improve*)

Nesta fase a equipe, iniciou a implementação das melhorias identificadas, implementando as ações de maior impacto e menor custo identificadas com o auxilio da ferramenta matriz de impacto. Essas ações foram: a) foi padronizada no programa CNC a quantidade de ciclos para troca do inserto, de maneira que a própria máquina avisará o operador para fazer a troca. Foram revisados os programas e treinados os preparadores e operadores; b) foram definidas na folha de processo as medidas dos blanks com a quantidade máxima e mínima de sobremetal, de modo que a quantidade máxima não ultrapasse 3mm, nem seja inferior a 1mm; e c) foi criada uma área de decantação do óleo solúvel dentro da usinagem, com controle de entrada e saída e tempo para a decantação, antes do envio do cavaco para a área de sucatas. Foram adequadamente treinados os envolvidos.

Fase controlar (*control*)

Na fase controlar a equipe padronizou as ações implementadas através de instruções de trabalho e treinamentos adicionais para os envolvidos. Ainda nesta fase definiu-se o plano de controle conforme Quadro 18, que mostra o plano de ação que será monitorado durante um

ano pelo *process owner*. Neste plano o process owner é responsável em cumprir as atividades determinadas no prazo estipulado durante o período de um ano.

PROJETO 27/12													
PLANO DE CONTROLE													
Atividade	Responsável	2012					2013						
		ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul
Acompanhar o número de alterações de programas cnc, investigar a causa.	Process owner			☐		☐				☐			☐
Auditar pelo menos duas preparações de máquinas por mês se está sendo seguido o planejado (processo, ferramental, etc)	Process owner	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Medir o tempo de ciclo das peças e comparar o real com o planejado. Através do gráfico para cada item.	Process owner	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Auditar pelo menos duas máquinas por mês se está sendo seguido corretamente a troca de inserto.	Process owner	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Verificar pelo menos uma vez por mês se o cavaco retirado da decantação está seco	Process owner	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Inspecionar 2 blanks diferentes por mês se está sendo seguido o planejado (quantidade maxima e minima de sobremetal)	Process owner	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Quadro 18 - Plano de controle (projeto 27/12)

Resultado da fase 2 da pesquisa-ação

Após a implementação das melhorias ambientais identificadas na fase 2 e concedido um prazo para a estabilização dos processos envolvidos, foram medidos os resultados do projeto durante o mês de setembro de 2012. Na Tabela 6 é possível visualizar o nível de ecoeficiência do processo, comparando os resultados obtidos antes das melhorias com aqueles medidos após o projeto Seis Sigma incorporado as variáveis ambientais. A meta definida para aumentar a ecoeficiência do processo em 10% foi atingida obtendo-se 20% de aumento no nível de ecoeficiência do processo (de 142,60 para 171,46).

É bastante interessante notar, por outro lado, que as melhoras identificadas para as variáveis ambientais também acabaram por gerar melhorias adicionais para a redução do tempo de ciclo das peças mostrando que melhorias de processo e melhorias ambientais parecem manter uma relação biunívoca de influência mútua. Na Tabela 7 é possível verificar esse avanço, além da redução do tempo de ciclo alcançado na fase 1 de 12,77% foi aumentado este índice em mais 3,65%, totalizando uma melhoria de 16,42% no tempo de ciclo.

Tabela 6 - Ecoeficiência depois do projeto seis sigma modificado (Eco-Six Sigma)

Ecoeficiência depois do projeto Seis Sigma modificado (Eco-Six Sigma)						
Indicadores de Desempenho						
e1	Peças usinadas / Kw.h					
e2	Peças usinadas / centilitro de óleo solúvel					
e3	Peças usinadas / kg de cavaco gerado					
e4	Peças usinadas / aresta de inserto de usinagem					
Processo	**Indicadores de desempenho**					
Máquina	**e1**	**e2**	**e3**	**e4**	$\mathbf{E_{Mit3}}$	
Nexus 100	8,78	12,56	6,54	49,07	**118,08**	
Nexus 250	3,11	11,99	8,68	42,50	**80,30**	
Turn 6G	13,05	12,08	16,96	56,46	**257,15**	
BND 42T5	14,88	14,24	17,20	43,19	**230,33**	
Nível de ecoeficiência do processo					**171,46**	$\mathbf{E_{Pt3}}$

Tabela 7 - Tempo de ciclo em minutos por peça (fase 2 do estudo)

Tempo de ciclo em minutos por peça (fase 2 do estudo)				
Peças	Antes das melhorias ambientais	Depois das melhorias ambientais	% melhoria	Média de melhoria
A	0,663	0,621	6,33%	**3,65%**
B	0,512	0,498	2,73%	
C	1,186	1,121	5,48%	
D	0,757	0,724	4,36%	
E	0,790	0,78	1,27%	
F	0,858	0,843	1,75%	
G	0,687	0,677	1,46%	
H	0,633	0,612	3,32%	
H	0,652	0,623	4,45%	
I	1,195	1,131	5,36%	
Fase 1 do estudo				12,77%
TOTAL				**16,42%**

5.4. Comparação dos níveis de ecoeficiência nas duas fases da pesquisa-ação

Depois de concluída a fase 2 da pesquisa-ação é possível comparar os resultados alcançados após a implementação dos projetos. Antes de iniciar o projeto Seis Sigma foi determinado o nível de ecoeficiência do processo que chegou a um nível de 128,10. Em

seguida iniciou-se um projeto Seis Sigma com foco apenas na redução do tempo de ciclo das peças usinadas, sem consideração das variáveis ambientais. Como se pôde verificar, mesmo sem levar em conta as variáveis ambientais houve uma contribuição na melhora do nível de ecoeficiência do processo, que passou a ser de 142,60, um crescimento de 11%. Uma análise mais detalhada desse resultado mostra que ele se deu como decorrência da diminuição do consumo de energia elétrica decorrente do menor tempo de ciclo das peças. Na segunda fase, com a aplicação do projeto Seis Sigma modificado, introduzindo as variáveis ambientais a melhora do nível de ecoeficiência foi significativa, pois passou a ser de 171,46, ou seja, um crescimento de mais 20% em relação ao projeto Seis Sigma tradicional. Na Tabela 8 é possível visualizar de maneira comparativa a evolução do nível de ecoeficiência do processo na medida em que as fases do estudo foram sendo implementadas.

Tabela 8 - Evolução do nível de ecoeficiência

Evolução do Nível de Ecoeficiência						
Processo de aplicação	Antes do projeto		Após projeto tradicional (Seis Sigma)		Após projeto Seis Sigma modificado (Eco-Six Sigma)	
Máquina	**E_{Mit}**	**Nível de ecoeficiência**	**E_{Mit}**	**Nível de ecoeficiência**	**E_{Mit}**	**Nível de ecoeficiência**
Nexus 100	40,28	**E_{Pt1}: 128,10 0% -**	42,89	**E_{Pt2}: 142,60 11% -**	49,22	**E_{Pt3}: 171,46 34% 20%**
Nexus 250	36,92		37,79		42,61	
Turn 6G	49,52		51,17		56,79	
BND 42T5	39,91		39,98		43,71	

A análise dos resultados permite assim concluir que a introdução das variáveis ambientais no procedimento Seis Sigma provoca um ganho efetivo no nível de ecoeficiência de um processo de fabricação e, por consequência, no da empresa como um todo. Responde-se, por meio deste estudo, de maneira favorável e provisória a questão de pesquisa inicialmente proposta por este trabalho. No entanto, as conclusões aqui obtidas não podem ser generalizadas, uma vez que se baseiam em um caso único. Pesquisas adicionais serão necessárias para se ampliar a convicção da possibilidade de aplicação ampla do procedimento aqui desenvolvido.

6. CONCLUSÃO

A questão principal que orientou este trabalho foi o fato de que as empresas estão cada vez mais preocupadas não só com as questões econômicas, mas também com as ambientais. Nas ultimas décadas tem sido imposta pela sociedade a necessidade de se reduzir os impactos ambientais decorrentes das atividades industriais, tornando a busca da ecoeficiência uma das prioridades competitivas das empresas ambientalmente engajadas. Em decorrência, as companhias estão continuamente buscando ferramentas que possam propiciar ganhos econômicos e também ambientais, fazendo com que a se produza mais, gastando menos e agredindo menos o meio ambiente.

Como parte do desenvolvimento aqui realizado, a metodologia da pesquisa-ação adotada neste trabalho se mostrou adequada, pois além de resolver um problema prático contribuiu com o meio acadêmico gerando conhecimento científico e indicando oportunidades de novos estudos sobre o assunto. Após a finalização da pesquisa-ação e avaliação dos resultados obtidos, atingiu-se o objetivo central proposto pelo presente trabalho, ou seja, o de integrar a técnica Seis Sigma (DMAIC) com métricas ambientais para a busca de melhorias na ecoeficiência de um processo industrial e, como consequência, da empresa como um todo. O estudo em questão, de fato, buscou verificar se a aplicação do procedimento proposto no capitulo 4 contribui para a melhoria da ecoeficiência de um processo de manufatura, e ainda se é possível utilizar uma grandeza que meça a ecoeficiência do processo por meio de uma grandeza única já que a medição do nível de ecoeficiência tradicional depende de múltiplos indicadores de eficiência ambiental, que são analisados individualmente ao longo do tempo. A aplicação desse conceito na pesquisa-ação desenvolvida indica que a proposta da grandeza adotada no capitulo 3, se mostrou eficiente para a medição dos resultados deste trabalho.

Na implementação do procedimento proposto no capítulo 4, também foi possível observar que a integração das variáveis ambientais à técnica Seis Sigma não afetou o tempo de aplicação do projeto, uma vez que este ficou por volta de seis meses, que é o tempo médio de projetos desse tipo aplicados em processos produtivos.

Como se pôde verificar no presente trabalho, a técnica Seis Sigma tradicional por si só, traz uma pequena contribuição para a melhoria da ecoeficiência de um processo industrial. No entanto, integrando as variáveis ambientais com o DMAIC pôde-se gerar uma ferramenta efetiva para buscar melhorias tanto no processo de manufatura, como também no nível da ecoeficiência global do processo.

Dessa forma, este trabalho traz algumas contribuições ao campo do conhecimento e à prática gerencial da Engenharia de Produção. Como ganhos conceituais, pode-se destacar a integração das métricas ambientais ao DMAIC como forma de possibilitar ganhos ambientais representativos à medida que também se procura implementar, de forma paralela, ganhos operacionais nos processos de produção. Do ponto de vista prático esta dissertação faz duas contribuições: primeiro fornece aos gestores da área industrial uma forma de medir o nível de ecoeficiência de seus processos industriais por meio de uma grandeza única, que congrega os indicadores de desempenho ambientais considerados mais relevantes para cada processo em particular. Em segundo plano, mas não menos relevante, este trabalho traz para a prática da Engenharia de Produção a possibilidade de unificar ganhos nas variáveis de processo e nas variáveis ambientais decorrentes da utilização do procedimento Seis Sigma (DMAIC) nas quais ambas estejam adequadamente contempladas.

Como limitação principal deste trabalho, cita-se a impossibilidade de se generalizar os resultados alcançados através da aplicação do procedimento proposto a apenas um processo de manufatura. Recomendam-se trabalhos futuros nos quais seja possível aplicar o procedimento aqui sugerido para avaliar os resultados alcançados em outras situações mais complexas e também em processos distintos da usinagem.

Finalmente, outra constatação interessante refere-se a uma aparente relação biunívoca entre as melhorias de processo e as melhorias ambientais. De fato, observou-se que, mesmo sem levar em conta aspectos ambientais, os ajustes no processo de fabricação induziram aumento no nível de ecoeficiência. A relação inversa também pôde ser notada. Embora tal correlação pareça lógica, sugere-se uma investigação empírica futura, mais aprofundada, para que se possa entender a possível ligação entre esses dois tipos de fenômenos.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14001: Sistema de Gestão Ambiental – *Requisitos com orientação para uso* – diretrizes. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14031: Gestão Ambiental – *Avaliação de Desempenho Ambiental* – diretrizes. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão Ambiental – *Avaliação do ciclo de vida* – Princípios e estruturas. Rio de Janeiro, 2009a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: Gestão Ambiental – *Avaliação do ciclo de vida* – Requisitos e Orientação. Rio de Janeiro, 2009b.

ANTONY, J.; KUMAR, M.; MADU, C. N. Six Sigma in Small and Medium Sized UK Manufacturing Enterprises: Some empirical observations. **International Journal of Quality & Reability Management,** vol. 22, n. 8, p. 860-874, 2005.

BANUELAS, R.; ANTONY, J. Six Sigma or design for Six Sigma. **Total Quality Management,** vol. 16, n. 4, p. 250-63, 2004.

BASF. The Chemical Company. **A Fundação Espaço ECO. Brasil:** Basf, 2006. Disponível em: http://www.basf.com.br/default.asp?id=3203. Acesso em: 19 março de 2006.

BASTOS, A. L. A.; POSSAMAI, O. **Modelo de Apoio à Decisão para Fabricação Baseado na Avaliação da Performance Ambiental de Produtos e dos Objetivos Estratégicos da Organização**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. *Anais*... Paraná: CURITIBA, 2002.

CALIA, R. C.; GUERRINI, F. M.; CASTRO, M. The impact of Six Sigma in the performance of a pollution prevention program. **Journal of Cleaner Production,** vol. 17, n. 1, p. 1303-1310, 2009.

CAMPOS, L. M. S.; MELO, D. A. Indicadores de desempenho dos Sistemas de Gestão Ambiental (SGA): uma pesquisa teórica. **Produção,** vol. 18, n. 3, p. 540-555, 2008.

CARVALHO, P. S. G. **Estudo Aplicado de ACV a Sistemas de Refrigeração por Absorção e por Compressão de Vapor de Amônia.** 2010. 351f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

CHAKRABARTY, A.; TAN, K.C. The current state of Six Sigma application in services. **Managing Service Quality,** vol. 17, n. 2, p. 194-208, 2007.

CHAN, E. S. W.; WONG, S. C. K. Motivations for ISO 14001 in the hotel industry. **Tourism Management,** vol. 27, n. 3, p. 481-492, 2006.

CHASE, R. B.; JACOBS, F. R.; AQUILANO, N. J. **Administração da produção para a vantagem competitiva.** 10ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2006.

CHEHEBE, J. R. B.; **Análise do Ciclo de Vida de Produtos:** Ferramenta Gerencial da ISO 14000. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

COUGHLAN, P.; COGHLAN, D. Action Research: Action Research for Operations management. **International Journal of Operation & Production Management,** vol. 22, n. 2, p. 220-240, 2002.

COLTRO, L.; MOURAD, A. L.; GARCIA, E. E. C.; QUEIROZ, G. C.; GATTI, J. B.; JAIME, S. B. M. **Avaliação de Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão**. Campinas: CETEA/ITAL, 2007.

ECKES, George. **A Revolução Seis Sigma:** O Método que Levou a GE e Outras Empresas a Transformar Processos em Lucro. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2001.

FRYXELL, G. E.; SZETO, A. The influence of motivations for seeking ISO 14001 certification: an empirical study of ISO 14001 certified facilities in Hong Kong. **Journal of Environmental Management,** vol. 65, n. 3, p. 223-238, 2002.

FUKUROZAKI, S. H. **Avaliação do Ciclo de Vida de Potenciais Rotas de Produção de Hidrogênio:** Estudos dos sistemas de gaseificação da biomassa e de energia solar fotovoltaica**.** 2011. 180f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) – Programa de Pós Graduação em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Autarquia Associada à Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

GALVANI, L. R. **Análise Comparativa da Aplicação do Programa Seis Sigma em Processos de Manufatura e Serviços.** 2010. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

GEORGE, M. L.; **Lean Seis Sigma para Serviços.** 1ª edição. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2004.

GOH, T. N.; XIE, M. Improving on the Six Sigma paradigm. **Total Quality Management,** vol. 16, n. 4, p. 235-40, 2004.

HARRY, M.; SCHROEDER, R. **Six sigma:** the breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations**.** New York: Doubleday, 2000.

HILTON, R. J.; SOHAL, A. A Conceptual Model for the Successful Deployment of Lean Six Sigma. **International Journal of Quality & Reliability Management,** vol. 29, n. 1, p. 54-70, 2012.

HUNT, R.; FRANKLIN, E. LCA – How it came about. Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA. **International Journal of Life Cycle Assessment,** vol. 1, n. 1, p. 4-7, 1996.

INGWERSEN, W. W.; CURRAN, M. A.; GONZALEZ, M. A.; HAWKINS, T. R. Using Screening Level Environmental Life Cycle Assessment to aid Decision Marking: a case study of a college annual report. **International Journal of Sustainability in Higher Education,** vol. 13, n. 1, p. 6-18, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14040: Environmental Management – *Life Cycle Assessment* – Principles and Framework. Geneve, 1997.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. Applied multivariate statistical analysis. 6th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2007.

KAPLAN, R. S.; NORTON, D. P. **Organização Orientada para Estratégia.** Rio de Janeiro: Campus, 1997.

KUMAR, M.; ANTONY, J.; CHO, B. R. Project Selection and its Impact on the Successful Deployment of Six Sigma. **Business Process Management Journal,** vol. 15, n. 5, p. 669-686, 2009.

LEE, K. L.; WEI, C. C. Reducing Mold Changing Time by Implementing Lean Six Sigma. **Quality and Reability Engineering International,** vol. 26, n. 4, p. 387-395, 2010.

LUZ, S. O. C.; SELLITTO, M. A.; GOMES, L. P. Medição de desempenho ambiental baseada em método multicriterial de apoio à decisão: Estudo de caso na indústria automotiva. **Gestão & Produção,** vol. 13, n. 3, p. 557-570, 2006.

MAIMON, D. **Passaporte Verde:** Gestão Ambiental e Competitividade. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1996.

MARÇOLA, J. A.; CAMPANINI, L.; DIAS, D.; GONÇALVES, C. L.; POLITANO, P. R. **Utilização do Método Seis Sigma para Melhoria do Processo de Atendimento de uma Empresa de Serviços:** Estudo de caso em uma empresa do setor alimentício. In: XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. *Anais*... São Paulo: SÃO CARLOS, 2010.

MARKARIAN, J. What is Six Sigma? **Reinforced Plastics,** July-August 2004, p. 46-9.

MAY, P.H.; LUSTOSA, M.C.; VINHA, V. (Orgs.). **Economia do meio ambiente**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.

MCADAM, R.; EVANS, A. Challenges to Six Sigma in a high technology mass manufacturing environments. **Total Quality Management,** vol. 15 n. 5, p. 699-706, 2004.

MELNYK, S. A.; SROUFE, R. P.; CALANTONE, R. Assessing the impact of environmental management systems on corporate and environmental performance. **Journal of Operations Management,** vol. 21, n. 3, p. 329-351, 2002.

MELLO, C. H. P.; TURRIONI, J. B.; XAVIER, A. F.; CAMPOS, D. F. Pesquisa-ação na engenharia da produção: proposta de estruturação para sua condução. **Produção,** vol. 22, n. 1, p. 1-13, 2012.

MIGUEL, P. A. C. Aspectos relevantes no uso da pesquisa-ação na engenharia de produção. ***Exacta,*** vol. 9, n. 1, p. 59-70, 2011.

MITCHELL, G. Problems and fundamentals of sustainable development indicators. **Sustainable Development,** vol. 4, n. 1, p. 1-11, 1996.

NAIR, A.; MALHOTRA, M. K.; AHIRE, S. L. Toward a theory of managing context in Six Sigma process-improvement projects: An action research investigation. **Journal of Operations Management,** vol. 29, p. 529–548, 2011.

OLIVEIRA, O. J. et al. Benefícios e dificuldades da gestão nas empresas industriais de São Paulo. **Produção,** vol. 20, n. 3, p. 429-438, 2010.

PANDE, P. S.; NEUMAN, R. P.; CAVANAGH, R. R. **Estratégia Seis Sigma.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

PARAST, M. M. The effect of Six Sigma projects on innovation and firm performance. **International Journal of Project Management,** vol. 29, p. 45-55, 2011.

PEROTTO, E.; CANZIANI, R.; MARCHESI, R.; BUTELLI, P. Environmental performance, indicators and measurement uncertainty in EMS context: a case study. **Journal of Cleaner Production,** vol. 16, n. 4, p. 517-530, 2008.

PFEIFER, T.; REISSIGER, W.; CANALES, C. Integranting Six Sigma with Quality Manangement Systems, **Total Quality Management,** vol. 16, p. 241-249, 2004.

PHENG, L.S.; HUI, M.S. Implementing and applying Six Sigma in construction. **Journal of Construction Engineering and Management,** vol. 130, n. 4, p. 482-9, 2004.

PYZDEK, T.: **The Six Sigma Handbook:** A complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels. New York: McGraw-Hill, 2003.

SANTOS, J. C. S.; VIEIRA JUNIOR, M.; LUCATO, W. C. **Aplicação de Projeto Seis Sigma em Processos não Técnicos:** Aplicação na área de vendas de uma empresa do setor metal mecânico. In: XVIII SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. *Anais*... São Paulo: Bauru, 2011.

SILVA, S. P.; SILVEIRA, Z. C; GALLICCHIO, L. H. **Metodologia Seis Sigma Aplicada à Redução do Refugo no Processo de Conformação a Frio, para Sistemas de Direção Automotiva**. In: XXXI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. *Anais*... Minas Gerais: BELO HORIZONTE, 2011.

REASON, P.; BRADBURY, H. **Handbook of action research participative inquiry and practice.** Thousand Oaks: Sage, 2001.

RIBEIRO, V. P. L.; AIBAR-GUZMAN, C. Determinants of Environmental Accounting Practices in Local Entities: evidence from Portugal, **social responsibility journal,** v. 6, n. 3, p. 404-419, 2010.

ROTONDARO, R. G.; RAMOS, A. W.; RIBEIRO, C. O.; MIYAKE, D. I.; NAKANO, D.; LAURINDO, F. J. B.; HO, L. L.; CARVALHO, M. M.; BRAZ, M. A.; BALESTRASSI, P. P. Seis Sigma. **Estratégia Gerencial para Melhoria de Processos, Produtos e Serviços.** 1ª edição. São Paulo: Atlas, 2010.

SALING, P. et al. Eco-efficiency analysis by Basf: the method. **International Journal of Life Cycle Assessment, ABI/INFORM Global,** v. 7, n. 4, p. 203-18, 2002.

SAMBASIVAN, M.; FEI, N. Y. Evaluation of critical success factors of implementation of ISO 14001 using analytic hierarchy process (AHP): a case study from Malaysia. **Journal of Cleaner Production,** vol. 16, n. 13, p. 1424-1433, 2008.

SANTOS, A. B.; MARTINS, M. F. Contribuições do Seis Sigma: estudos de casos em multinacionais. **Produção,** v. 20, n. 1, p. 42-53, 2010.

SCHWAB, D. P.: **Research methods for organizational studies**. London: Routledge, 2005.

SETTHASAKKO, W. Barriers to the development of environmental management accounting An exploratory study of pulp and paper companies in Thailand. **EuroMed Journal of Business**, v. 5, n. 3, p. 315-331, 2010.
315-331.

SLACK, N. **Administração da Produção.** São Paulo: Atlas, 1999

TACHIZAWA, T. **Gestão Ambiental e Responsabilidade Social Corporativa:** Estratégias de negócios focadas na realidade brasileira. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2005.

THAWANI, S. Six Sigma – strategy for organizational excellence. **Total Quality Management,** vol. 15, n. 5, p. 655-64, 2004.

THIOLLENT, M. **Metodologia da pesquisa-ação.** São Paulo: Cortez, 2007.

VALLE, C. E. **Qualidade ambiental:** ISO 14000. 4ª ed. São Paulo: SENAC, 2002.

VELLANI, C. L.; RIBEIRO, M. S. Sistema contábil para gestão da ecoeficiência empresarial. **Revista Contabilidade & Finanças, USP, São Paulo,** v. 20, n. 49, p. 25-43, janeiro/abril 2009.

WBCSD, The World Business Council for Sustainable Development. Eco-efficiency Leadership for Improved Economic and Environmental Performance. Geneva: WBCSD, 1996.

WBCSD, The World Business Council for Sustainable Development. A guide to reporting company performance. Geneva: WBCSD, 2000a.

WBCSD – World Business Council for Sustainable Development., Ecoefficiency – creating more value with less impact. Geneva: WBCSD, 2000b.

WERKEMA, M. C. C. **Lean Seis Sigma:** Introdução às Ferramentas do Lean Manufacturing**.** Belo Horizonte: Werkema, 2010.

ZUBER-SKERRIT, O.; PERRY, C. Action research within Organizations and University Thesis Writing. **The Learning Organization,** vol. 9, n. 4, p. 171-179, 2002.

ZUBER-SKERRIT, O.; FLETCHER, M. The quality of an action research thesis on the social sciences. **Quality Assurance in Education,** vol. 5, n. 4, p. 413-436, 2007.