SÃO PAULO

FACULDADE SENAI DE TECNOLOGIA MECATRÔNICA

REVISTA BRASILEIRA DE MECATRÔNICA

MANUFATURA ENXUTA SUSTENTÁVEL – METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DO MAPEAMENTO DE FLUXO DE VALOR SUSTENTÁVEL (Sus-VSM)

SUSTAINABLE LEAN MANUFACTURING - METHODOLOGY FOR IMPLEMENTING THE SUSTAINABLE VALUE STREAM MAPPING (Sus-VSM)

Jorge Antonio Giles Ferrer [1], [i]
Helmuth Obilcnik[2], [ii]
Nelson Wilson Paschoalinoto[3], [iii]
Daniel Otávio Tambasco Bruno[4], [iv]

RESUMO

O objetivo deste trabalho é fornecer subsídios para as indústrias que pretendem transformar seus processos produtivos em processos mais sustentáveis, levando em consideração aspectos econômicos, sociais e ambientais. A metodologia abordada é a pesquisa bibliográfica, em especial abordando trabalhos no exterior que estabelecem métricas sustentáveis a serem observadas na avaliação de processos, uma vez que no país existe carência de informações especificas. O trabalho inicia com a explicação dos conceitos sobre a sustentabilidade e os impactos da Industria 4.0 sobre os pilares da sustentabilidade. Esses conceitos são fundamentais para desenvolver o tema do Lean Manufacturing Sustentável, especificamente a metodologia de elaboração da ferramenta conhecida como Mapa de Fluxo de Valor, considerando métricas de sustentabilidade, ferramenta que vem sendo conhecida no mundo como Mapa Fluxo de Valor Sustentável. Finalmente um projeto piloto em que foi realizada a elaboração deste Mapa numa empresa fabricante de antenas parabólicas é explicado. Como conclusão principal cita-se a boa aplicabilidade prática da metodologia

[1] Doutor em Engenharia Mecânica. Professor da Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. e-mail: jorge.ferrer@sp.senai.br
[2] Administrador de Empresas. Presidente da Câmara de Comércio e Industria Colombia-Alemanha (AHK Colombia) e Membro do Conselho das Câmaras Peru-Alemanha (AHK Peru) e Ecuador-Alemanha (AHK Ecuador). e-mail: ob_helmuth@yahoo.com.br
[3] Mestre em Engenharia Mecânica. Professor do Instituto Mauá de Tecnologia. e-mail: nelson.paschoalinoto@maua.br
[4] Mestre em Engenharia da Informação. Professor da Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. e-mail: daniel.bruno@sp.senai.br

abordada que permite um conhecimento bastante preciso da utilização racional dos recursos disponíveis em um processo produtivo de uma maneira sustentável.

ABSTRACT

The objective of this work is to provide subsidies to industries that intend to transform their productive processes into more sustainable processes, taking into account economic, social and environmental aspects. The methodology addressed is bibliographic research, especially addressing works abroad that establish sustainable metrics to be observed in the evaluation of processes, since in the country there is a lack of specific information. The work begins with the explanation of the concepts on sustainability, the 3 pillars of sustainability and the impacts of Industry 4.0 on the pillars of sustainability. These concepts are key to developing the theme of Sustainable Lean Manufacturing, specifically the methodology of elaborating the tool known as Value Stream Mapping considering sustainability metrics, tool that has been known in the world as Sustainable Value Stream Mapping. Finally we show a pilot project where the elaboration of this map was carried out in a company that makes satellite dishes. As a main conclusion we can mention the good practical applicability of the approach methodology that allows a very precise knowledge of the rational use of the available resources in a productive process in a sustainable way.

1 INTRODUÇÃO

O conceito de desenvolvimento sustentável está em discussão desde 1960 e vem sendo objeto de estudos no mundo todo, porque não basta garantir processos de manufatura eficientes que garantam a competitividade das empresas se os processos não respeitam o meio ambiente nem o bem-estar dos recursos humanos envolvidos no processo.

Por outro lado, a sustentabilidade ganhou importância visto que os consumidores estão se tornando ainda mais exigentes devido à consciência ambiental cada vez mais valorizada. Por esse motivo, muitas empresas mudaram seus modelos de negócios e buscaram se tornar ecologicamente corretas, ou pelo menos transformar parte dos seus processos de produção mais sustentáveis.

De acordo com Faulkner e Badurdeen (2014) a manufatura sustentável envolve a criação de produtos manufaturados que usam processos que minimizem os impactos ambientais negativos, conservam energia e os recursos naturais, são seguros para os funcionários, comunidades e consumidores e são economicamente saudáveis.

A Indústria 4.0 integra processos, usa da inteligência artificial, da segurança de dados, da automação inteligente, da computação na nuvem e outras tecnologias para tornar processos de manufatura mais eficientes e competitivos. Mas além deste aspecto tecnológico a principal evolução se refere à otimização de todos os processos e uso racional de recursos. Por este motivo, a Indústria 4.0 e a sustentabilidade devem andar em sincronia, uma vez que não existe crescimento e desenvolvimento se o meio ambiente e a sociedade são prejudicados.

Diante da importância do tema, este trabalho pretende estabelecer as bases para que as indústrias adotem a manufatura sustentável e mostrar algumas metodologias que podem contribuir para que as empresas consigam monitorar seus processos de uma maneira sustentável, mostrando uma serie de métricas que podem ser adotadas pelos analistas na

avaliação do fluxo de valor dos seus processos não somente desde o ponto de vista econômico como é feito com as ferramentas tradicionais do Lean Manufacturing e sim abordando conceitos de sustentabilidade que são pouco conhecidos e aplicados na prática.

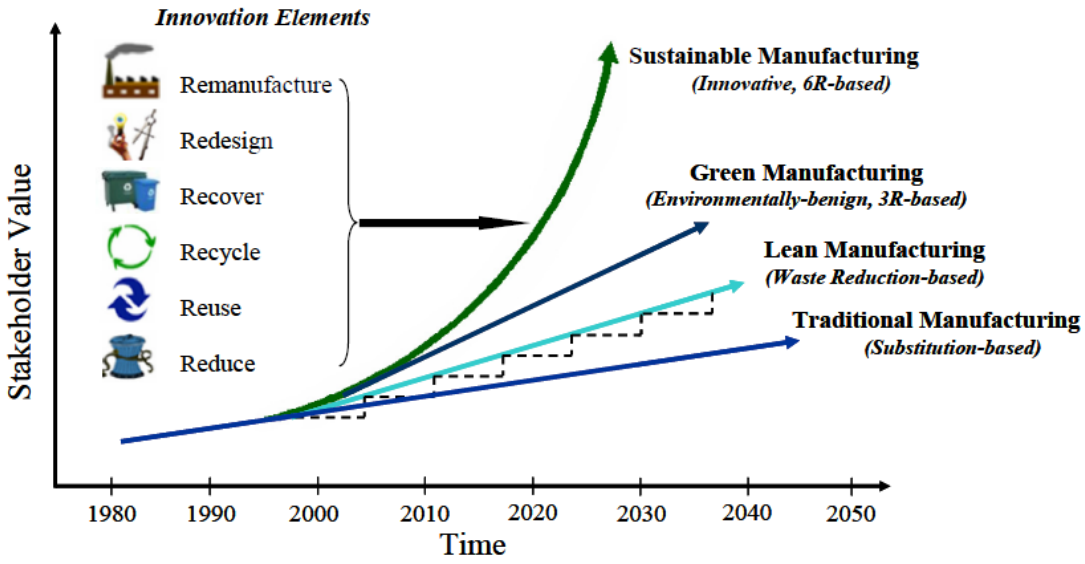
2 MANUFATURA SUSTENTÁVEL

Atingir a sustentabilidade na manufatura requer uma visão holística que abrange não apenas o produto e os processos de manufatura envolvidos em sua fabricação, mas também os sistemas de manufatura e toda a cadeia de suprimentos; também requer uma ênfase no ciclo de vida total do produto considerando as implicações econômicas, ambientais e sociais, denominados como o tripé da sustentabilidade (Elkington, 1998).

Uma abordagem que concentra a atenção em todos os estágios do ciclo de vida do produto para promover a manufatura sustentável está se concentrando no denominado "6Rs": redução, reutilização, reciclagem, recuperação, reprojeto e remanufatura. A abordagem dos "6Rs" é uma evolução do antigo "3Rs" (reduzir, reutilizar, reciclar) popularizados na década de 1990. Esta nova abordagem enfatiza a priorização da recuperação de valor dos produtos no fim da sua vida útil, realimentando-os em ciclos de vida subsequentes para obter um quase perpétuo fluxo de material. Implementar uma abordagem baseada em 6Rs para impulsionar a sustentabilidade na manufatura também exige a inovação de produtos, processos e sistemas para viabilizar o fluxo de material nesta malha fechada. A abordagem da manufatura sustentável pode permitir aumentos maiores no valor das partes interessadas (*stakeholders*), em oposição à manufatura enxuta que se baseia na redução de desperdícios ou à manufatura verde que foca em processos ambientalmente benignos (Jawahir et al., 2006).

A figura 1 mostra a evolução destas estratégias de manufatura ao longo do tempo e as tendências futuras que evidenciam a grande valorização da manufatura sustentável.

Figura 1 – Evolução das estrategias de manufatura



Fonte: Jawahir et al., 2006

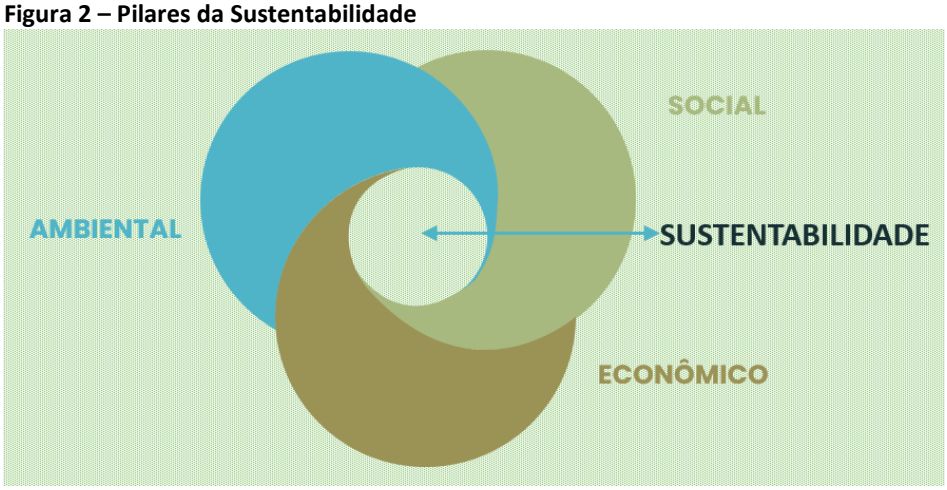
2.1 Pilares da Sustentabilidade

Segundo Gholami et al. (2019), a inovação tem sido considerada como um pré-requisito para o desenvolvimento da sustentabilidade nos sistemas de manufatura. Neste contexto, a concepção e desenvolvimento de abordagens estratégicas podem naturalmente ser estimuladas pela análise das melhores práticas e suas possíveis adaptações que possam satisfazer os requisitos do chamado *Triple Bottom Line*.

O conceito da sustentabilidade está sendo abraçado por grandes empresas que entendem que a adoção de processos sustentáveis é fundamental e, nesse contexto, o Triple Bottom Line é o foco, em português, o termo mais usado é "Tripé da Sustentabilidade ou Pilares da Sustentabilidade", formado pelas dimensões ambiental, social e econômica, como mostrado na figura 2.

Os Pilares da Sustentabilidade representam as perspectivas do planeta, das pessoas e do lucro, ou seja, uma empresa deve alinhar seus processos considerando aspectos econômicos, os impactos ambientais e a forma de relacionamento com seus colaboradores.

Figura 2 – Pilares da Sustentabilidade



Fonte: Do autor

Segundo Braccini (2018 apud Silva e Scur, 2020, p.10), o pilar ambiental concentra-se na compatibilidade entre a tendência do uso e renovação de recursos naturais. Referindo-se às organizações, esta dimensão é identificada pelos processos de consumo das fontes de recursos naturais, assim como das emissões que poderão ser absorvidas naturalmente pelo ecossistema existente. Esta dimensão é alcançável por meio da reciclagem e regeneração de recursos, reformulação do *layout* de processos e produtos para minimizar o uso de recursos, a adoção de modelos de economia circular.

Para Dyllick e Hockerts (2002 apud Silva e Scur, 2020, p.10), a dimensão social refere-se a um comportamento das organizações em realizar a preservação e o desenvolvimento do capital humano e social das comunidades, eles consideram que a sustentabilidade social tem como objetivo integrar aspectos como satisfação no trabalho, qualidade de vida, integração social entre comunidades, solidariedade, equidade e justiça na distribuição de bens e serviços. Finalmente a dimensão econômica refere-se à atitude organizacional para criar valor e equilibrar custos e receitas na produção e distribuição de bens e serviços e diz respeito às dimensões do desempenho econômico e financeiro das organizações.

2.2 Impactos da Industria 4.0 sobre os pilares da sustentabilidade

Atualmente se fala bastante sobre as tecnologias habilitadoras da Industria 4.0 e dos ganhos que as empresas podem ter em termos de competitividade e eficiência adotando tais tecnologias, integrando máquinas, processos e sistemas que se conectam e compartilham dados usados na busca de soluções mais eficientes. Dessa maneira a Indústria 4.0 impacta de forma positiva os três pilares da sustentabilidade como podemos ver a continuação.

2.2.1. Pilar Social

- Maior número de funcionários na área de serviços e em Pesquisa e Desenvolvimento
- Necessidade de trabalhadores mais qualificados e o surgimento de novas profissões
- Melhores condições de trabalho, maior grau de participação, satisfação e menores níveis de estresse
- Redução de trabalhos altamente repetitivos e manuais
- Maior grau de autonomia e flexibilidade favorecendo o equilíbrio entre trabalho e vida social
- Vida profissional com maior horizonte de durabilidade
- Menor nível de hierarquia dentro das organizações
- Interação entre humanos e robôs colaborativos
- Ambiente de trabalho móvel
- Ações de planejamento mais eficientes
- Maior desenvolvimento da criatividade e melhor desempenho dos trabalhadores
- Processo de tomada de decisões otimizado e de forma colaborativa entre pessoas e máquinas
- Maior transparência e previsibilidade nos processos
- Menores índices de acidentes laborais.

2.2.2 Pilar Ambiental

- Redução do consumo de recursos naturais e matéria prima
- Melhor eficiência no uso de energia
- Menores índices de contaminação
- Menor degradação do meio ambiente
- Redução dos índices de falhas e reprocessamento
- Redução dos custos com setup
- Resposta mais rápida diante das demandas do mercado
- Prazos de entrega de produtos mais curtos

2.2.3 Pilar Econômico

- Maior inversão em pesquisa e desenvolvimento
- Aumento da competitividade
- Aumento do faturamento das empresas

- Aumento da flexibilidade dos negócios
- Novas oportunidades para pequenas e medias empresas e startups
- Abertura de novos setores de clientes
- Criação de novos produtos e aumento do portfolio
- Viabilidade de trabalhar com pequenos lotes de produção
- Cadeia de valor mais colaborativa
- Produção de acordo com os requisitos individuais dos clientes
- Aumento do grau de satisfação dos clientes
- Maior integração do cliente com a cadeia de valor

3 LEAN MANUFACTURING SUSTENTÁVEL

Questionamentos gerais foram realizados sobre a utilização de práticas Lean para catalisar as melhores estratégias para a manufatura sustentável. Foram também realizados estudos para investigar o possível uso de ferramentas enxutas em setores verdes. O objetivo é identificar perdas em um sistema de manufatura para práticas de produção aplicando a filosofia Lean para o estabelecimento de futuros planos de melhoria.

Segundo Gholami et al. (2019), a fabricação de produtos social e ambientalmente sustentáveis exigem técnicas de manufatura que estão longe do único objetivo tradicional de minimizar custos e melhoria da eficiência; em vez disso, a ênfase deve ser sobre as implicações ambientais e sociais das operações de fabricação desses produtos. A transição para uma indústria transformadora sustentável pode começar a partir das técnicas já existentes no Lean Manufacturing, a partir das quais outros métodos podem ser desenvolvidos.

3.1 Ferramenta Lean de Mapeamento de Fluxo de Valor (VSM)

Uma das ferramentas fundamentais do Lean Manufacturing é o Mapeamento de Fluxo de Valor ou *Value Stream Mapping* (VSM) que permite identificar desperdícios ao longo de todo o processo de manufatura e mediante ações de melhoria contínua ir eliminando ou reduzindo tais desperdícios e sua adaptação para a manufatura verde e sustentável tem recebido muita atenção.

O fluxo de valor é definido como todas as ações ou processamentos necessários para transformar a matéria-prima em produto acabado pronto para ser entregue ao cliente, sejam estes processos que agregam valor ou que não agregam valor ao produto. No caso de projetos, representam as fases do projeto desde sua concepção até o lançamento (Rother e Shook, 1999).

A metodologia VSM convencional não leva em consideração o desempenho ambiental e social, uma vez que examina a parte econômica de uma linha de fabricação, que quantifica os tempos gastos em cada fase de processamento (tempo de ciclo, tempo de espera, tempo de troca, etc.). Não obstante, incorporando a capacidade de capturar o desempenho ambiental e social visualmente por meio da representação gráfica do mapa fluxo de valor (VSM) será possível aumentar a sua utilidade como uma ferramenta que pode ser usada para avaliar as operações de fabricação desde uma perspectiva sustentável, ferramenta que está sendo conhecida como Sus-VSM.

Gholami et al (2019) mostra a aplicação da ferramenta Sus-VSM (chamado por ele de Socio-VSM) num estudo de caso envolvendo o processo de aplicação de um substrato para HDs (Discos Rígidos), consistindo na deposição de uma camada de revestimento de níquel-fósforo utilizando uma reação auto catalítica sem ter que passar uma corrente elétrica através de uma solução aquosa. O autor define as métricas referentes aos 3 pilares da sustentabilidade usadas e obtém conclusões significativas sobre a eficácia da sua aplicação.

Neste artigo a ênfase será dada ao desenvolvimento de uma metodologia para elaborar um VSM sustentável, ou Sus-VSM que permita uma avaliação econômica, ambiental e social da sustentabilidade em um sistema de manufatura, assim como examinar as métricas para avaliação do desempenho da manufatura sustentável a serem incluídos no Sus-VSM que podem ser obtidas por meio de análises nos processos de manufatura. Para tal fim, explica-se a metodologia estabelecida por Faulkner e Badurdeen (2014) que é considerado um trabalho de referência na área.

3.2 Métricas para avaliar a manufatura sustentável

Uma série de estruturas e procedimentos de medida foram criados para permitir a avaliação da sustentabilidade de um sistema de manufatura, dentre os quais se destacam: a *Organization for Economic Corporation and Development's* (OECD) desenvolveu um kit de ferramentas abrangente para manufatura sustentável (OECD, 2011). O kit de ferramentas utiliza vários métodos, porém se concentra principalmente no impacto sobre o meio ambiente de produtos e processos. Outra iniciativa recente nos EUA no *National Institute for Standards and Technology* (NIST) também se concentra no desenvolvimento de métricas para a manufatura sustentável (Feng et al., 2010).

3.2.1 Metricas ambientais

Uma variedade de métricas podem ser usadas para avaliar o desempenho da manufatura considerando o pilar ambiental. Pusavec et al. (2010) foca na importância do uso prudente de recursos naturais e não renováveis para garantir a sustentabilidade e enfatiza a necessidade de monitorar o uso de metais (com foco na usinagem), fluidos de usinagem, água e energia para uma produção sustentável.

Com base nisso, e sendo comum para qualquer processo de manufatura, as métricas a serem incluída no Sus-VSM serão:

- consumo de água no processo;
- consumo de matéria-prima bruta;
- consumo de energia.

Métrica do consumo de água no processo:

A métrica de consumo de água do processo avalia a quantidade de água usada durante o processo de fabricação e representa um aspecto importante que deve ser avaliado para melhoria da sustentabilidade ambiental. Portanto, deve ser incluído como uma métrica no Sus-VSM. No entanto, a água adicionada ao produto (para elaborar um produto químico líquido) não deve ser incluída aqui, mas deve ser considerada dentro da utilização de recursos / materiais no Sus-VSM.

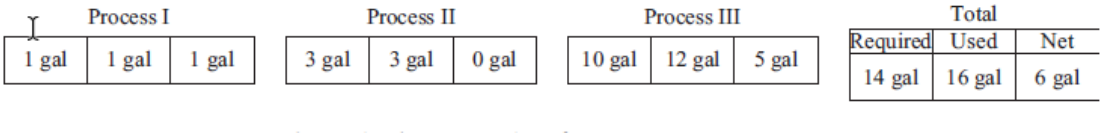
No Sus-VSM a quantidade de água necessária utilizada (segundo as especificações do processo) e a quantidade de água perdida em cada um dos processos, medida numa base volumétrica, devem ser registrados.

Na figura 3 pode-se ver a representação do consumo de água para cada processo utlizando 3 colunas: requerida, usada e perdida. A coluna de perdas (Net) representa a água não reutilizada ou não reciclada em outro processo dentro da planta, considerada essencialmente perdida indo para vias navegáveis ou estações de tratamento de águas residuais municipais, *Waste Water Treatment Plant* (WWTP). Se uma dada linha de processo tiver uma WWTP interna e reciclar a água da instalação ou de um processo para outro, esta água não será incluída na coluna de perdas da tabela para a elaboração do Sus-VSM. Adicionando esta métrica de três colunas para a avaliação do consumo de água no Sus-VSM consegue-se avaliar a eficácia e potencial de melhorias no uso da água, como pode-se ver na mesma figura.

Líquidos refrigerantes e óleos utilizados no processo de fabricação são causa de preocupações ambientais e podem ser tratados em forma semelhante no Sus-VSM quando for relevante.

O consumo de água do processo é registrado visualmente no Sus-VSM em numa tabela como mostrado na figura 3. Ela deve ser colocada abaixo da linha do tempo. A quantidade necessária, a quantidade usada, e a quantidade perdida devem ser colocadas para cada processo. Finalmente do lado direito os valores totais considerando o processo todo.

Figura 3 - Representação visual do consumo de água no Sus-VSM



Fonte: Faulkner e Badurdeen (2014)

Métrica de utilização de matéria-prima:

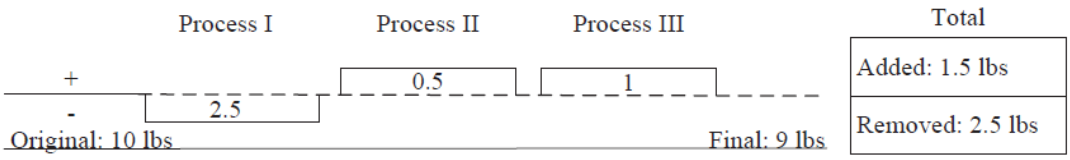
Segundo Sygulla et al. (2011), o consumo de energia e uso de matérias-primas é responsável por aproximadamente 50% dos custos de fabricação. Muitas vezes, a maior quantidade de material perdido num processo de fabricação é gerada em processos de remoção de material (como a usinagem) e estes resíduos posteriormente vão para a sucata. Diante disto, a alternativa mais sustentável é a reciclagem da sucata. Mesmo assim, esta manipulação dos resíduos também exigirá energia adicional e outros recursos que poderiam igualmente ser considerados resíduos. Por esse motivo, a métrica do uso de matéria-prima deve ser incluído no Sus-VSM.

O propósito de monitorar a utilização das matérias-primas não deve se restringir somente a uma avaliação da quantidade de matéria-prima inicial utilizada, mas também a quantidade de material adicionado ou removido em cada etapa do processo.

A métrica da utilização de matéria-prima será representada no Sus-VSM usando uma linha pontilhada para a massa inicial enquanto o material adicionado ou removido durante o processo será registado acima ou abaixo da linha pontilhada respectivamente. Para um determinado processo, como a retificação, a quantidade de material removido como cavaco será colocado abaixo da linha pontilhada e vice-versa para um processo aditivo, como visto na figura 4.

Para um processo que não adicionar nem remover material do produto, o uso da matéria-prima será representado pela linha pontilhada. Finalmente, o total de matéria-prima adicionada e removida pode ser indicada do lado direito, como mostrado na mesma figura.

Figura 4 - Representação visual do consumo de materia-prima no Sus-VSM



Fonte: Faulkner e Badurdeen (2014)

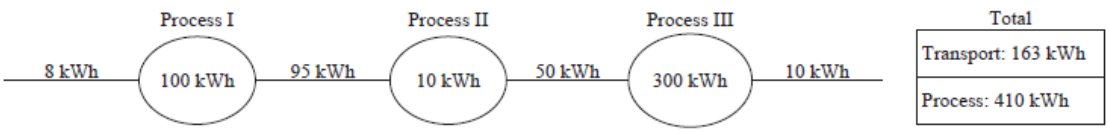
Métrica do consumo de energia:

O consumo de energia tem uma relação direta com a sustentabilidade do meio ambiente devido à utilização frequente de recursos não renováveis e emissões de gases. Portanto, o consumo de energia é uma importante métrica que deve ser incluída no Sus-VSM. O consumo de energia irá identificar a quantidade de energia consumida por cada processo, bem como a energia consumida entre os processos para efetuar o transporte e/ ou armazenamento da matéria-prima em processamento. Por outro lado, as perdas de energia das máquinas, devido ao calor gerado e perda de eficiência, não serão consideradas para evitar o aumento da complexidade para a elaboração do Sus-VSM.

O armazenamento deve considerar qualquer energia necessária para o condicionamento adequado da matéria-prima, como o uso de fornos de aquecimento ou câmaras de resfriamento para manter um produto a uma temperatura adequada até ser transferido à próxima operação.

Como mostrado, no Sus-VSM da Figura 5, a energia consumida durante o transporte e/ ou armazenamento deve ser colocado em uma linha entre as elipses, enquanto que a energia consumida durante o processo deve ser colocado dentro das elipses. Para evitar erros na avaliação no Sus-VSM, deve ser adotada uma unidade de energia comum. Por exemplo, se o volume do gás natural usado para armazenamento especializado entre dois processos é medido em milhares de pés cúbicos (MCF) e a energia gasta no transporte mediante empilhadeiras a diesel é medida em kWh, todas as unidades devem ser convertidas em uma unidade comum, por exemplo kWh. Finalmente, os totais referentes à energia usada no transporte e no armazenamento do processo todo devem ser indicados no extremo direito, como mostrado na mesma figura.

Figura 5 - Representação visual do consumo de energia no Sus-VSM



Fonte: Faulkner e Badurdeen (2014)

3.2.1 Metricas sociais

A sustentabilidade exige a análise do impacto no ambiente social considerando todas as partes interessadas (*stakeholders*) ao longo de todas as fases da manufatura do produto. Dado o âmbito das atividades avaliado usando o Sus-VSM, o aspecto que mais influencia os stakeholders são os recursos humanos empregados. Para avaliar este aspecto, os riscos à saúde e à segurança do empregado devem ser medidos e monitorados regularmente.

As métricas sociais propostas são divididas em duas categorias: métricas para avaliar o trabalho físico e métricas para avaliar o ambiente de trabalho. Estas métricas sociais visam avaliar a condições de trabalho e segurança dos trabalhadores e agir como um indicador para uma eventual necessidade de ação de melhoria.

Métrica para o trabalho físico

A métrica para avaliar o trabalho físico é introduzida para capturar e apresentar a ergonomia do local de trabalho. Várias ferramentas têm sido usadas para avaliar vários aspectos do trabalho físico, como o *Rapid Entire Body Assessment* (REBA) (Hignett e Mcattamney, 2000), o *Rapid Upper Limb Assessment* (RULA) (Mcatamney and Corlett, 1993), e a do Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH) (Waters et al., 1994). Porém, todos esses métodos são muito pesados e exigem também informações detalhadas que são difíceis de apresentar em um Sus-VSM.

A intenção com o uso da métrica de trabalho físico no Sus-VSM não é realizar uma avaliação ergonômica abrangente e sim identificar tarefas que representem risco para serem tratadas numa análise posterior. Por esse motivo, uma abordagem simples é desejável. O Índice de Carga Física ou *Physical Load Index* (PLI), introduzido por Hollman et al.(1999) é uma medida simples determinada com base a respostas a um questionário e leva em consideração a frequência da ocorrência, desde “nunca” até “muito frequentemente” em relação a diferentes posições do corpo e da manipulação de cargas.

As posições do corpo (tronco, braços e pernas), bem como cargas levantadas em uma determinada posição do corpo são incluídas para gerar uma pontuação PLI, que varia de 0 a 56, usando uma equação proposta. Uma vez que o PLI representa um meio razoável de avaliar o trabalho físico será utilizado na proposta do Sus-VSM.

O questionário e a fórmula computacional utilizada para obter o PLI são mostrados na tabela 1. O PLI deve ser avaliado para cada processo e para as operações entre os diversos processos. Sendo que alguns processos podem envolver vários operadores, é recomendável incluir as pontuações máximas (mais críticas) e pontuações médias do PLI para cada processo no Sus-VSM.

Tabela 1 - Questionário para obtenção do Índice de Carga Física - PLI

	Trunk	Never	Seldom	Sometimes	Often	Very often
T1	straight, upright					
T2	slightly inclined					
T3	strongly inclined					
T4	twisted					
T5	laterally bent					
	Arms	**Never**	**Seldom**	**Sometimes**	**Often**	**Very Often**
A1	Both below Shoulder					
A2	One arm above shoulder					
A3	Both Arms Above Shoulder					
	Legs	**Never**	**Seldom**	**Sometimes**	**Often**	**Very Often**
L1	Sitting					
L2	Standing					
L3	Squatting					
L4	Kneeling with one or both					
L5	Walking, Moving					
	Weight – Upright	**Never**	**Seldom**	**Sometimes**	**Often**	**Very Often**
Wu1	Light					
Wu2	Medium					
Wu3	Heavy					
	Weight – Inclined	**Never**	**Seldom**	**Sometimes**	**Often**	**Very Often**
Wi1	Light					
Wi2	Medium					
Wi3	Heavy					
		Never	**Seldom**	**Sometimes**	**Often**	**Very Often**
	Scores Assignab; e	0	1	2	3	4

PLI Score computation:

$$PLI = 0.974 \times T_2\text{score} + 1.104 \times T_3\text{score} + 0.068 \times T_4\text{score} + 0.173 \times T_5\text{score} + 0.157 \times A_2\text{score} + 0.314 \times A_3\text{score} + 0.405 \times L_3\text{score} + 0.152 \times L_4\text{score} + 0.152 \times L_5\text{score} + 0.549 \times Wu_1\text{score} + 1.098 \times Wu_2\text{score} + 1.647 \times Wu_3\text{score} + 1.777 \times Wi_1\text{score} + 2.416 \times Wi_2\text{score} + 3.056 \times Wi_3\text{score}.$$

Fonte: Hollman et al. ,1999

Métrica para o ambiente de trabalho:

A métrica para avaliar o ambiente de trabalho cobrirá quatro categorias de riscos devidos a:

- Sistemas elétricos (E)
- Produtos químicos perigosos/Materiais Usados (H)
- Sistemas Pressurizados (P)
- Alta Velocidade dos Componentes (S)

Além disso, o nível de ruído também deve ser incluído nesta métrica. Para cada potencial de risco deve ser atribuída uma nota de 1 a 5, em função da categoria de risco associada a um determinado processo com base na probabilidade de ocorrência e do impacto desse risco, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Descrição da escala de risco no ambiente de trabalho

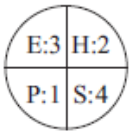
Potential operator risk	Description
–	Potential risk does not exist (DNE).
1	Risk is present but has low impact and probability of occurring.
2	Risk is present but has low impact and high probability or high impact and low probability of occurring.
3	Risk is present but has medium impact and medium probability of occurring.
4	Risk is present but has either medium impact and high probability of occurring or high impact and medium probability of occurring.
5	Risk is present but has high impact and high probability of occurring.

Fonte: Faulkner e Badurdeen (2014)

Por exemplo caso existisse um risco potencial devido à presença de sistemas pressurizados, a ocorrência teria um baixo impacto (ou seja, a ocorrência de uma lesão seria menor) e a probabilidade de ocorrência seria baixa. Então o potencial de risco do operador devido ao sistema pressurizado (P) terá uma métrica igual a 1.

A métrica do ambiente de trabalho será representada por um círculo dividido em 4 quadrantes, um para cada categoria de risco, que deve ser colocado acima de cada fase do processo, como mostra a figura 6.

Figura 6 - Símbolo utilizado para indicar a métrica do risco no ambiente de trabalho



Fonte: Faulkner e Badurdeen (2014)

Os níveis de ruído em um ambiente de manufatura representam outra fonte de risco aos operadores que é motivo de preocupação. Enquanto qualquer ruído acima de 80 dB coloca ao operador em risco, a duração da exposição ao nível de ruído determina significativamente os efeitos sobre o operador. Por esse motivo os níveis de exposição também precisam ser registrados no Sus-VSM para permitir uma análise da saúde dos funcionários e sua segurança. A equação 1 indica como medir a dose de ruído (D), ela pode variar para um operador de 0 a 100% (OSHA, 2008).

$$D = \frac{Tempo\ e\ exposição\ ao\ nivel\ do\ som}{Máximo\ tempo\ permitido\ no\ nivel\ do\ som}\ x\ 100 \quad (\%) \qquad (1)$$

Fonte: Adaptado de Osha (2008)

A partir da dose de ruído calculada acima, pode-se medir o Tempo Médio Ponderado (*Time Weighted Average*) TWA para registo da exposição ao ruído em dB, como mostra a equação 2. O TWA pode ser considerado como o nível sonoro equivalente que produziria uma dose de ruído equivalente a estar exposto a esse nível sonoro durante um período contínuo de 8h (OSHA, 2008).

$$TWA = 16{,}61\ log_{10}\ \frac{D}{100} + 90 \qquad (2)$$

Fonte: Adaptado de Osha (2008)

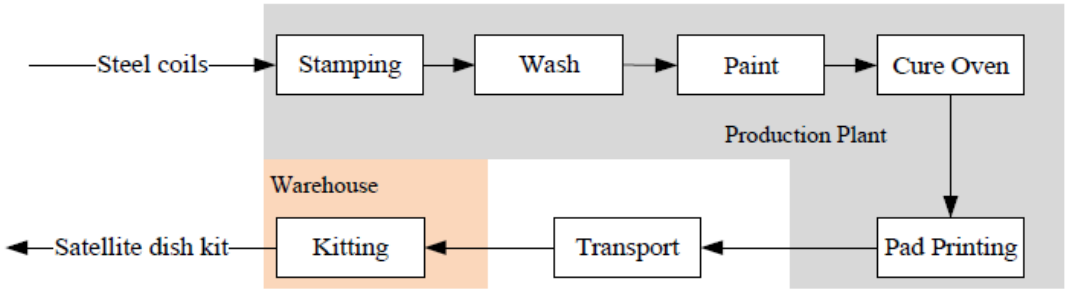
Usando o TWA calculado na equação (2), o nível de ruído pode ser medido em cada processo e registados na caixa do processo no Sus-VSM juntamente com o tempo do ciclo, tempo de setup, tempo de operação e Índice de Carga Física (PLI). As medidas calculadas acima representarão os níveis de ruído reais no ambiente de trabalho. Se os operadores utilizam algum tipo de equipamento de proteção individual (EPI) para atenuação do ruído, então a avaliação de redução do ruído (*noise reduction ratings*) NRR dessas emissões pode ser utilizada para modificar o nível de ruído quando mostrado no Sus-VSM.

4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO SUS-VSM

4.1 Projeto Piloto

Faulkner e Badurdeen (2014) executaram um projeto piloto de elaboração do Sus-VSM usando a metodologia descrita anteriormente, para um fabricante de antenas parabólicas para televisão. As fases do processo de fabricação são mostradas na figura 7.

Figura 7 - Fluxo do processo de manufatura de discos para parabólicas



Fonte: Faulkner e Badurdeen (2014)

O processo de fabricação produz cerca de 20.000 parabólicas por mês. As bobinas de aço que chegam passam por um processo de estampagem segundo as especificações de projeto até atingir seu formato final em forma de disco. O disco da parabólica passa é então por um sistema de lavagem em cinco estágios para remover resíduos de óleo ou impurezas geradas no processo de estampagem. Após a lavagem, o disco entra a um forno para secar (que para efeitos do Sus-VSM será considerado como um armazenamento especial).

Após a secagem, o disco passa por um processo de pintura, onde tinta em pó é aplicada e curada num forno para permitir que a tinta adira ao disco. Os processos de lavagem, pintura e cura usam o mesmo sistema de transporte. Uma vez que o disco é retirado do sistema de transporte após o processo de cura, emblemas especiais são impressos pelo processo de tampografia (processo de impressão indireta e em baixo-relevo). Como continuação, o disco é transportado para outro edifício (armazém) para ser equipado com um kit e outros acessórios antes de ser enviado para o cliente. Para o transporte entre processos são utilizadas empilhadeiras e para o transporte até o armazém, são usados caminhões.

4.2 Informações e métricas

As informações relacionadas a prazos de entrega do material, frequência de recebimento do material e de envio de produtos, assim como o fluxo de informação dentro da fábrica com os clientes e fornecedores, foram fornecidos pelo fabricante.

As medições dos tempos de ciclo foram feitas diretamente em cada processo ou os tempos foram calculados quando o processo não podia ser monitorado.

Para a coleta de dados do PLI, os operadores envolvidos em cada processo e os trabalhadores envolvidos no transporte das peças foram convidados a preencher o questionário apresentado por Hollman et al. (1999). Os valores médios e máximos do PLI foram selecionados para serem mostrados em cada operação no Sus-VSM.

A coleta de dados de ruído em cada fase da fabricação foi realizada por um terceiro. As informações necessárias para elaborar o círculo que contêm a métrica do ambiente de trabalho para cada processo foram fornecidos pelo Gerente de Qualidade. A pesagem do disco além de ser feita no início do processo, ocorreu também após os processos de estampagem e cura no forno para quantificar a diferença da massa em relação ao início do processo. A massa adicionada durante o processo de pintura por disco foi fornecida pelo fabricante.

Uma vez que a informação a ser apresentado no Sus-VSM deve tomar como base um disco, o consumo de energia e métricas de água no processo foram calculados também com base em 1 disco. A equação 3 serve como uma base conceitual para este calculo:

$$Quantidade\ por\ disco = \frac{Energia\ total\ ou\ fluxo\ de\ água\ no\ processo\ no\ tempo\ t}{Número total\ de\ discos\ no\ sistema\ no\ tempo\ t} \quad (3)$$

Fonte: Faulkner e Badurdeen (2014)

Com os dados sobre o fluxo de água (galões/s), consumo de energia (potência nominal), tempo de ciclo (s), e número de peças em processamento no tempo (n), pode-se então calcular a quantidade de água utilizada e a energia consumida por prato utilizando a equação 4:

$$Quantidade\ por\ disco = \frac{Taxa\ de\ fluxo\ x\ Tempo\ de\ ciclo}{(2n-1)} \quad (4)$$

Fonte: Faulkner e Badurdeen (2014)

Utilizando a Equação (4) foi calculado o consumo de energia para os processos de estampagem, lavagem, cura no forno e impressão (tampografia) bem como na secagem antes do processo de pintura. Alguns desses utilizam bombas, ventiladores e queimadores de gás natural, que consomem energia. A energia agregada e o fluxo de energia foram calculados, considerando a potência nominal (kWh), velocidade (pés/s), distância percorrida pelas empilhadeiras e caminhão (pés), e número de discos processados por lote. Dessa maneira, consumo de energia entre processos foi calculado utilizando a equação 5:

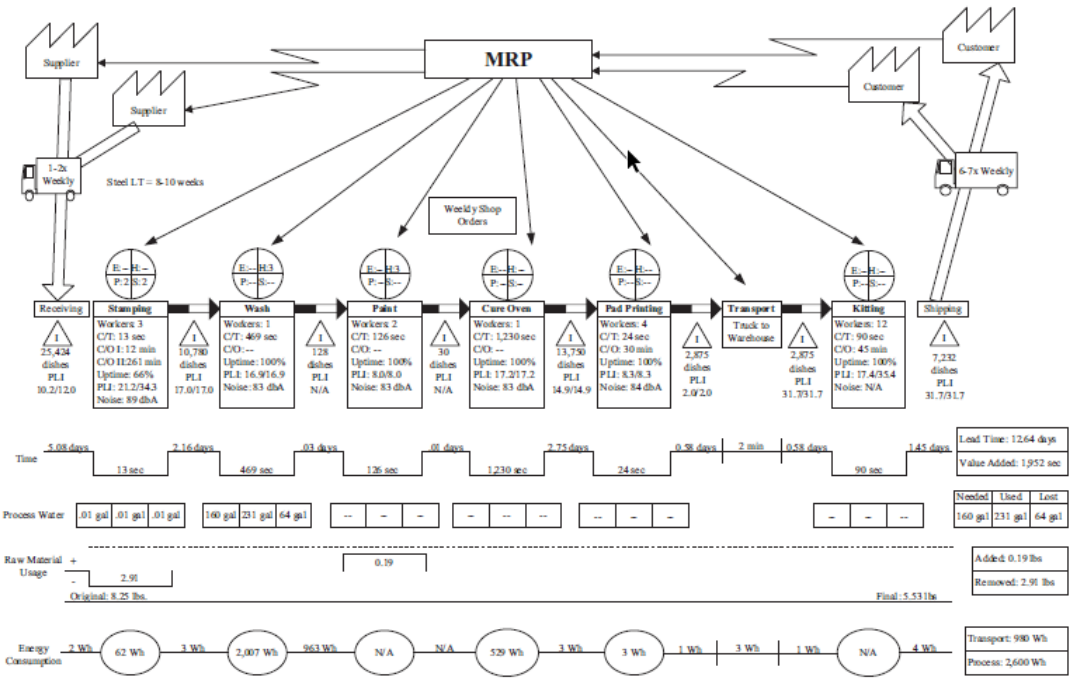
$$Energia\ consumida\ por\ disco = \frac{Potência\ x\ Distância\ percorrida}{Velocidade\ x\ Número\ de\ Discos} \quad (5)$$

Fonte: Faulkner e Badurdeen (2014)

4.3 Elaboração do Mapa Fluxo de Valor Sustentável Sus-VSM

Com todas as informações sobre a linha de manufatura de antenas parabólicas e métricas realizadas diretamente no processo, foi elaborado o Sus-VSM, mostrado na figura 8.

Figura 8 - Mapa fluxo de valor sustentável do processo de manufatura



Fonte: Faulkner e Badurdeen (2014)

4.4 Conclusões da aplicação do Sus-VSM

Como pode ser observado no Sus-VSM , o Tempo de Valor Agregado (que considera as operações que agregam valor) foi de 1952 s, aproximadamente 32 min, enquanto que o Lead Time (tempo que a matéria-prima passa ao longo de todas as fases do processo) é superior a 12 dias. Este resultado evidencia a existência de muito tempo gasto em atividades que não agregam valor ao produto. Essas métricas podem ser determinadas em um VSM convencional.

O que é mais interessante é o desempenho de sustentabilidade da linha de produção como revelado por meio das novas métricas incluídas no Sus-VSM. Em relação ao consumo de energia foi determinado que cada disco consome 2,6 kWh de energia nos diversos processos e 0,98 kWh no transporte, o que totaliza 3,58 kWh de energia por disco de parabólica. Uma das revelações mais importantes para o fabricante foi o alto consumo de energia gasta no processo de lavagem 2 kWh, equivalente a 56% do consumo total de energia da linha de fabricação.

Os 64 galões de água perdidos por disco também mostram oportunidades de melhoria no aspecto de sustentabilidade ambiental.

Por outro lado, os valores das pontuações do Índice de Carga Física PLI, uma das métricas do trabalho físico, não foram alarmantes em geral. Foi maior para o processo de montagem de kits devido à natureza repetitiva das operações envolvidas.

Também é importante destacar que cerca de 35% do material é perdido como sucata do processo. Em relação à métrica do risco no ambiente de trabalho, representado por um

círculo, não foram observadas áreas de grande preocupação e não houve resultados preocupantes em relação ao nível sonoro.

O fabricante achou que o Sus-VSM é muito útil para captar visualmente o desempenho sustentável da linha de produção das antenas parabólicas. O fabricante também informou que não tinha conhecimento de valores de referência para métricas semelhantes na indústria, o consenso da gestão foi que esta avaliação forneceu informações não controladas anteriormente com a metodologia convencional do VSM e ajudou a identificar áreas com potencial de melhoria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A manufatura sustentável representa o caminho certo a ser seguido pelas indústrias no mundo todo, que devem tornar seus processos mais eficientes, menos prejudiciais ao meio ambiente e com responsabilidade social. A disponibilidade de recursos naturais tem um limite e seu uso irracional faz aumentar os custos de fabricação e prejudica o meio ambiente. Por esse motivo a reciclagem de matérias-primas, redução do consumo de energia e minimização das perdas na utilização de água nos processos é fundamental.

Este artigo mostrou uma metodologia para elaborar o Mapa de Fluxo de Valor Sustentável, que é uma extensão do tradicional Mapa de Fluxo de Valor utilizado intensivamente no Lean Manufacturing. As métricas propostas são viáveis de serem calculadas e monitoradas o que torna esta estratégia aplicável pelos analistas de processos para avaliar seus processos considerando os 3 pilares da sustentabilidade: econômico, social e ambiental.

Finalmente, acredita-se que com a aplicação dos conceitos sobre a manufatura sustentável e a implantação prática de metodologias para elaborar o Mapa Fluxo de Valor Sustentável Sus-VSM como a apresentada aqui nos processos de manufatura, contribui-se não somente com o aumento da competitividade e eficiência da indústria senão que esta melhoria acontecerá dentro de um contexto sustentável, de respeito ao meio ambiente e aos recursos humanos envolvidos nos processos produtivos.

REFERÊNCIAS

ELKINGTON, J. **Cannibals with forks:** the Triple Bottom Line of the 21st Century Business**.** New Society Publishers, USA, 1998.

EVANS, S.; VLADIMIROVA, D.; HOLGADO, M.; VAN FOSSEN, K.; YANG, M.; SILVA, E. A. & BARLOW, C. Y. Business model innovation for sustainability: towards a unified perspective for creation of sustainable business models. **Business Strategy and the Environment**, v. 26, n. 5, p 597-608, 2017.

FAULKNER, W.; BADURDEEN, F. Sustainable value stream mapping (Sus-VSM): Methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. **J. Cleaner Prod.**, v. 85, p 8-18, Dez. 2014.

GHOLAMI et al. Social Value Stream Mapping (Socio-VSM): Methodology to Societal Sustainability Visualization and Assessment in the Manufacturing System. **IEEE Access**, v. 7, p 131638 – 131648, set. 2019.

HIGNETT, S.; McATTAMNEY, L. Rapid entire body assessment (REBA). **Appl. Ergon**. v. 31, p 201-205, 2000.

HOLLMAN, S.; KLIMMER, F.; SCHMIDT, K.; KYLIAN, H. Validation of a questionnaire of assessing physical work load. **Scand. J. Work Environ. Health**, v. 25, n. 2, p 105–114, 1999.

JAWAHIR, I.S.; ROUCH, K.E.; DILLON JR.; O.W.; JOSHI, K.J.; VENKATACHALAM, A.; JAAFAR, I.H. **Total life-cycle considerations in product design for manufacture:** a framework for comprehensive evaluation, (keynote paper). In: Proc. TMT 2006, Lloret de Mar, Barcelona, Espanha. p 1-10, set. 2006.

Mc ATTAMNEY, L.; CORLETT, E. RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. **Appl. Ergon**., v. 24, p 91-99, 1993.

OSHA. **Standard 1910.95, 2008**. Occupational Noise Exposure, United States Occupational Safety and Health Administration. United States Department of Labor.

ROTHER, M; SHOOK, J. **Learning to see:** value stream mapping to add value and eliminate muda. Cambridge, MA, USA: Lean Enterprise Institute, 2003.

SILVA, E. C. da; SCUR, G. Influência da Indústria 4.0 na sustentabilidade: um enfoque do Triple Bottom Line. In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE, **Anais[...].**São Paulo: Universidade de São Paulo, 2020. Disponível em: http://engemausp.submissao.com.br/22/anais/arquivos/542.pdf?v=1641827036. Acesso em: 10 jan. 2022.

WATER, T.; ANDERSON, V.; GANG, A. **Applications manual for the Revised NIOSH Lifting Equation**. United States Department of Health and Human Services, National Institute for the Occupational Safety and Health, 1994. Disponível em: http://www.cdc.gov/niosh/docs/94-110/pdfs/94-110.pdf . Acesso em: 8 jan. 2022.

SOBRE OS AUTORES

_____

[i] JORGE ANTONIO GILES FERRER

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Mestre em Engenharia Mecânica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. Engenheiro Mecânico pela Pontificia Universidad Católica del Perú. Possui Licenciatura plena em pedagogia para educação profissional em ensino médio, pela Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP. Atualmente é docente da Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica em São Caetano do Sul SP, onde ministra disciplinas no Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica e na pós-graduação na área de Gestão de Projetos e Produção (Lean Manufacturing e Virtualização de Sistemas Produtivos). É membro do Banco de Avaliadores do Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior do Ministerio de Educação do Brasil - MEC e Avaliador do Projeto de Formação Profissional Dual em Mecatrônica da Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha.

[ii] HELMUTH OBILCNIK

Administrador de Empresas pela Universidade de Pforzheim, Alemanha, natural de Klagenfurt Áustria. Fez cursos de especialização em Finanças e Controlling, Business Management, Global Leadership, entre outros. Iniciou sua carreira em Bosch Alemanha em 1987 e atuou em diferentes áreas da empresa como TI, Auditoria, Finanças, Controlling e Administração. Tem atuado em diversos países como Alemanha, Portugal, Argentina, Brasil, Panamá, Colombia e Peru. Foi Presidente da Bosch para a região norte de América Latina e General Manager da Bosch em Colombia, Peru, Ecuador, Panamá e Venezuela no período 2011-2022. Possui grande experiência na abertura e desenvolvimento de mercados internacionais, reengenharia de processos e restruturação em empresas de diversos setores. Paralelamente é Presidente da Câmara de Comércio e Industria Colombia-Alemanha (AHK Colombia) e Membro do Conselho das Câmaras Peru-Alemanha (AHK Peru) e Ecuador-Alemanha (AHK Ecuador).

[iii] NELSON WILSON PASCHOALINOTO

Doutorando em Engenharia Mecânica. Mestre em Engenharia Mecânica com ênfase em Materiais e Processos. É pós-graduado em Engenharia de Processos Industriais - Instrumentação, Automação e Controle. Possui graduação em Tecnologia Mecânica em Processos de Produção e Licenciatura Plena em Mecânica. Atualmente é Professor do Instituto Mauá de Tecnologia. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Processos de Fabricação, CAD, CAE e em Coordenação Pedagógica no ensino técnico.

[iv] DANIEL OTÁVIO TAMBASCO BRUNO

Doutorando e Mestre em Engenharia da Informação pela Universidade Federal do ABC (2013). Especialista em Análise, desenvolvimento de Sistemas e Banco de Dados pela Universidade de Ribeirão Preto (2007), Especialista em Educação a Distância pela Universidade Paulista (2012). Bacharel em Análise de Sistemas pela Universidade Paulista (2003). Atualmente é Técnico em Manufatura Digital e Professor da Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica Industrial. Tem experiência na área de Inteligência Artificial, Internet das coisas, Gestão de Tecnologia da Informação e Desenvolvimento de Sistemas de Informação. http://lattes.cnpq.br/3491851270517427