



**SÃO PAULO**

**FACULDADE SENAI DE TECNOLOGIA MECATRÔNICA  
REVISTA BRASILEIRA DE MECATRÔNICA**

**LEAN MANUFACTURING SOSTENIBLE – METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DEL MAPEO DE  
FLUJO DE VALOR SOSTENIBLE (Sus-VSM)**

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

**Jorge Antonio Giles Ferrer<sup>1, i</sup>  
Helmuth Obilcnik<sup>2, ii</sup>  
Nelson Wilson Paschoalinoto<sup>3, iii</sup>  
Daniel Otávio Tambasco Bruno<sup>4, iv</sup>**

## **RESUMEN**

El objetivo de este trabajo es ofrecer subsidios para las industrias que pretenden transformar sus procesos productivos en procesos más sostenibles, llevando en consideración aspectos económicos, sociales y ambientales. La metodología utilizada consiste en la investigación bibliográfica, especialmente analizando trabajos realizados en el exterior que establecen métricas sostenibles a ser seguidas en la evaluación de procesos, una vez que en el Brasil existe falta de informaciones específicas. El trabajo se inicia con la explicación de los conceptos sobre la sostenibilidad y los impactos de la Industria 4.0 sobre los pilares de la sostenibilidad. Estos conceptos son fundamentales para desarrollar el tema del *Lean Manufacturing* Sostenible, específicamente la metodología de elaboración de la herramienta conocida como Mapeo de Flujo de Valor, considerando métricas de sostenibilidad, herramienta que está siendo conocida mundialmente como Mapeo de Flujo de Valor Sostenible. Finalmente es abordado un proyecto piloto en el que fue realizada la elaboración de este Mapa en una empresa fabricante de antenas parabólicas. Como conclusión principal podemos citar la buena aplicabilidad práctica de la metodología propuesta que permite obtener un conocimiento

---

<sup>1</sup> Doctor en Ingeniería Mecánica. Profesor de la Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. E-mail: [jorge.ferrer@sp.senai.br](mailto:jorge.ferrer@sp.senai.br)

<sup>2</sup> Administrador de Empresas. Presidente de la Cámara de Comercio e Indústria Colombia-Alemania (AHK Colombia) y Miembro del Consejo das Câmaras Perú-Alemania (AHK Perú) y Ecuador-Alemania (AHK Ecuador). e-mail: [ob\\_helmuth@yahoo.com.br](mailto:ob_helmuth@yahoo.com.br)

<sup>3</sup> Master en Ingeniería Mecánica. Profesor del Instituto Mauá de Tecnologia. e-mail: [nelson.paschoalinoto@maua.br](mailto:nelson.paschoalinoto@maua.br)

<sup>4</sup> Master en Ingeniería en Computación. Profesor de la Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. e-mail: [daniel.bruno@sp.senai.br](mailto:daniel.bruno@sp.senai.br)

bastante exacto de la utilización racional de los recursos disponibles en un proceso productivo de una manera sostenible.

## 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 INTRODUCCIÓN

El concepto de desarrollo sostenible está siendo discutido desde 1960 y es objeto de estudios en todo el mundo, porque no basta garantizar procesos de manufactura eficientes que garanticen la competitividad de las empresas si sus procesos no respetan el medio ambiente ni el bienestar de los recursos humanos relacionados con el proceso.

Por otro lado, la sostenibilidad ganó importancia debido a que los consumidores están cada vez más exigentes debido a la conciencia ambiental cada vez más valorizada. Por este motivo, muchas empresas reorganizaron sus modelos de negocios y buscaron volverse ecológicamente correctas, o por lo menos transformar parte de sus procesos de producción más sostenibles.

De acuerdo con Faulkner y Badurdeen (2014) la manufactura sostenible abarca la creación de productos manufacturados que utilizan procesos que minimizan los impactos ambientales negativos, conservan energía y recursos naturales, son seguros para los trabajadores, comunidades y consumidores y son económicamente viables.

La Industria 4.0 integra procesos, usa inteligencia artificial, permite seguridad en los datos, aplica la automatización inteligente, la programación en la nube y otras tecnologías para permitir que sus procesos de manufactura sean más eficientes y competitivos. Pero además de este aspecto tecnológico, la principal evolución se refiere a la optimización de todos los procesos y el uso racional de los recursos. Por este motivo, la Industria 4.0 y la sostenibilidad deben andar en sincronía, desde que no existe crecimiento y desarrollo si el medio ambiente y la sociedad son perjudicados.

Delante de la importancia del tema, este trabajo pretende establecer las bases para que las industrias adopten la manufactura sostenible y también mostrar algunas metodologías que pueden contribuir para que las empresas consigan monitorear sus procesos de una manera sostenible, mostrando una serie de métricas que pueden ser adoptadas por los

analistas en la evaluación de flujo de valor de sus procesos, no solamente desde el punto de vista económico como es normalmente realizado mediante las herramientas tradicionales del *Lean Manufacturing* y sí utilizando conceptos de sostenibilidad que son poco conocidos y aplicados en la práctica.

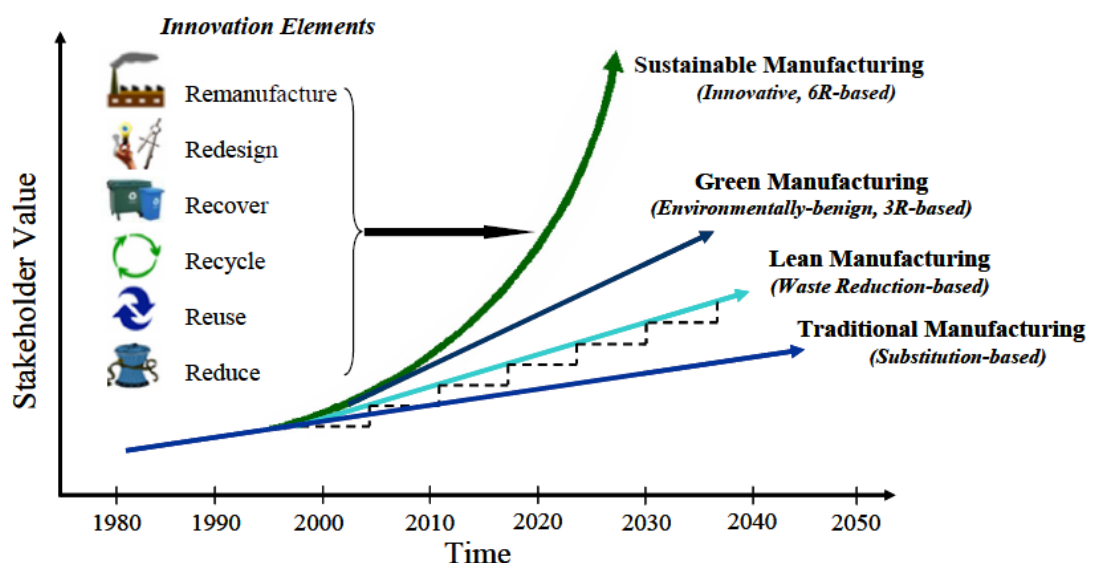
## 2 MANUFACTURA SOSTENIBLE

Para alcanzar la sostenibilidad en la manufactura es necesario adoptar una visión holística que abarque no solamente el producto y los procesos de manufactura necesarios para la fabricación, sino también a todos los sistemas de manufactura y cadena de suministros; también requiere un énfasis en el ciclo de vida total del producto considerando aspectos económicos, ambientales y sociales, denominados como “trípode de sostenibilidad” (Elkington, 1998).

Una estrategia que concentra la atención en todas las etapas del ciclo de vida del producto para promover la manufactura sostenible se fundamenta en el denominado “6Rs”: reducción, reúso, reciclaje, recuperación, reprojeto y remanufactura. La estrategia de los “6Rs” es una evolución del antiguo “3Rs” (reducir, reutilizar, reciclar) popularizados en la década de los años 90. Este nuevo abordaje hace énfasis en priorizar la recuperación de valor de los productos en el fin de su vida útil, realimentándolos en ciclos de vida subsecuentes para obtener un casi permanente flujo de material. Implementar un abordaje basado en 6Rs para impulsar la sostenibilidad en la manufactura también exige la innovación de productos, procesos y sistemas de manufactura para viabilizar el flujo de material en este lazo cerrado. El abordaje de la manufactura sostenible puede representar una mayor valorización de las partes interesadas (*stakeholders*), en contraste con el *Lean Manufacturing* que se fundamenta en la reducción de desperdicios o con la manufactura verde que se concentra en procesos ambientalmente benignos (Jawahir et al., 2006).

La figura 1 muestra la evolución de estas estrategias de manufactura a lo largo del tiempo y las tendencias futuras que evidencian la gran valorización de la manufactura sostenible.

Figura 1 – Evaluación de las estrategias de manufactura



Fuente: Jawahir et al., 2006

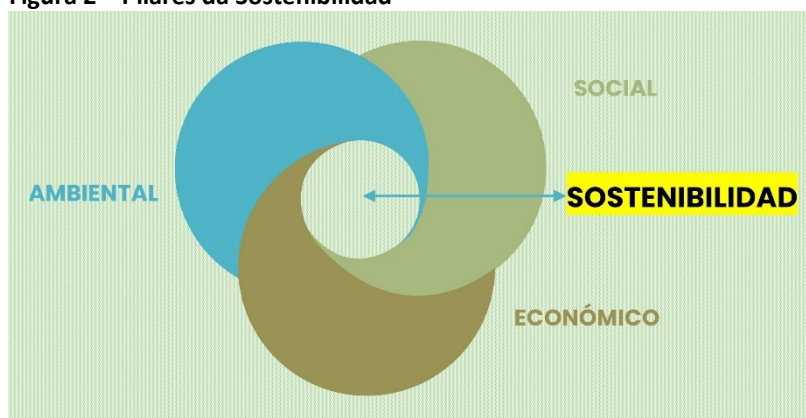
## 2.1 Pilares da Sustentabilidade

Según GHOLAMI et al. (2019), la innovación ha sido considerada como un prerequisite para el desarrollo de la sostenibilidad en los sistemas de manufactura. En este contexto, la concepción y desarrollo de alternativas estratégicas pueden naturalmente ser estimuladas por el análisis de las mejores prácticas y sus posibles adaptaciones que pueden satisfacer los requisitos del llamado *Triple Bottom Line*.

El concepto de la sostenibilidad está siendo adoptado por grandes empresas que entienden que la adopción de procesos sostenibles es fundamental y en este contexto, el *Triple Bottom Line* es el foco, en español, el término más usado es el “Trípode de Sostenibilidad o Pilares de la Sostenibilidad”, formado por las dimensiones ambiental, social y económica, como muestra la figura 2.

Los Pilares de la Sostenibilidad representan las perspectivas del planeta, de las personas y del lucro, es decir, una empresa debe orientar sus procesos considerando aspectos económicos, los impactos ambientales y la forma de relacionamiento con sus colaboradores.

**Figura 2 – Pilares da Sustentabilidade**



Fuente: Del autor

Según Braccini (2018 apud Silva e Scur, 2020, p.10), el pilar ambiental se refiere a la compatibilidad entre la tendencia del uso y la renovación de recursos naturales. Refiriéndose a las organizaciones, esta dimensión es identificada en los procesos que consumen fuentes de recursos naturales, o que generan emisiones que pueden ser absorbidas naturalmente por el ecosistema existente. Esta dimensión es alcanzada por medio del reciclaje y regeneración de recursos, reformulación del *layout* de procesos y productos para minimizar el uso de recursos naturales, resumidamente: adoptando modelos de economía circular.

Para Dyllick y Hockerts (2002 apud Silva e Scur, 2020, p.10), la dimensión social se refiere a un comportamiento de las organizaciones realizando la preservación y el desarrollo del capital humano y social de las comunidades. Estos autores consideran que la sostenibilidad social tiene como objetivo integrar aspectos como satisfacción en el trabajo, calidad de vida, integración social entre comunidades, solidaridad, igualdad y justicia en la distribución de bienes y servicios. Finalmente, la dimensión económica se refiere a la actitud organizacional para crear valor en la producción y equilibrar costos e ingresos, en la distribución de bienes y

servicios y se relaciona estrechamente con el desarrollo económico y financiero de las organizaciones.

## **2.2 Impactos de la Industria 4.0 sobre los pilares de la sostenibilidad**

Actualmente se habla bastante sobre las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 y de los lucros que las empresas pueden tener en términos de competitividad y eficiencia adoptando tales tecnologías, integrando máquinas, procesos y sistemas que se conecten y compartan datos usados en la busca de soluciones más eficientes. De esta manera la Industria 4.0 impacta de forma positiva sobre los tres pilares de la sostenibilidad como veremos a continuación.

### **2.2.1. Pilar Social**

- Mayor número de empleados en el área de servicios y en investigación y desarrollo
- Necesidad de trabajadores más calificados y el surgimiento de nuevas profesiones
- Mejores condiciones de trabajo, mayor grado de participación, satisfacción y menores niveles de estrés
- Reducción de trabajos altamente repetitivos y manuales
- Mayor grado de autonomía y flexibilidad favoreciendo el equilibrio entre trabajo y vida social
- Vida profesional con mayor horizonte de durabilidad
- Menor nivel de jerarquía dentro de las organizaciones
- Interacción entre humanos y robots colaborativos
- Ambiente de trabajo móvil
- Acciones de planeamiento más eficientes
- Mayor desarrollo de la creatividad y mejor desempeño de los trabajadores
- Proceso de toma de decisiones optimizado y de forma colaborativa entre personas y máquinas
- Mayor transparencia y previsibilidad en los procesos
- Menores índices de accidentes laborales.

### **2.2.2 Pilar Ambiental**

- Reducción del consumo de recursos naturales y materia prima
- Mejor eficiencia del uso de energía
- Menores índices de contaminación
- Menor degradación del medio ambiente
- Reducción de los índices de fallas y reprocesamiento
- Reducción de los costos con *setup*
- Respuesta más rápida delante de las demandas del mercado
- Plazos de entrega de productos más cortos

### **2.2.3 Pilar Económico**

*Revista Brasileira de Mecatrônica, São Caetano do Sul, SP, v. 4, n.3, p. 01-18, janeiro – março, 2022*

- Mayor inversión en investigación y desarrollo
- Aumento de competitividad
- Aumento de ventas en las empresas
- Aumento de flexibilidad en los negocios
- Nuevas oportunidades para pequeñas y medianas empresas y *startups*
- Apertura de nuevos sectores de clientes
- Creación de nuevos productos y aumento del portfolio
- Viabilidad de trabajar con pequeños lotes de producción
- Cadena de valor más colaborativa
- Producción de acuerdo con los requisitos individuales de los clientes
- Aumento del grado de satisfacción de los clientes
- Mayor integración del cliente con la cadena de valor

### 3 LEAN MANUFACTURING SOSTENIBLE

Diversos cuestionamientos fueron realizados sobre la utilización de prácticas Lean para catalizar las mejores estrategias para la manufactura sostenible. Fueron también realizados estudios para investigar el posible uso de herramientas *Lean* en sectores verdes. El objetivo es identificar pérdidas en un sistema de manufactura para prácticas de producción aplicando la filosofía *Lean* para el establecimiento de futuros planos de mejoras.

Según GHOLAMI et al. (2019), la fabricación de productos social y ambientalmente sostenibles exige técnicas de manufactura que están lejos del objetivo tradicional de minimizar costos y mejora de la eficiencia, en vez de esto, el énfasis debe ser sobre las implicaciones ambientales y sociales de las operaciones de fabricación de estos productos. La transición para una industria transformadora sostenible puede comenzar usando las técnicas ya existentes en el *Lean Manufacturing*, a partir de las cuales otros métodos pueden ser desarrollados.

#### 3.1 Herramienta *Lean* de Mapeo de Flujo de Valor (VSM)

Una de las herramientas fundamentales del *Lean Manufacturing* es el Mapeo de Flujo de Valor o *Value Stream Mapping* (VSM) que permite identificar los desperdicios a lo largo de todo el proceso de manufactura y mediante acciones de mejora continua ir eliminando o reduciendo tales desperdicios. La adaptación de esta herramienta para la manufactura verde y sostenible ha recibido mucha atención.

El flujo de valor es definido como todas las acciones o procesamiento necesarios para transformar la materia prima en producto acabado listo para ser entregado al cliente, sean estos procesos que agregan valor o que no agregan valor al producto. En el caso de proyectos, representan las fases del proyecto desde su concepción hasta el lanzamiento (Rother e Shook, 1999).

La metodología VSM convencional no lleva en consideración el desempeño ambiental y social, debido a que evalúa solamente el aspecto económico de una línea de fabricación, que cuantifica los tiempos utilizados en cada fase del procesamiento (tiempo de ciclo, tiempo de espera, tiempo de cambio de herramientas, etc.). Pero si se incorpora la capacidad de capturar el desempeño ambiental y social en el proceso de una forma visual por medio de la

representación gráfica del mapa flujo de valor (VSM), será posible aumentar su utilidad como una herramienta que puede ser utilizada para evaluar las operaciones de fabricación desde una perspectiva sostenible, herramienta que está siendo conocida como Sus-VSM.

GHOLAMI et al (2019) aplican la herramienta Sus-VSM (llamado por los autores como Socio-VSM) en un estudio de caso de un proceso de aplicación de un substrato para HDs (Discos Duros), consistiendo en la deposición de una capa de revestimiento de níquel-fósforo utilizando una reacción catalítica sin tener que pasar una corriente eléctrica a través de una solución acuosa. Los autores definieron las métricas referentes a los 3 pilares de la sostenibilidad usadas y obtuvieron conclusiones significativas sobre la eficacia de su aplicación.

En este trabajo el énfasis será dado al desarrollo de una metodología para elaborar un VSM sostenible, o Sus-VSM que permita una evaluación económica, ambiental y social de la sostenibilidad en un sistema de manufactura, al mismo tiempo se pretende examinar las métricas para evaluación del desempeño de la manufactura sostenible a ser incluidas en el Sus-VSM que puedan ser obtenidas por medio del análisis de los procesos de manufactura. Para alcanzar este objetivo, será explicada la metodología establecida por Faulkner y Badurdeen (2014) que es considerado un trabajo de referencia en el área.

### **3.2 Métricas para evaluar la manufactura sostenible**

Una serie de estructuras y procedimientos de medida fueron creados para permitir la evaluación de la sostenibilidad de un sistema de manufactura. La *Organization for Economic Cooperation and Development's* (OECD) elaboró un kit de herramientas que engloba la manufactura sostenible (OECD, 2011). Este kit de herramientas utiliza varios métodos, pero se concentra principalmente en el impacto sobre el medio ambiente de productos y procesos. Otra iniciativa reciente en los EUA del *National Institute for Standards and Technology* (NIST) también se concentra en el desarrollo de métricas para la manufactura sostenible (Feng et al., 2010).

#### **3.2.1 Métricas ambientales**

Diversas métricas pueden ser utilizadas para evaluar el desempeño de la manufactura considerando el pilar ambiental. Pusavec et al. (2010) enfocan la importancia del uso prudente de recursos naturales y no renovables para garantizar la sostenibilidad y enfatiza la necesidad de monitorear el uso de metales (con énfasis en el mecanizado), fluidos de corte, agua y energía para una producción sostenible.

Con base en este contexto, y siendo comunes para cualquier proceso de manufactura, las métricas a ser incluidas en el Sus-VSM serán:

- consumo de agua en el proceso;
- consumo de materia prima bruta;
- consumo de energía.

#### **Métrica del consumo de agua en el proceso:**

La métrica del consumo de agua en el proceso evalúa la cantidad de agua usada durante el proceso de fabricación y representa un aspecto importante que debe ser evaluado para mejora de la sostenibilidad ambiental. Por lo tanto, este consumo debe ser incluido como

una métrica en el Sus-VSM. Es importante aclarar que la cantidad de agua adicionada al producto (para elaborar un producto químico líquido) no debe ser incluida aquí, sino que debe ser considerada dentro de la utilización de recursos / materias en el Sus-VSM.

En el Sus-VSM debe ser registrada la cantidad de agua necesaria utilizada (según las especificaciones del proceso) y la cantidad de agua perdida en cada una de las etapas del proceso, usando una base volumétrica.

En la figura 3 se puede ver la representación del consumo de agua para cada proceso utilizando 3 columnas: cantidad requerida, usada y perdida. La columna de pérdidas (Net) representa el agua no reutilizada o no reciclada en otra fase del proceso dentro de la planta, considerada esencialmente perdida yendo para vías navegables o estaciones de tratamiento de aguas residuales municipales, *Waste Water Treatment Plant* (WWTP). Si una determinada línea de proceso tiene una WWTP interna y recicla agua de la instalación o de un proceso para otro, esta cantidad de agua no será incluida en la columna de pérdidas de la tabla para la elaboración del Sus-VSM. Adicionando esta métrica de tres columnas para la evaluación del consumo de agua para cada proceso en el Sus-VSM se consigue evaluar la eficacia y el potencial de mejoras en el uso del agua, como se puede apreciar en la misma figura.

Líquidos de refrigeración y aceites utilizados en el proceso de fabricación son causa de preocupaciones ambientales y pueden ser tratados en forma semejante en el Sus-VSM cuando sea relevante.

El consumo de agua del proceso es registrado visualmente en el Sus-VSM en una tabla como muestra la figura 3 y debe ser colocada debajo de la línea de tiempo (línea usada en un VSM convencional). La cantidad necesaria, la cantidad usada, y la cantidad perdida deben ser colocadas en cada fase del proceso. Finalmente, al lado derecho deben constar los valores totales considerando todo el proceso.

**Figura 3 - Representación visual del consumo de agua en el Sus-VSM**

| Process I |       |       | Process II |       |       | Process III |        |       | Total    |        |       |
|-----------|-------|-------|------------|-------|-------|-------------|--------|-------|----------|--------|-------|
| Required  | Used  | Net   | Required   | Used  | Net   | Required    | Used   | Net   | Required | Used   | Net   |
| 1 gal     | 1 gal | 1 gal | 3 gal      | 3 gal | 0 gal | 10 gal      | 12 gal | 5 gal | 14 gal   | 16 gal | 6 gal |

Fuente: Faulkner y Badurdeen (2014)

### **Métrica de utilización de materia prima:**

Según Sygulla et al. (2011), el consumo de energía y el uso de materias primas es responsable por aproximadamente 50% de los costos de fabricación. Muchas veces, la mayor cantidad de material perdido en un proceso de fabricación es generada en procesos de remoción de material (como en el mecanizado) y estos residuos posteriormente van para la chatarra. Delante de esta realidad, la alternativa más sostenible es el reciclaje de la chatarra. Al mismo tiempo, esta manipulación de los residuos también exigirá energía adicional y otros recursos que podrían igualmente ser considerados residuos. Por ese motivo, la métrica del uso de materia prima debe ser incluida en el Sus-VSM.

El propósito de monitorear la utilización de las materias primas no debe restringirse solamente a una evaluación de la cantidad de materia prima inicial utilizada, también debe contemplar la cantidad de material adicionado o removido en cada etapa del proceso.

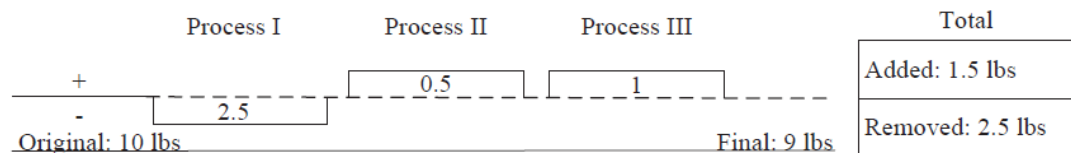
La métrica de utilización de materia prima será representada en el Sus-VSM usando una línea punteada para la masa inicial mientras que el material adicionado o removido durante el proceso será registrado arriba o debajo de la línea punteada respectivamente. Para



un determinado proceso, como el mecanizado por rectificación, la cantidad de material removido como viruta debe ser colocado debajo de la línea punteada y viceversa para un proceso aditivo, como podemos ver en la figura 4.

Para un proceso que no adiciona ni remueve material del producto, el uso da materia prima será representado por la línea punteada. Finalmente, el total de materia prima adicionada y removida debe ser indicada al lado derecho, como muestra la misma figura.

**Figura 4 - Representación visual del consumo de materia prima en el Sus-VSM**



Fuente: Faulkner y Badurdeen (2014)

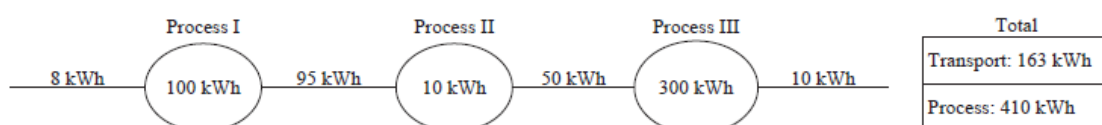
### Métrica del consumo de energía:

El consumo de energía tiene una relación directa con la sostenibilidad del medio ambiente debido a la utilización frecuente de recursos no renovables y emisiones de gases. Por lo tanto, el consumo de energía es una importante métrica que debe ser incluida en el Sus-VSM. Este consumo irá a identificar la cantidad de energía consumida por cada proceso, así como la energía consumida entre los procesos para efectuar el transporte y/o almacenamiento de la materia prima en proceso. Por otro lado, las pérdidas de energía de las máquinas, debido al calor generado y la pérdida de eficiencia, no serán consideradas para evitar el aumento de la complejidad para la elaboración del Sus-VSM.

El almacenamiento debe considerar cualquier energía necesaria para el acondicionamiento adecuado de la materia prima, como serían el uso de hornos de calentamiento o cámaras de resfriamiento para mantener un producto a una temperatura adecuada hasta ser transferido a la próxima operación.

Como mostrado en el Sus-VSM de la figura 5, la energía consumida durante el transporte y el almacenamiento debe ser colocado en una línea entre las elipses, mientras que la energía consumida durante el proceso debe ser colocada dentro de las elipses. Para evitar errores en la evaluación, debe ser adoptada una unidad de energía común en el Sus-VSM. Por ejemplo, si el volumen del gas natural usado para el almacenamiento especializado entre dos procesos es medido en miles de pies cúbicos (MCF) y la energía gastada en el transporte mediante montacargas a diésel es medida en kWh, todas las unidades deben ser convertidas en una unidad común, por ejemplo, kWh. Finalmente, los totales referentes a la energía usada en el transporte y almacenamiento del proceso entero deben ser indicados en la extremidad derecha, como muestra la misma figura.

**Figura 5 - Representación visual del consumo de energía en el Sus-VSM**



Fuente: Faulkner y Badurdeen (2014)

### 3.2.1 Métricas sociales

La sostenibilidad exige el análisis de impacto en el ambiente social considerando todas las partes interesadas (*stakeholders*) a lo largo de todas las fases de manufactura del producto. Debido al contexto de las actividades avaluadas mediante la aplicación del Sus-VSM, el aspecto que más influencia a los *stakeholders* son los recursos humanos utilizados. Para evaluar este aspecto, los riesgos a la salud y la seguridad de los trabajadores deben ser medidos y monitoreados regularmente.

Las métricas sociales propuestas son divididas en dos categorías: métricas para evaluar el trabajo físico y métricas para evaluar el ambiente de trabajo. Estas métricas sociales buscan evaluar las condiciones de trabajo y seguridad de los trabajadores y actuar como indicadores para una eventual necesidad de acción de mejora.

#### Métrica para el trabajo físico:

La métrica para evaluar el trabajo físico es introducida para captar y evidenciar la ergonomía del local de trabajo. Varias herramientas han sido usadas para evaluar varios aspectos del trabajo físico, como el *Rapid Entire Body Assessment* (REBA) (Hignett y Mcatamney, 2000), el *Rapid Upper Limb Assessment* (RULA) (Mcatamney y Corlett, 1993), y la del Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) (Waters et al., 1994). Todos estos métodos son muy pesados y exigen también informaciones detalladas que son difíciles de presentar en un Sus-VSM.

La intención con el uso de la métrica del trabajo físico en el Sus-VSM no es realizar una evaluación ergonómica amplia y sí identificar tareas que representen riesgo para ser tratadas en un análisis posterior. Por ese motivo, un abordaje simple sería más adecuado. El Índice de Carga Física o *Physical Load Index* (PLI), introducido por Hollman et al. (1999) es una medida simple determinada con base en las respuestas a un cuestionario y lleva en consideración la frecuencia de la ocurrencia, desde la clasificación “nunca” hasta “muy frecuentemente” en relación a las diferentes posiciones del cuerpo y de la manipulación de cargas.

Las posiciones del cuerpo (tronco, brazos y piernas), así como las cargas levantadas en una determinada posición del cuerpo son incluidas para generar un puntaje “PLI”, que varía de 0 a 56, usando una ecuación propuesta. El PLI representa un medio razonable de evaluar el trabajo físico y por este motivo, será utilizado en la propuesta del Sus-VSM.

El cuestionario y la fórmula computacional utilizada para obtener el PLI son mostrados en la tabla 1. El PLI debe ser evaluado para cada proceso y para las operaciones entre los diversos procesos. Debido a que algunos procesos pueden incluir varios operadores, es recomendable incluir los puntajes máximos (más críticos) y puntajes medios del PLI para cada proceso en el Sus-VSM.

Tabla 1 - cuestionario para obtener el 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:

$$\begin{aligned}
 \text{PLI} = & 0.974 \times T_2 \text{score} + 1.104 \times T_3 \text{score} + 0.068 \times T_4 \text{score} + 0.173 \times T_5 \text{score} \\
 & + 0.157 \times A_2 \text{score} + 0.314 \times A_3 \text{score} + 0.405 \times L_3 \text{score} + 0.152 \times L_4 \text{score} \\
 & + 0.152 \times L_5 \text{score} + 0.549 \times W_{u1} \text{score} + 1.098 \times W_{u2} \text{score} + 1.647 \\
 & \times W_{u3} \text{score} + 1.777 \times W_{i1} \text{score} + 2.416 \times W_{i2} \text{score} + 3.056 \times W_{i3} \text{score}.
 \end{aligned}$$

Fuente: Hollman et al. ,1999

### Métrica para el ambiente de trabajo:

La métrica para evaluar el ambiente de trabajo incluye cuatro categorías de riesgos debidos a:

- Sistemas eléctricos (E)
- Productos químicos peligrosos/Materiales Usados (H)
- Sistemas Presurizados (P)
- Alta Velocidad de los Componentes (S)

Además de esto, el nivel de ruido también debe ser incluido en esta métrica. Para cada potencial de riesgo debe ser atribuida una nota de 1 a 5, en función de la categoría de riesgo asociada a un determinado proceso con base en la probabilidad de ocurrencia y del nivel de impacto de ese riesgo, como muestra la Tabla 2.

**Tabla 2 - Descripción de la escala de riesgo en el ambiente de trabajo**

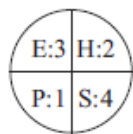
| Potential operator risk | Description                                                                                                                        |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| —                       | 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.                                                             |

Fuente: Faulkner y Badurdeen (2014)

Por ejemplo, en el caso que exista un riesgo potencial debido a la presencia de sistemas presurizados, la ocurrencia tendrá un bajo impacto (es decir, la ocurrencia de una lesión sería menor) y la probabilidad de ocurrencia sería baja. Por este motivo, el potencial de riesgo del operador debido al sistema presurizado (P) tendrá una métrica igual a 1.

La métrica del ambiente de trabajo será representada por un círculo dividido en 4 cuadrantes, un para cada categoría de riesgo. Este círculo mostrado en la figura 6 debe ser colocado encima de cada fase del proceso.

**Figura 6 - Símbolo utilizado para indicar la métrica del riesgo en el ambiente de trabajo**



Fuente: Faulkner y Badurdeen (2014)

Los niveles de ruido en un ambiente de manufactura representan otra fuente de riesgo a los operadores que es motivo de preocupación. Mientras que cualquier ruido arriba de 80 dB coloca al operador en riesgo, la duración de la exposición al nivel de ruido determina significativamente los efectos sobre el operador. Por ese motivo los niveles de exposición también necesitan ser registrados en el Sus-VSM para permitir un análisis de la salud de los operadores y su seguridad. La ecuación 1 indica como medir la dosis de ruido (D) pudiendo variar para un operador de 0 a 100% (OSHA, 2008).

$$D = \frac{\text{Tiempo y exposición al nivel de ruido}}{\text{Máximo tiempo permitido en el nivel de ruido}} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

Fuente: Adaptado de Osha (2008)

A partir de la dosis de ruido calculada en la ecuación, se puede medir el Tiempo Medio Ponderado (*Time Weighted Average*) TWA para registro de la exposición al ruido en dB, como muestra la ecuación 2. El TWA puede ser considerado como el nivel sonoro equivalente que produciría una dosis de ruido equivalente a estar expuesto a ese nivel sonoro durante un período continuo de 8h (OSHA, 2008).

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

Fuente: Adaptado de Osha (2008)

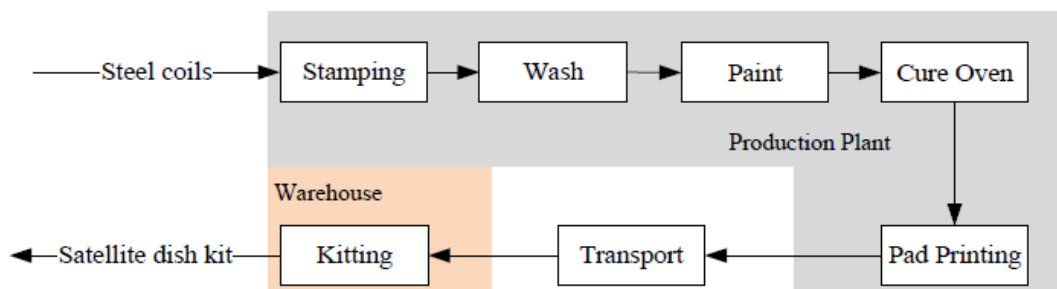
Usando el TWA calculado en la ecuación (2), el nivel de ruido puede ser medido en cada proceso y registrado en el recuadro del proceso en el Sus-VSM juntamente con el tiempo de ciclo, tiempo de *setup*, tiempo de operación e Índice de Carga Física (PLI). Las medidas calculadas en la parte superior representan los niveles de ruido reales en el ambiente de trabajo. Si los operadores utilizan algún tipo de equipo de protección individual (EPI) para atenuación del ruido, entonces la evaluación de la reducción del ruido (*noise reduction ratings*) NRR de esas emisiones puede ser utilizada para modificar el nivel de ruido mostrado en el Sus-VSM.

## 4 EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL SUS-VSM

### 4.1 Proyecto Piloto

Faulkner y Badurdeen (2014) ejecutaron un proyecto piloto de elaboración del Sus-VSM utilizando la metodología descrita anteriormente, en un fabricante de antenas parabólicas para televisión. Las fases del proceso de fabricación son mostradas en la figura 7.

Figura 7 - Flujo del proceso de manufactura de discos para parabólicas



Fuente: Faulkner y Badurdeen (2014)

El proceso de fabricación produce cerca de 20.000 parabólicas por mes. Las bobinas de acero que llegan a la empresa pasan por un proceso de estampaje según las especificaciones del proyecto hasta obtener su formato final en forma de disco. El disco de parabólica entonces pasa por un sistema de lavado en cinco etapas para remover residuos de aceite o impurezas generadas en el proceso de estampaje. Después del lavado, el disco entra en un horno para secar (que para efectos del Sus-VSM será considerado como un tipo de almacenamiento especial).

Después del proceso de secado, el disco pasa por un proceso de pintura, donde una tinta en polvo es aplicada y curada en un horno para permitir que la tinta se adhiera al disco. Los procesos de lavado, pintura y cura usan el mismo sistema de transporte. Finalmente, el disco es retirado del sistema de transporte luego del proceso de cura y son impresos emblemas especiales por el proceso de tampografía (proceso de impresión indirecta y en bajo relieve). Para equipar los discos con un kit y otros accesorios, los discos son transportados para otro edificio (almacén) antes de ser enviados a los clientes. El transporte entre procesos es realizado mediante montacargas, y para el transporte hasta el almacén se usan camiones.

### 4.2 Informaciones y métricas

Revista Brasileira de Mecatrônica, São Caetano do Sul, SP, v. 4, n.3, p. 01-18, janeiro – março, 2022

Las informaciones relacionadas a plazos de entrega del material, frecuencia de recibimiento del material y de entrega de productos, así como el flujo de informaciones dentro de la fábrica con los clientes y proveedores, fueron facilitados por el fabricante.

Las mediciones de los tiempos de ciclo fueron hechas directamente en cada proceso, en los casos que era inviable esta medición, los tiempos fueron calculados.

Para la colecta de datos del PLI, los operadores responsables de cada proceso y los operadores encargados del transporte de las piezas fueron convidados a rellenar el cuestionario presentado por Hollman et al. (1999). Los valores medios y máximos del PLI fueron seleccionados para ser mostrados en cada operación en el Sus-VSM.

La colecta de datos de niveles de ruido en cada fase da fabricación fue realizada por una empresa externa. Las informaciones necesarias para elaborar el círculo que contiene la métrica del ambiente de trabajo para cada proceso fueron facilitadas por el Gerente de Calidad.

La operación de pesaje de discos, además de ser realizada al inicio del proceso, ocurrió también después en los procesos de estampaje y cura en el horno para cuantificar la diferencia de la masa con relación al inicio del proceso. La masa adicionada durante el proceso de pintura por disco fue informada por el fabricante.

Debido a que la información a ser presentada en el Sus-VSM debe tomar como referencia un único disco, el consumo de energía y las métricas de consumo de agua a lo largo del proceso fueron calculados también tomando como base de cálculo la fabricación de 1 disco. La ecuación 3 sirve como una base conceptual para este cálculo, tanto para el consumo de energía como para el consumo de agua:

$$\text{Cantidad por disco} = \frac{\text{Energía total o flujo de agua en el proceso en el tiempo } t}{\text{Número total de discos en el sistema en el tiempo } t} \quad (3)$$

Fuente: Faulkner y Badurdeen (2014)

Con los datos sobre el flujo de agua (galones/s), consumo de energía (potencia nominal), tiempo de ciclo (s), y número de piezas en procesamiento en el tiempo (n), se puede entonces calcular la cantidad de agua utilizada y la energía consumida por disco utilizando la ecuación 4:

$$\text{Cantidad por disco} = \frac{\text{flujo} \times \text{Tiempo de ciclo}}{(2n-1)} \quad (4)$$

Fuente: Faulkner y Badurdeen (2014)

Utilizando la Ecuación (4) fue calculado el consumo de energía para los procesos de estampaje, lavado, cura en el horno e impresión (tampografía) así como en el secado antes del proceso de pintura. Algunos de estos procesos utilizan bombas, ventiladores y quemadores de gas natural, que consumen energía. La energía agregada y el flujo de energía fueron calculados, considerando la potencia nominal (kWh), velocidad (pies/s), distancia recorrida por los montacargas y camiones (pies), y el número de discos procesados por lote. De esta manera, el consumo de energía entre procesos fue calculado utilizando la ecuación 5:

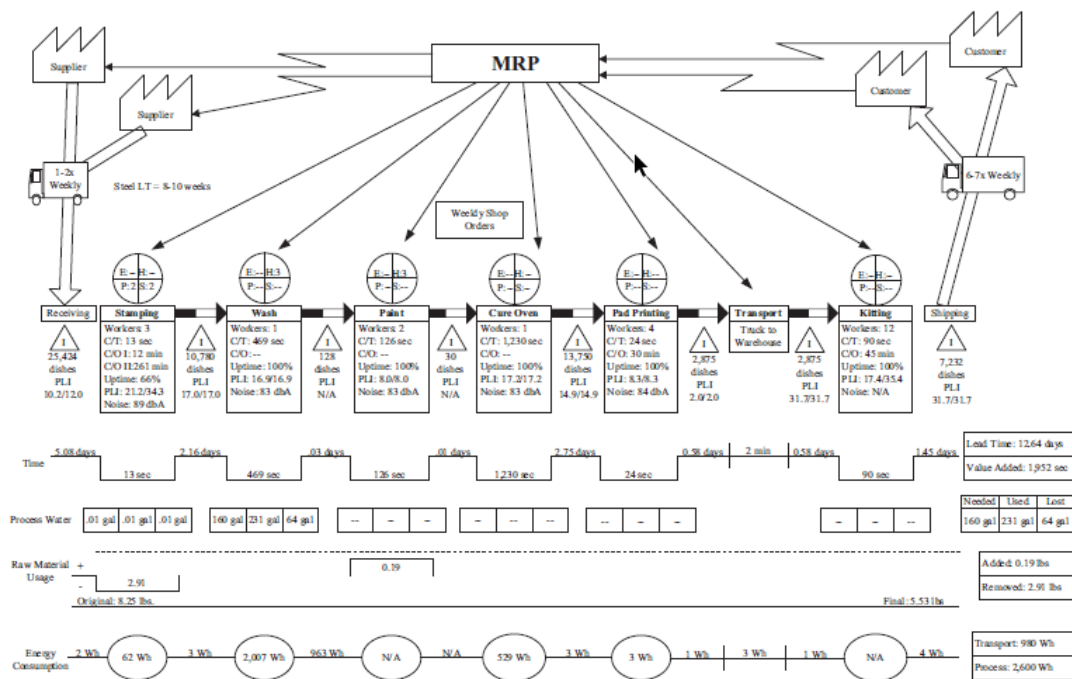
$$\text{Energía consumida por disco} = \frac{\text{Potencia} \times \text{Distancia recorrida}}{\text{Velocidad} \times \text{Número de Discos}} \quad (5)$$

Fuente: Faulkner y Badurdeen (2014)

### 4.3 Elaboración del Mapa Flujo de Valor Sostenible Sus-VSM

Con todas las informaciones sobre la línea de manufactura de antenas parabólicas y métricas realizadas directamente en el proceso, fue elaborado el Sus-VSM, como muestra la figura 8.

Figura 8 - Mapa flujo de valor sostenible del proceso de manufactura



Fuente: Faulkner y Badurdeen (2014)

### 4.4 Conclusiones de la aplicación del Sus-VSM

Como puede ser confirmado en el Sus-VSM, el Tiempo de Valor Agregado (que considera las operaciones que agregan valor) fue de 1952 s, aproximadamente 32 min, mientras que el Lead Time (tiempo que la materia prima pasa a lo largo de todas las fases del proceso) es superior a 12 días. Este resultado es una evidencia de la existencia de un tiempo excesivo gastado en actividades que no agregan valor al producto. Esas métricas pueden ser determinadas en un VSM convencional.

Lo que es más interesante es el desempeño de la sostenibilidad de la línea de producción como demostrado por medio de las nuevas métricas incluidas en el Sus-VSM. Con relación al consumo de energía, fue determinado que cada disco consume 2,6 kWh de energía en los diversos procesos y 0,98 kWh durante el transporte, lo que totaliza 3,58 kWh de energía por disco de parabólica. Una de las revelaciones más importantes para el fabricante fue el elevado consumo de energía gastada en el proceso de lavado: 2 kWh, equivalente a 56% del consumo total de energía en toda la línea de fabricación.

Los 64 galones de agua perdidos por disco también muestran oportunidades de mejora en el aspecto de sostenibilidad ambiental.

Por otro lado, los valores de los puntajes obtenidos en el Índice de Carga Física PLI (una de las métricas del trabajo físico), no fueron alarmantes en general: fue mayor en el proceso de montaje de kits debido a la naturaleza repetitiva de las operaciones necesarias.

También es importante destacar que cerca del 35% del material es perdido como chatarra en el proceso. Con relación a la métrica del riesgo en el ambiente de trabajo representado por un círculo, no fueron observadas áreas críticas y no se encontraron resultados preocupantes con relación al nivel sonoro.

El fabricante concluyó que el Sus-VSM es muy útil para captar visualmente el desempeño sostenible de la línea de producción de antenas parabólicas. La empresa también informó que no tenía conocimiento de valores de referencia para métricas semejantes en la industria. El consenso de la gestión empresarial fue que esta evaluación brindó informaciones no controladas anteriormente usando la metodología convencional del VSM y ayudó decisivamente a identificar áreas con potencial de mejoras.

## 5 CONSIDERACIONES FINALES

La manufactura sostenible representa el camino correcto a ser seguido por las industrias en todo el mundo, que deben tornar sus procesos más eficientes, menos perjudiciales al medio ambiente y con responsabilidad social. La disponibilidad de recursos naturales tiene un límite y su uso irracional aumenta los costos de fabricación y perjudica el medio ambiente. Por ese motivo el reciclaje de materias primas, reducción del consumo de energía y de las pérdidas en la utilización de agua en los procesos de manufactura es fundamental.

Este trabajo mostró una metodología para elaborar el Mapa de Flujo de Valor Sostenible, que es una extensión del tradicional Mapa de Flujo de Valor utilizado intensivamente en el *Lean Manufacturing*. Las métricas propuestas son viables de ser calculadas y monitoreadas, lo que facilita la aplicación de esta estrategia por los analistas de proceso para evaluar la manufactura considerando los 3 pilares de la sostenibilidad: económico, social y ambiental.

La aplicación de los conceptos sobre la manufactura sostenible y la implementación práctica de metodologías para elaborar el Mapa Flujo de Valor Sostenible Sus-VSM como la presentada en este trabajo, contribuirá no solamente con el aumento de la competitividad y eficiencia de la industria, sino que esta mejora sucederá dentro de un contexto sostenible, de respeto al medio ambiente y a los recursos humanos relacionados a los procesos productivos.



## REFERENCIAS

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 LOS AUTORES

*Revista Brasileira de Mecatrônica, São Caetano do Sul, SP, v. 4, n.3, p. 01-18, janeiro – março, 2022*

### **i JORGE ANTONIO GILES FERRER**



Doctor en Ingeniería Mecánica por la Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Master en Ingeniería Mecánica por la Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. Ingeniero Mecánico por la Pontificia Universidad Católica del Perú. Posee Licenciatura plena em pedagogia para la educación profesional, por la Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP. Actualmente es docente de la Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica em São Caetano do Sul SP, donde ministra disciplinas en el Curso Superior de Tecnología en Mecatrónica y en el MBA de Gestión de Proyectos Aplicados a la Innovación en Industria 4.0 (Lean Manufacturing y Virtualización de Sistemas Productivos). Es miembro del Banco de Evaluadores del Sistema Nacional de Evaluación de la Educación Superior del Ministerio de Educación del Brasil - MEC y Evaluador del Proyecto de Formación Profesional Dual en Mecatrónica de la Cámara de Comercio e Industria Brasil-Alemania.

### **ii HELMUTH OBILCNIK**



Administrador de Empresas por la Universidad de Pforzheim, Alemania, natural de Klagenfurt Austria. Realizó cursos de especialización en Finanzas y Controlling, Business Management, Global Leadership, entre otros. Inició su carrera profesional en Bosch Alemania en 1987 y actuó en diferentes áreas de la empresa como TI, Auditoría, Finanzas, Controlling y Administración. Trabajó en Bosch en diversos países como Alemania, Portugal, Argentina, Brasil, Panamá, Colombia y Perú. Fue Presidente de Bosch para la región norte de América Latina y General Manager de Bosch en Colombia, Perú, Ecuador, Panamá y Venezuela en el período 2011-2022. Tiene amplia experiencia en la apertura y desarrollo de mercados internacionales, reingeniería de procesos y reestructuración de empresas de diversos sectores. Paralelamente es Presidente de la Cámara de Comercio e Industria Colombia-Alemania (AHK Colombia) y Miembro del Consejo de las Cámaras Perú-Alemania (AHK Perú) y Ecuador-Alemania (AHK Ecuador).

### **iii NELSON WILSON PASCHOALINOTO**



Doctorando en Ingeniería Mecánica. Master en Ingeniería Mecánica con énfasis en Materiales y Procesos. Tiene posgrado en Ingeniería de Procesos Industriales - Instrumentación, Automatización y Control. Es graduado en Tecnología Mecánica en Procesos de Producción y Licenciatura Plena en Mecánica. Actualmente es Profesor del Instituto Mauá de Tecnología. Posee experiencia en el área de Ingeniería Mecánica, con énfasis en Procesos de Fabricación, CAD, CAE y en la Coordinación Pedagógica en la enseñanza técnica.

### **iv DANIEL OTÁVIO TAMBASCO BRUNO**



Doctorando y Master en Ingeniería de la Información por la Universidade Federal do ABC (2013). Especialista en Análisis, desarrollo de Sistemas y Banco de Datos por la Universidade de Ribeirão Preto (2007), Especialista en Educación a Distancia por la Universidade Paulista (2012). Bachiller en Análisis de Sistemas por la Universidade Paulista (2003). Actualmente es Técnico en Manufactura Digital y Profesor de la Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica Industrial. Tiene experiencia en el área de Inteligencia Artificial, Internet de las cosas, Gestión de Tecnología de la Información y Desarrollo de Sistemas de la Información.

<http://lattes.cnpq.br/3491851270517427>