



“TEN YEARS WORKING TOGETHER FOR A SUSTAINABLE FUTURE”

Ecoeficiência numa indústria metal mecânica da região de Campinas/SP: redução do tempo de setup e Pegada de Carbono

LEME, R. D. J. ^a, LOPES SILVA, D. A. ^a

a. Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Sorocaba/SP

**Corresponding author, robertoleme_jr@hotmail.com*

Resumo

Desperdícios de tempo e de recursos, como materiais, infraestrutura, capital, e mão de obra, por exemplo, reduzem a produtividade e a competitividade das indústrias. Assim, visando aumentar a eficiência no emprego de recursos durante a manufatura de produtos, soluções enxutas integradas ao conceito de manufatura sustentável podem ser adotadas para minimizar tais desperdícios, gerando um diferencial competitivo não só nos objetivos financeiros, mas também contribuindo na redução de impactos ambientais, proporcionando vantagens operacionais, com aumento na produtividade e criação de valor. Neste contexto, objetivando a redução de tempos improdutivo, pode-se focar na minimização do tempo de *setup* de máquinas e equipamentos. Considerando uma empresa que fabrica moldes de alta precisão da região de Campinas/SP, surge a pergunta: como identificar oportunidades de melhoria nos tempos de *setup* de seus centros de usinagem? Há diversas abordagens que poderiam ser aplicadas para responder a esta questão, porém, este trabalho focou na integração da manufatura sustentável com o *lean manufacturing*, e para isso, foi realizado um estudo de ecoeficiência através da aplicação da ferramenta SMED combinada com a Pegada de Carbono nos centros de usinagem da empresa estudada. Os resultados do estudo de caso mostraram que foi possível reduzir longos tempos de *setup* em até 88,4%, enquanto que a pegada de carbono das máquinas foi reduzida em até 81,3%. Melhorias simples foram realizadas no centro de usinagem, a partir de padronização e do estudo de tempos e métodos para as atividades de *setup*. Finalmente, a abordagem integrada combinando SMED com Pegada de Carbono pode também ser adotada em outras empresas visando a ecoeficiência na manufatura.

Palavras-chave: Ecoeficiência. Pegada de Carbono. Troca Rápida de Ferramentas. SMED. Lean Manufacturing.

1. Introdução

No contexto atual das empresas de manufatura do setor metal mecânico, há uma busca incessante por técnicas e ferramentas que possibilitem a melhoria na qualidade dos produtos e processos, já que a competitividade, segundo Parry et al. (2010), se mostra cada vez mais acirrada. As demandas dos clientes atualmente não se restringem apenas a fatores tradicionais de competitividade, como qualidade e no rápido tempo de entrega dos produtos, mas sim, também inclui fatores baseados cada vez mais na sustentabilidade (DORNFELD et al., 2013). Nesse contexto, Dornfeld et al. (2013) exaltam a Manufatura Sustentável, pois ela permite que as empresas coloquem em suas atividades aspectos de sustentabilidade, flexibilizando a manufatura para atender a novas exigências dos clientes.

“TEN YEARS WORKING TOGETHER FOR A SUSTAINABLE FUTURE”

São Paulo – Brazil – May 24th to 26th - 2017

Para a empresa objeto deste estudo, a qual confecciona moldes de metal em alta precisão, e que tem como clientes grandes montadoras do setor automotivo nacional e internacional, três objetivos de desempenho são primordiais: flexibilidade, qualidade e a sustentabilidade. A empresa realiza projetos específicos, caracterizando-se por ser um sistema de produção *make-to-order* (MTO). Com isso, para a ampliação de seu *marketshare*, é fundamental que a empresa opere segundo os conceitos de produção enxuta (*lean manufacturing*) e de manufatura sustentável.

O tempo de preparação de máquinas e trocas de ferramentas, ou simplesmente *setup*, reduz a produtividade e a competitividade das empresas, além de aumentar os custos industriais de fabricação (OHNO, 1997). Além disso, tendo em vista as exigências atuais por meio de leis governamentais e o aumento do interesse da sociedade por produtos de ordem sustentável, é preciso considerar o fator ambiental como diferencial competitivo (ALLWOOD e CULLEN, 2009). Por exemplo, cada vez mais as empresas de manufatura tem se preocupado com a sua Pegada de Carbono, ou seja, a mensuração da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEEs) nos processos industriais, assim como ser capaz de criar alternativas para reduzir suas emissões (ALLWOOD e CULLEN, 2009; JESWIET e KARA, 2008).

Com isso, este estudo integra o uso de da filosofia *lean manufacturing* por meio da ferramenta SMED (*Single Minute Exchange of Die*) (Ohno, 1997) para o estudo do tempo de *setup* numa empresa metal mecânica de Campinas/SP, e realiza também o cálculo da Pegada de Carbono da empresa em seus processos de usinagem, propiciando, à mesma, possíveis melhorias quanto à redução de custos, o aumento de produtividade, e a melhoria da sua ecoeficiência rumo à produção sustentável.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Indústria Metal Mecânica

A empresa foco da pesquisa é uma ferramentaria que integra o setor metal mecânico que no Brasil representa cerca de 78,3 mil estabelecimentos, o que equivale a 25% do total da indústria de transformação nacional, além de empregar 2,27 milhões de trabalhadores formais e ser predominantemente composto por estabelecimentos de micro e pequeno porte, responsáveis por 95,5% do total no país, segundo levantamento da Federação das Indústrias do Rio Grande do Sul (FIRGS). Tem como segmento a produção de moldes de alta precisão para suprir necessidades de outras empresas à jusante na cadeia para a confecção de peças e componentes diversos, com ênfase na cadeia automotiva. Para Santos (1997) as ferramentarias são empresas, na maioria das vezes, de pequeno porte que produzem moldes de injeção, de extrusão e outras ferramentas e dispositivos usados por empresas maiores, de diferentes setores, como eletrodomésticos, automotivo e bens de consumo em geral. Sua produção é sob encomenda, pois cada molde é projetado e confeccionado de acordo com a peça que será formada no processo de injeção, sendo de material metálico ou polimérico. Com isso, pode ser classificada, dentro do setor automotivo, segundo o SEBRAE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas) na categoria das empresas de segundo nível, as quais fornecem peças para as empresas de primeiro nível (grandes montadoras), atuando no mercado de reposição. Santos (2007) ainda menciona que essas empresas estão sujeitas ao poderio de barganha de seus clientes, grandes organizações na maioria das vezes, precisando se adequar as exigências mínimas destes, que tem como medidas obrigatórias na compra de um molde sua qualidade, prazo de entrega e o custo final do produto.

2.2. Produção Enxuta

O conceito de produção enxuta ou *lean manufacturing* surgiu no Japão, mais especificamente na indústria automotiva Toyota no período pós-guerra, e por isso também é conhecido como Sistema Toyota de Produção, o qual começou a se difundir nas organizações ocidentais no início da década de 1990 (WOMACK et al., 1992). Atualmente o *lean* é uma filosofia bem difundida globalmente e adotada por empresas dos mais variados setores, mesmo as de pequeno e médio porte, e também pelo setor de serviços (*lean service*) (PARRY, 2010).

Um dos principais objetivos da manufatura enxuta é reduzir o desperdício de esforço humano, eliminar as perdas e as atividades que não agregam valor ao produto, produzindo produtos de qualidade da forma mais eficiente e econômica (SINGH et al., 2010). Parry et al. (2010) mostra que a produção

enxuta utiliza um conjunto de práticas de gestão da produção que integrados de maneira correta guiam qualquer empresa para a melhoria contínua, com foco no atendimento das demandas dos clientes e na redução de desperdícios na produção.

Para Ohno (1997) o desperdício é caracterizado por todo tipo de elemento e ação que não agrega valor e só aumenta os custos de produção. Estes fatores, muitas vezes, podem ser facilmente percebidos ou, em outras, extremamente complicados de se enxergar. No conceito de *Lean Manufacturing*, Ohno (1997) destaca as sete formas que o desperdício pode aparecer dentro de uma empresa: Superprodução, Inventário, Transporte, Movimentação, Defeito, Processamento inapropriado e Espera.

2.3. Troca Rápida de Ferramentas

O tempo de *setup*, ou de preparação, se caracteriza pelo intervalo de tempo levado desde o término da produção de uma peça do lote anterior até o início da produção de uma primeira peça do próximo lote (OHNO, 1997). Este tempo é necessário para que ocorra a adequada preparação de máquinas e equipamentos, e este é um tempo improdutivo (ou desperdício), pois não agrega valor ao produto final, e portanto, é importante minimizá-lo, segundo Santos et al. (2014). Para a minimização do *setup* o *lean* apresenta a ferramenta SMED, que se refere à busca pela redução do tempo de *setup*, o que contribui para minimização de desperdício com inventário, e ainda minimiza desperdícios com transporte, movimentação e espera, uma vez que a sua adoção contribui para o ganho de tempo, tanto do operador quanto da máquina (SANTOS, WYSK e TORRES, 2014).

O SMED se refere à troca rápida de ferramentas, desenvolvida por Shingeo Shingo no Japão na década de 1950. A ideia original era reduzir os tempos de setup para termos menores de dois dígitos, e para isso Shingo (1996) propôs um passo-a-passo composto por quatro estágios de análises, onde cada atividade de *setup* deve ser analisada individualmente, conforme maiores detalhes na seção 3.

Os benefícios econômicos derivados da implementação do SMED podem variar em função do objetivo de cada empresa. Por exemplo, uma máquina pode estar saturada/sobrecarregada, e se o objetivo nesse caso for liberar a máquina de seu tempo de carga para aumentar sua disponibilidade, o benefício do emprego do SMED ocorre devido ao aumento da margem econômica para a empresa, abrindo mais tempo de produção para mais vendas. Já se a máquina não estiver saturada, uma diminuição no seu tempo de setup permitirá realocar os operadores dessa máquina para outras seções/setores em que poderão exercer alguma outra atividade de valor agregado ao produto, e o benefício econômico neste caso, se deve ao custo economizado com a força de trabalho (SANTOS, WYSK e TORRES, 2014).

2.4. Pegada de Carbono

Todo processo produtivo consome quantidades substanciais de energia e outros recursos, e como resultado causam algum impacto ao meio-ambiente, o qual pode ser mensurável por meio de indicadores ambientais específicos. Tais indicadores servem para embasar os gestores de produção sobre a tomada de decisões que visem a Manufatura Sustentável. Afinal, uma empresa sustentável pode utilizar-se disso como fator diferencial de competição, especialmente em mercados globais e/ou em nichos que demandem por produtos sustentáveis (DORNFELD et al., 2013). A avaliação da Pegada de Carbono segundo Wiedmann (2008) permite a empresa inferir sobre a eficiência energética associada a sua atividade fabril, sendo que o termo, Pegada de Carbono, está associado à mensuração da quantidade de emissões totais de GEEs expressas em carbono equivalente (CO₂-eq.) que são geradas de forma direta ou indireta por determinada atividade ou produto durante o seu ciclo de vida. (WIEDMANN, 2008; CARBON TRUST, 2007). A Pegada de Carbono é uma das principais técnicas atualmente adotadas no estudo sobre Manufatura Sustentável (SILVA et al. 2016).

Uma das técnicas empregadas para a Pegada de Carbono é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Porém, a ACV é normalmente utilizada para aplicações mais amplas, e.g., que envolvam outras categorias de impacto ambiental além das Mudanças Climáticas devido às emissões de GEEs. Já para o cálculo da Pegada de Carbono, é possível utilizar abordagens mais simples e diretas (THE CARBON TRUST, 2012).

No Brasil, a ABNT junto com a The Carbon Trust sediada em Londres, desenvolveram o sistema “ABNT de Medição e Certificação da Pegada de Carbono de Produtos”, que se baseia em normas internacionais

reconhecidas e foi projetado juntamente com indústrias brasileiras de vários setores; principais interessadas, uma vez que a matriz energética brasileira tem uma participação importante de energia renovável como fonte primária (Carbon Footprint, 2013). Outra proposta mais voltada para ambientes de manufatura é a de Jeswiet e Kara (2008), onde os autores propuseram um cálculo da Pegada de Carbono a partir de dados sobre o consumo de eletricidade.

3. Metodologia

3.1. Procedimentos

Este estudo tem como procedimento de pesquisa o estudo de caso. Yin (2005) acrescenta que, em geral, os estudos de caso representam a estratégia preferida quando se colocam questões do tipo “como” e “por que”, e quando o pesquisador tem pouco controle sobre os eventos e o foco se encontra em fenômenos contemporâneos inseridos em algum contexto da vida real.

Assim, o desenvolvimento deste artigo se deu em três fases, tendo como primeiro momento a Revisão Bibliográfica com ênfase na busca sobre metodologias de Troca Rápida de Ferramentas, como o SMED, além de pesquisa sobre Pegada de Carbono em processos de manufatura. Em uma segunda etapa foi feita a coleta de dados na empresa estudada, por meio de observações e tomadas de tempos das atividades de setup no seu centro de usinagem. Para isso, foram realizadas filmagens das atividades de setup para posterior análise dos vídeos de acordo com o SMED. Por fim, na última etapa do estudo foram propostas novas formas de se realizar as mesmas atividades de setup, reduzindo o tempo ocioso e calculando o ganho de ecoeficiência por meio do cálculo da Pegada de Carbono.

3.2. SMED

O SMED foi a ferramenta utilizada para a análise dos dados coletados referentes às atividades de *setup*. As atividades de *setup* são classificadas em *setup* interno, na qual o conjunto de atividades de *setup* só podem ser realizados com a máquina/produção parada, e o *setup* externo, onde é permitida a realização desse conjunto de atividades com a máquina operando (OHNO, 1997; SHINGO, 1996).

Para a aplicação do SMED, Shingo (1996) sugeriu quatro estágios de aplicação. No estágio preliminar, não há distinção entre setup interno e externo. Então, deve-se obter o tempo inicial de cada atividade de *setup* através de cronometragens e filmagens. No estágio 1, ocorre a organização das atividades, separando e classificando-as em *setup* interno e externo. No estágio 2 é feita a conversão do *setup* interno em externo. É necessária uma nova investigação para verificar se alguma operação está equivocadamente alocada e, então, empreender esforços para converter essa atividade ociosa para ser realizada quando a máquina ou produção estiver em funcionamento. Por fim, no estágio 3, a redução desejada do tempo de *setup* pode não ter sido alcançada ainda, então, nesse estágio foca-se na padronização de atividades para um melhor aperfeiçoamento tanto do *setup* interno quanto externo.

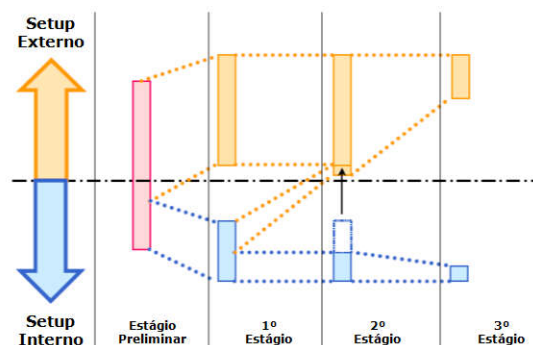


Fig. 1. Fases da Metodologia SMED e seus impactos durante a aplicação. Fonte: Santos, Whisky e Torres (2014).

3.3. Cálculos de Pegada de Carbono

Para o cálculo de Pegada de Carbono das atividades de SMED, esse estudo se baseou na metodologia proposta por Jeswiet e Kara (2008), que propõe o cálculo voltado para sistemas que consomem

eletricidade na manufatura. Para isso, a matriz energética considerada foi baseada nas informações da Secretária de Energia e Mineração do Governo do Estado de São Paulo, estado no qual a empresa objeto de estudo está situada. O seguinte mix elétrico foi considerado: hidrelétricas representam 65% da produção paulista, as termoeletricas de biomassa 25%, e as termoeletricas fósseis 10% - dos quais serão divididos em 85,6% para as que usam óleo diesel, 9,6% gás natural e 4,8% carvão mineral, enquanto as fontes de energia fotovoltaica e eólica ainda não têm representatividade na matriz estadual, portanto, não entraram no mix elétrico estudado (TOLMASQUIM, 2016).

Jeswiet e Kara (2008) denominam como CES a assinatura de emissão de carbono, a qual mensura a quantidade de carbono gerado proveniente da fração de combustível utilizado no suprimento de energia, utilizando a unidade de medida kg CO₂/GJ. As emissões devido ao consumo, denominado CE, pode ser encontrado pela multiplicação da energia consumida, EC, pela assinatura de emissão de carbono, CES, como pode ser visto na equação 1:

$$CE \text{ (kgCO}_2\text{)} = EC \text{ (GJ)} \times CES \left(\frac{\text{kgCO}_2}{\text{GJ}} \right) \quad (1)$$

Para se chegar ao valor de CES, é preciso conhecer as porcentagens de energia primária (x%) que compõem o mix elétrico que abastece as máquinas e equipamentos industriais em estudo. Neste estudo de caso, foram consideradas fontes provenientes de hidrelétricas (H), biomassa (B), óleo diesel (D), gás natural (G) e carvão mineral (C). Além disso, é preciso conhecer os quilogramas de carbono emitidos por giga joule de calor liberado (ΔCO_2) para cada fonte. O rendimento (η) também é usado na fórmula de cálculo de CES, tendo sido convencionado os valores adotados por Jeswiet e Kara (2008), sendo $\eta = 0,34$. Portanto, o cálculo de CES pode ser observada equação 2:

$$CES = \eta \times [(\Delta\text{CO}_{2H} \times x\%H) + (\Delta\text{CO}_{2B} \times x\%B) + (\Delta\text{CO}_{2D} \times x\%D) + (\Delta\text{CO}_{2G} \times x\%G) + (\Delta\text{CO}_{2C} \times x\%C)] \quad (2)$$

Para a obtenção dos dados de ΔCO_2 para biomassa, óleo diesel, carvão mineral e gás natural, foram utilizados valores encontrados no relatório "Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006)" do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006). Já para o caso da energia hidrelétrica, foi adotado o valor do estudo "Emissions from tropical hydropower and the IPCC" de Fearnside (2015). Essas informações seguem Tabela 1.

Tabela 1: Quilogramas de carbono emitidos por 1 giga joule de calor liberado.

Fontes de Energia	(Kg/JG)
Biomassa	27,3
Óleo Diesel	20,2
Gás Natural	15,3
Carvão	25,8
Hidrelétrica	1,35

Fonte: Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – IPCC (2006) e Fearnside (2015).

4. Resultados

4.1. Análise do Setup

A coleta de dados se deu em cinco cenários de *setup*, dos quais, três deles para um mesmo tipo de peça (peças em formato retangular e com as mesmas dimensões) e em três máquinas similares, portanto, feitas por três operadores diferentes para que as diferenças de trabalho de cada operador também pudessem ser avaliadas. Os outros dois cenários ocorreram em peças de formatos diferentes (uma peça cilíndrica e outra de pequenas dimensões) para que a variabilidade de trabalhar com peças distintas também fosse analisada. As máquinas utilizadas no centro de usinagem da empresa foram Centros de Usinagem ROMI Modelo FV-1300 Feeler e ROMI Modelo Discovery 1250.

A partir do SMED, no primeiro estágio foram detalhadas as atividades de setup conforme o operador as realizava, sem nenhuma intervenção em seus procedimentos e, com isso, foram separadas em

atividades de *setup* interno e *setup* externo. Na Tabela 2, é mostrado de forma detalhada o estudo realizado para um dos cenários de *setup*, e no Gráfico 1 é apresentada a redução total do tempo de *setup* para todos os cinco cenários analisados.

Tabela 2: Aplicação Etapa 1 – SMED. Separação das atividades em Setup Interno e Externo.

Peça:	Peça em formato retangular	Legenda Setup
Máquina:	ROMI Modelo FV-1300 Feeler	Interno
Data:	05/10/2016	Externo
Nº	Atividade	Tempo Cronometrado
1	Abrir Máquina	00:00:12
2	Ir pegar vassoura e pá	00:01:46
3	Voltar para a máquina	00:00:28
4	Limpar Máquina	00:04:13
5	Pegar carrinho de disposição de cavacos	00:00:56
6	Colocar cavacos no carrinho	00:02:12
7	Levar Carrinho com cavacos até a caçamba	00:01:08
8	Depositar cavacos na caçamba	00:01:23
9	Guardar carrinho	00:00:36
10	Buscar Carrinho para pegar peças e Ponte Rolante	00:00:34
11	Buscar Ponte Rolante	00:00:26
12	Levar Ponte Rolante e carrinho até o Local da Peça	00:00:40
13	Afastar mesa máquina Fresa	00:01:05
14	Colocar a Peça no Carrinho	00:00:40
15	Desprender a Peça da Ponte	00:00:19
16	Levar a Peça até a bancada de preparação	00:00:17
17	Tirar o Imã da Peça	00:00:02
18	Prender Talha Manual da Peça	00:00:27
19	Posicionar a Peça para Limpeza a jato de ar	00:00:32
20	Limpar a Peça	00:01:15
21	Colocar a Peça na Bancada	00:00:27
22	Tirar o Gancho da Talha da Peça e prender no Suporte	00:00:03
23	Posicionar Suporte em cima da Peça	00:00:09
24	Limpar Peça e Suporte	00:00:08
25	Descer Peça no Suporte	00:00:06
26	Buscar Parafusos para prender o Suporte na Peça	00:00:25
27	Prender o Suporte na Peça	00:02:40
28	Lixar Suporte	00:00:13
29	Prender Talha Manual na Peça	00:00:53
30	Levar Peça até a Máquina	00:00:58
31	Guardar Talha Manual	00:00:30
32	Pegar Ferramentas na Gaveta	00:00:11
33	Colocar Relógio	00:00:10
34	Posicionar a Peça	00:00:20
35	Tirar Gancho da Peça	00:00:13
36	Prender Suporte	00:00:29
37	Zerar Ferramenta	00:01:21
38	Apertar Parafusos Suporte	00:00:50
39	Zerar Peça	00:04:26
40	Guardar Ferramentas Usadas	00:00:05
41	Tirar Relógio	00:00:17
42	Chamar Posição Ferramenta de Corte	00:00:25
43	Colocar Ferramenta de Corte	00:00:08
44	Zerar Ferramenta de Corte na Peça	00:00:55
Tempo Total do Setup		00:35:33
Tempo Atividades Setup Interno		00:12:56
Tempo Atividades Setup Externo		00:22:37

Fonte: Elaboração Própria.

Pela Tabela 2 a divisão das atividades em setup interno e externo já representou uma redução do tempo total de *setup* de 35 minutos e 33 segundos para 12 minutos e 56 segundos, sendo este um ganho 63,62% com a redução de tempo ocioso. Afinal, as atividades de *setup* não eram padronizadas e nem organizadas, e portanto, não havia distinção entre *setup* interno e externo.

Porém seguindo as etapas 2 e 3 do SMED, buscou-se analisar as atividades que ainda assim precisam ser executadas e consideradas como *setup* interno e que demandavam mais tempo. Pela Tabela 2, a

atividade 4 (Limpar a máquina) e as atividades 37, 39 e 44 (relacionadas ao “zeramento” ou padronização da peça na máquina) se destacaram. Com isso, a Tabela 3 mostra para as atividades mencionadas a sugestão de uma melhoria e o ganho previsto no caso de sua implementação.

Tabela 3: Aplicação Etapa 2 e 3 – SMED. Otimização Atividades Setup Interno

Nº	Atividade	Procedimento	Tempo Atual	Tempo Melhoria	Tempo Reduzido
4	Limpar Máquina	Colocar mais um operador para ajudar nessa atividade	00:04:13	00:02:07	50%
37	Zerar Ferramenta	Mudar procedimento: Atual: Zeramento com relógio apalpador e calço	00:01:21	00:00:20	75%
39	Zerar Peça	Proposto: Uso de ferramenta de pré-set com relógio e base	00:04:26	00:00:20	92%
44	Zerar Ferramenta de Corte na Peça	magnética. Investimento: R\$800,00	00:00:55	00:00:20	64%

Fonte: Elaboração Própria.

Na Tabela 3, com a inclusão das melhorias propostas, o tempo total de setup seria reduzido de 35 minutos e 33 segundos para 5 minutos e 8 segundos, portanto, atingindo a casa de um dígito de tempo proposto por SHINGO (1996), o que representa uma redução de 85,6% no tempo de *setup* total. Os mesmos procedimentos mostrados para este cenário detalhado foram repetidos para os outros quatro cenários de preparação estudados. Com isso, foi gerado o Gráfico 1, no qual o cenário 1 corresponde à estes procedimentos detalhados nas Tabelas 2 e 3.

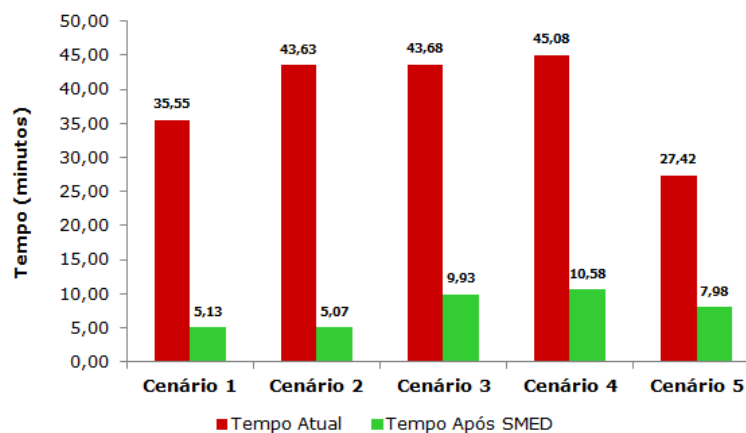


Gráfico 1. Comparação do tempo antes e depois da aplicação do SMED para 5 cenários analisados. Fonte: Elaboração Própria

Pode ser observado no Gráfico 1 que os resultados entre os *setups* das peças retangulares (cenários 1, 2, e 3) variaram entre 35 e 45 minutos, em virtude de diferentes operadores realizarem as atividades de *setup* no mesmo tipo de peça. Após a aplicação do SMED, esses tempos foram reduzidos significativamente para a casa dos 5 minutos nos cenários 1 e 2, enquanto, para o operador do cenário 3, a redução chegou próxima aos 10 minutos, o que mostra uma necessidade de treinamento para que o mesmo consiga a redução no tempo de atividades que compõem o *setup* interno e fique mais próximo aos outros dois operadores dos cenários 1 e 2. Como já mencionado a redução no cenário 1 foi de 85,6% do tempo total de *setup*, enquanto para os cenários 2 e 3, foram de 88,4% e 77,35%, respectivamente. Para o cenário 4, em que foi analisado o *setup* para peça cilíndrica, a redução foi de 76,5% no tempo, e para o cenário 5 correspondente ao *setup* para peça de pequena dimensão a redução foi de 70,9%.

Também foi analisado o total de tempo gasto com *setup* no último trimestre para o setor de usinagem da empresa, sendo que nos meses analisados, 71% do total de *setups* realizados corresponderam a peças em formato retangular, 18% a peças cilíndricas e 11% a peças de pequenas dimensões. Com isso, a partir do tempo total trimestral, calculou-se o tempo de *setup* em caso de aplicação do SMED para todas as operações de *setup* da empresa no setor estudado, conforme o Gráfico 2.

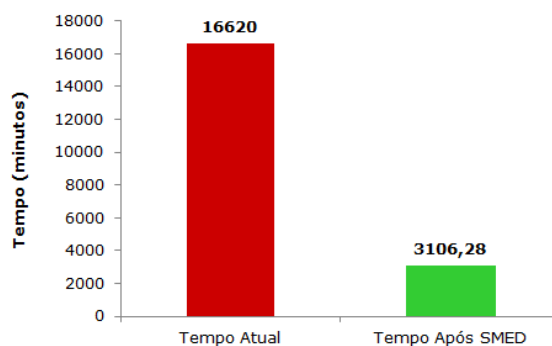


Gráfico 2. Comparação do tempo antes e depois da aplicação do SMED para o total gasto com setup no último trimestre. Fonte: Elaboração Própria.

Em termos de valores em minutos, a empresa teria uma redução do tempo de setup no trimestre em 13513,72 minutos no seu centro de usinagem, ou 225,29 horas, ou 25 dias – contando uma jornada de trabalho com turno de 9 horas. Assim, pelo Gráfico 2, um mês a cada três, é perdido com atividades improdutivoas de *setup* que não agregam valor à empresa. Aplicando-se o SMED e consequentemente a otimização desse tempo, esse valor seria de aproximadamente 6 dias gastos com setup ao longo do trimestre, o que traria um ganho financeiro significativo para a empresa, em termos de disponibilidade de máquina, e de capacidade produtiva, além de ganhos em sustentabilidade como será abordado na seção 4.2.

4.2. Pegada de Carbono

Para mensurar a Pegada de Carbono referente ao tempo de *setup* dos centros de usinagem foi necessário encontrar, em primeiro momento, o valor correspondente à assinatura de carbono (CES). Então, pela Equação 2:

$$CES = 0,34 \times [(1,35 \times 0,65) + (27,3 \times 0,25) + (20,2 \times 0,0856) + (15,3 \times 0,0096) + (25,8 \times 0,0048)] = \mathbf{3,2988 \frac{kgCO_2}{GJ}}$$

Com o valor de CES, foi necessário encontrar a energia consumida pelas máquinas durante a atividade de *setup* (EC) e, para isso, foi medida a corrente elétrica consumida por cada máquina em cada cenário avaliado. A situação de referência para o *setup* foi a medição do consumo quando cada máquina estava apenas energizada, ou seja, funcionando em potência mínima (modo stand-by), situação que ocorre durante o processo de *setup* interno. Para essa situação, a corrente encontrada em cada máquina foi de 1,5 A, não se distinguindo entre os dois modelos de máquina quando as mesmas estão em stand-by. Porém esse valor se diferencia quando a mesmas estão em um processo de usinagem que requer uso da potência máxima de seu motor, enquanto o modelo FV-1300 Feeler chega a um valor de 50 A de corrente elétrica, o modelo Discovery 1250 apresenta para o mesmo cenário o valor de 23 A.

Com o valor encontrado de corrente elétrica (I) para as máquinas energizadas, foi calculada a potência de cada máquina em cada um dos cinco cenários pela Equação 3, onde P representa potência em Watts (W), e V representa a tensão elétrica (Volts) – fixada em 220V.

$$P = V \times I \quad (3)$$

Foi obtida uma potência de 330 Watts, e como um Watt é igual 1 Joule por segundo (J/s), a potência representa 330 J/s ou $3,3 \times 10^{-7}$ Gigajoule [GJ]. Com isso calculou-se o valor de CE pela Equação 1:

$$CE = 3,3 \times 10^{-7} \times 3,2988 = \mathbf{1,088604 \times 10^{-6} kgCO_2}$$

Obtido o valor de carbono emitido, foi gerado o Gráfico 3, que mostra quanto se gerou de carbono durante os processos de setup dos centros de usinagem no trimestre estudado e a comparação com o quanto seria gerado em caso de aplicação do SMED no mesmo período.

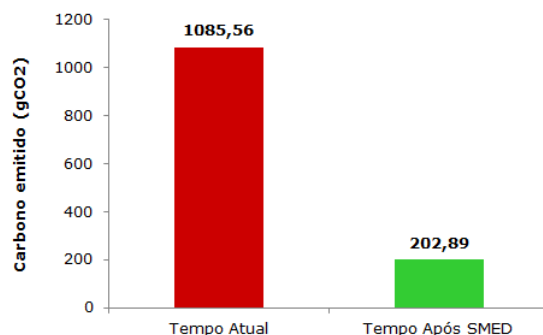


Gráfico 3. Gramas (g) de CO₂ emitidas para as atividades de setup antes e depois da aplicação do SMED no último trimestre. Fonte: Elaboração Própria.

Pode-se perceber no Gráfico 3 que a empresa gerou em seu setor de usinagem 1085,86 gramas de CO₂ equivalente apenas em atividades de setup, consideradas improdutivas e, com a otimização dessas pelo SMED, poderia ser gerado apenas 202,9 gramas de CO₂ equivalente, reduzindo a Pegada de Carbono em 81,3%. Para efeito de comparação, se a empresa mensurar sua Pegada de Carbono para as duas máquinas em processos de usinagem utilizando a potência máxima do motor de ambas, para cada segundo usinado, o modelo Discovery 1250 emitiria 0,016691 gCO₂ e o modelo FV-1300 Feeler emitiria 0,036899 gCO₂, ou seja, para as atividades de *setup* os modelos se equivalem nesse quesito, mas ao se usar uma peça a diferença entre ambos é de 221,07% a mais de emissão para o modelo FV-1300, com o modelo Discovery 1250 se apresentando como o mais ecoeficiente.

Lembrando que a matriz energética brasileira e, por consequência, a do Estado de São Paulo se caracteriza pelo uso da energia proveniente de hidrelétricas como maior fonte de abastecimento, a qual, pelos valores emitidos neste estudo (rever Tabela 1), gera menos quilogramas de CO₂ por Gigajoule de calor liberado. Isso acaba contribuindo para que a Pegada de Carbono em empresas de manufatura no Brasil tenda a ser reduzido, comparativamente, por exemplo, a empresas da China ou dos Estados Unidos, onde a participação de fontes não renováveis de energia possui contribuição mais significativa do que no Brasil.

5. Considerações Finais

Este artigo objetivou mostrar a importância do uso de ferramentas do *lean* e da Manufatura Sustentável para a otimização de processos e redução de desperdícios na manufatura, como no caso estudado, a redução de tempos improdutivos em consequência de processos de *setup*. Aliado a isso, ressalta-se a importância e a facilidade de implementação da proposta deste artigo em integrar o SMED com a Pegada de Carbono para o estudo de ecoeficiência em atividades de *setup* em processos de manufatura. Tal abordagem ainda é pouco explorada na literatura e em estudos derivados do *lean manufacturing*, os quais em geral, se amparam apenas em métricas tradicionais como aumento da produtividade e redução de desperdícios sem levar em conta o viés da sustentabilidade. Assim, os resultados deste estudo foram satisfatórios em termos da aplicação do SMED, pois houve expressiva redução nos tempos de *setup* dos cinco cenários avaliados em até 88,4%, enquanto que a Pegada de Carbono foi minimizada em até 81,3%. Finalmente, um *trade-off* entre a mensuração da Pegada de Carbono com a aplicação do SMED pode surgir, uma vez que, ao se reduzir o tempo de *setup* e ganhar mais horas de capacidade produtiva, na qual as máquinas estarão trabalhando em potências maiores por envolver operações de usinagem, a Pegada de Carbono da empresa poderá aumentar significativamente. Neste sentido, em prol da sustentabilidade empresarial, é necessário estudar um ponto de equilíbrio de operação, de forma a equilibrar os impactos da produção devido a este ganho de disponibilidade do centro de usinagem.

6. Referências Bibliográficas

ALLWOOD, J.M.; CULLEN, J.M. Steel, aluminium and carbon: alternative strategies for meeting the 2050 carbon emissions targets. In: R'09 TWIN WORLD CONGRESS / WORLD RESOURCES FORUM, 2009, Davos. Proceedings... Davos: [s.n.], 2009. p.1–6.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Brasil, 2009a.
- CHANGE, Intergovernmental Panel On Climate. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2013-04-28].
- DORNFELD, D.A. et al. Introduction to green manufacturing. In: DORNFELD, D.A. Green manufacturing: fundamentals and applications. Berkeley: Springer, 2013
- FEARNSIDE, P.M. 2015. Emissions from tropical hydropower and the IPCC. Environmental Science & Policy doi: 10.1016/j.envsci.2015.03.002 (in press).
- FIERGS. Caderno Setorial Rio Grande do Sul Metal Mecânico. Unidade de Estudos Econômicos – UEE. 110 p.
- FOOTPRINTING, Carbon. The Next Step to Reducing Your Emissions. 2013.
- JESWIET, J.; KARA, S. Carbon emissions and CES™ in manufacturing. CIRP Annals-Manufacturing Technology, v. 57, n. 1, p. 17-20, 2008.
- OHNO, T. O sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala. 1997. Porto Alegre: Bookman.
- PARRY, G.; MILLS, J.; TURNER, C. Lean competence: integration of theories in operations management practice. Supply Chain Management: An International Journal, v. 15, n. 3, p. 216-226, 2010.
- SANTOS, S. M. O conceito planejamento fino e controle da produção aplicado em ambiente de ferramentaria. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, 1997.
- SANTOS, J.; WYSK, R. A.; TORRES, J. M. Improving production with lean thinking. John Wiley & Sons, 2014.
- SECRETÁRIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO DO GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. A energia elétrica no Estado. Disponível em <<http://www.energia.sp.gov.br/energia-eletrica/energia-eletrica-no-estado/>>. Acesso em 08/12/2016
- SEBRAE. Santa Catarina em Número: Metal Mecânico. Relatório de Pesquisa, Florianópolis, 2010. 68 p. Disponível em <<http://www.sebrae-sc.com.br/scemnumero/arquivo/Metal-mecanico.pdf>>. Acesso em 28/11/2016.
- SHINGO, S. Sistema de troca rápida de ferramenta. Porto Alegre: Bookman, 2000.
- SINGH, B. et al. Lean implementation and its benefits to production industry. International Journal of Lean Six Sigma, v. 1, n. 2, p. 157-168, 2010.
- SILVA, D. A. L.; DA SILVAB, E. J.; OMETTOC, A. R. Green manufacturing: uma análise da produção científica e de tendências para o futuro. Production, v. 26, n. 3, p. 642-655, 2016.
- WIEDMANN, T.; MINX, J. A Definition of 'Carbon Footprint'. In: C. C. Pertsova, Ecological Economics Research Trends: Chapter 1, pp. 1-11, Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA.
- TOLMASQUIM, M. Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear. Empresa de Pesquisa Energética (EPE) - 2016.
- WOMACK, J., JONES, D., ROOS, D. A Máquina que Mudou o Mundo. Rio de Janeiro: Campus, 1992.
- YIN, R. Estudo de caso: Planejamento e Métodos. (2ª Ed.). Porto Alegre: Bookman. 2001.