

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

CLEDSON OLIVEIRA LANZILOTTI

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUTO E SERVIÇO APOIADO POR
TECNOLOGIAS HABILITADORAS DE INDÚSTRIA 4.0: ESTUDO DE CASO EM
PROCESSO DE USINAGEM.**

São Paulo

2022

CLEDSON OLIVEIRA LANZILOTTI

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUTO E SERVIÇO APOIADO POR
TECNOLOGIAS HABILITADORAS DE INDÚSTRIA 4.0: ESTUDO DE CASO EM
PROCESSO DE USINAGEM.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho - UNINOVE, como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Prof. Luiz Fernando Rodrigues Pinto, Dr - Orientador

São Paulo

2022

Lanzilotti, Cledson Oliveira.

Avaliação de sistemas de produto e serviço apoiado por tecnologias habilitadoras de indústria 4.0: Estudo de caso em processo de usinagem. / Cledson Oliveira Lanzilotti. 2022.

62 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2022.

Orientador (a): Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto.

1. Sistema de produto e serviço. 2. Economia circular. 3. Indústria 4.0. 4. Usinagem.

I. Pinto, Luiz Fernando Rodrigues. II. Título

CDU 658.5

CLEDSON OLIVEIRA LANZILOTTI

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUTO E SERVIÇO APOIADO POR
TECNOLOGIAS HABILITADORAS DE INDÚSTRIA 4.0: ESTUDO DE CASO EM
PROCESSO DE USINAGEM.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho - UNINOVE, como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Prof. Luiz Fernando Rodrigues Pinto, Dr - Orientador

São Paulo, 04 de março de 2022

Prof(a). Dr(a). Luiz Fernando Rodrigues Pinto (UNINOVE / PPGE) – Orientador

Prof(a). Dr(a). Andréa Cristina dos Santos (Universidade de Brasília – UnB) Membro externo

Prof(a). Dr(a). Walter Cardoso Sátyro (UNINOVE / PPGE) – Membro interno

RESUMO

Os modelos de gestão e serviços chamados *Product Service System* (PSS) aplicados em ambiente de fábrica vêm sendo disseminados e adotados pela indústria brasileira, mas ainda com muito potencial de expansão, visto a necessidade contínua por redução de custos, aumento de produtividade e a preocupação com questões ambientais, visando o crescimento sustentável do negócio. O objetivo geral deste estudo foi avaliar os ganhos econômicos, sociais e ambientais da implementação do PSS apoiado por tecnologias de Indústria 4.0 em processo de usinagem. Para isso, o trabalho apresenta um estudo de caso em uma empresa do setor automotivo que adotou o PSS no processo de usinagem de componentes de motor Diesel. A coleta de dados foi realizada por meio de observação do processo de manufatura, análise de documentos e entrevistas com gestores e técnicos de usinagem. Este método permitiu analisar as vantagens do PSS apoiado por tecnologias de I4.0 motivando o crescimento da economia circular. Os resultados indicaram que o PSS em usinagem é uma alternativa vantajosa para gerenciamento de ferramentas na indústria. O PSS reduziu em R\$6.030.400,00 por ano no custo operacional. Além disso, a reciclagem de 602 kg de metal duro por ano reduziu a extração de metal escassos na natureza. Com o avanço tecnológico houve ganhos na redução de riscos de lesão de operadores. A contribuição teórica desta pesquisa foi oferecer um trabalho ainda não encontrado na literatura sobre vantagens econômicas, ambientais e sociais de PSS em usinagem. Como contribuição para a prática corporativa, este estudo pretende estimular gestores industriais a buscar negócios de PSS que garantam o gerenciamento e fornecimento de ferramentas de corte para seus processos produtivos.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema de produto e serviço, Economia Circular, Indústria 4.0, Usinagem.

ABSTRACT

The management and service models called Product Service System (PSS) applied in a factory environment have been disseminated and adopted by the Brazilian industry, but still with a high potential for expansion, given the continuous need for cost reduction, increased productivity and the concern with environmental issues, aiming at the sustainable growth of the business. The general objective of this study was to evaluate the economic, social and environmental gains of implementing PSS supported by Industry 4.0 technologies in the machining process. For this, the work presents a case study in a company in the automotive sector that adopted PSS in the machining process of Diesel engine components. Data collection was performed through observation of the manufacturing process, document analysis and interviews with managers and machining technicians. This method allowed us to analyze the advantages of PSS supported by I4.0 technologies, motivating the growth of the circular economy. The results indicated that PSS in machining is an advantageous alternative for tool management in the industry. The PSS reduced operating cost by R\$6,030,400.00 per year. In addition, recycling 602 kg of cemented carbide per year has reduced the extraction of metal that is scarce in nature. With the technological advance, there were gains in reducing the risk of injury to operators. The theoretical contribution of this research was to offer a work not yet found in the literature on economic, environmental and social advantages of PSS in machining. As a contribution to corporate practice, this study aims to encourage industrial managers to seek PSS businesses that guarantee the management and supply of cutting tools for their production processes.

KEYWORD: Product Service System, Circular Economy, Industry 4.0, Machining

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fases da revolução industrial.....	19
Figura 2 - Bases acadêmicas consultadas.	37
Figura 3 - Fluxo de informação Prisma.....	37
Figura 4 - Filtro de seleção dos artigos.....	38
Figura 5 - Fluxo de compras para aquisição de ferramentas.....	41
Figura 6 - Fluxo de troca de ferramentas “antes do PSS”.....	43
Figura 7 - Preset manual com instrumento de medição altímetro.....	44
Figura 8 - Organograma da equipe de gerenciamento de ferramentas.	47
Figura 9 - Gravação dos dados da ferramenta no chip RFID.	48
Figura 10 - Etapas para requisição e ferramentas do estoque.	49
Figura 11 - Etapas para requisição e reposição de ferramentas.	50
Figura 12 - Representação do Circulante de ferramentas.	51
Figura 13 - Representação do circulante x usinagem.....	52
Figura 14 - Coletores de ferramentas	54
Figura 15 - Avaliação Ergonômica.....	55
Quadro 1 - Artigos selecionados na literatura.....	25
Quadro 2 - Grupo de palavras chaves.....	36
Gráfico 1 - Quantidade de publicações representadas Área/ Setor.....	22
Gráfico 2 - Quantidade de publicações representadas por ano.....	22
Gráfico 3 - Quantidade de publicações representadas por país.	23
Gráfico 4 - Quantidade de publicações representadas por tecnologias.....	23
Gráfico 5 - Quantidade de publicações representadas por Periódicos.	24
Gráfico 6 - Quantidade de publicações representadas por Metodologias.	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Custo por peça com ferramentas.....	46
Tabela 2 - Volume anual de peças x custo por peça.	46
Tabela 3 - Cálculo de vantagens econômicas do PSS.....	52
Tabela 4 – Cálculo de Payback	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BD: *Big Data*

CC: Computação em Nuvem

EC: Economia Circular

I4.0: Indústria 4.0

IoT: *Internet of Things* - Internet das Coisas

IS: Integração de Sistemas

MA: Manufatura Aditiva

MD: Metal Duro

MI: Máquinas Inteligentes

PSS: *Product Service System* - Sistema de Produto e Serviço

RA: Realidade Aumentada

RFID: *Radio Frequency Identification*

RV: Realidade Virtual

SI: Sistema Inteligentes

VM: *Vending Machining* – Máquina de Venda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA	15
1.3	OBJETIVOS.....	16
1.3.1	<i>Objetivo específico</i>	<i>16</i>
1.4	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	16
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	17
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1	REVISÃO BIBLIOMÉTRICA SOBRE I4.0 E PSS.....	21
2.2	REVISÃO SISTEMÁTICA	25
2.2.1	<i>Tecnologias de Indústria 4.0 e PSS em usinagem</i>	<i>27</i>
2.2.2	<i>Vantagens econômicas do PSS em usinagem.....</i>	<i>30</i>
2.2.3	<i>Vantagens sociais do PSS em usinagem</i>	<i>32</i>
3	METODOLOGIA DE PESQUISA	33
3.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	33
3.2	CARACTERÍSTICA DA PESQUISA.....	33
3.3	COLETA DE DADOS	34
3.4	ANÁLISE DE DADOS	34
4	ESTUDO DE CASO.....	39
4.1	APRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM – CONVENCIONAL ...	39
4.1.1	<i>Aquisição de ferramentas</i>	<i>40</i>
4.1.2	<i>Estoque.....</i>	<i>41</i>
4.1.3	<i>Ferramentas Circulantes (ferramentas reservas para trocas).....</i>	<i>42</i>
4.1.4	<i>Vulnerabilidade de falhas de qualidade</i>	<i>43</i>
4.2	IMPLANTAÇÃO DO PSS	44
4.2.1	<i>Preparação de ferramentas no PSS</i>	<i>47</i>
4.2.2	<i>Gerenciamento do estoque de ferramentas.....</i>	<i>49</i>
4.3	AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....	50
4.4	AVALIAÇÃO AMBIENTAL	53

4.5	AVALIAÇÃO SOCIAL.....	54
4.6	OPORTUNIDADES E AMEAÇAS DO PSS EM USINAGEM	55
5	DISCUSSÕES	57
6	CONCLUSÃO.....	59

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus por me proporcionar essa oportunidade de enriquecer meus conhecimentos, fazer novas amizades e conhecer Mestres, Doutores que contribuíram positivamente em diversos assuntos e também sobre o tema pesquisado.

Agradeço toda minha família, pelo apoio durante todo o período de estudos acadêmicos, em especial à minha esposa, que me ajudou, apoiou e me encorajou neste grande desafio e sonho. Sem ela, dificilmente teria chegado até aqui. Deus te abençoe por tudo Alexandra.

Agradeço à minha filha Giovanna que reside na Argentina, pela paciência, apoio e compreensão, que durante os últimos meses de mestrado esteve ao meu lado.

Agradeço ao meu orientador Professor Luiz Fernando pela paciência, tolerância, conselhos, orientações e a oportunidade de trabalharmos juntos. Com certeza foi um enorme aprendizado, rico de conhecimento.

Por final, agradeço a minha amiga Celina Kaji pela pronta disposição e ajuda na coleta de informações para elaboração deste trabalho.

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado a contextualização, a identificação do problema, perguntas de pesquisa, objetivos, justificativa e a estrutura da dissertação.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

No mercado globalizado, as indústrias do setor automotivo brasileiro têm encontrado grandes desafios para sustentar seus negócios de forma competitiva. Estes desafios têm mobilizado as empresas a buscarem avanços em produtividade, inovação, tecnologias e redução de custos.

Esses avanços, podem envolver adequações ou até mesmo mudanças nos equipamentos, recursos humanos, métodos de trabalho ou uma combinação destes, visando melhorias de qualidade do produto, produtividade, segurança, redução de custos e minimizar o impacto ambiental (CHARRO *et al.*, 2018).

Para a indústria de manufatura, a qualidade e produtividade estão fortemente relacionados à lucratividade e à segurança (YAO *et al.*, 2018).

O gerenciamento e controle dos processos são fatores que vem sendo explorado e melhorado a cada dia, porém, cada empresa tem a liberdade de adotar a melhor forma de gerenciamento utilizando recursos internos ou mesmo contratando externamente.

A pressão por redução de custos, qualidade e aumento de competitividade no mercado, tem despertado o interesse em contratações externas. Desta forma, os modelos de negócios do tipo *Product Service System* (PSS) aplicado ao ambiente de fábrica têm atraído consideravelmente a atenção das empresas durante a última década, vêm sendo disseminado e lentamente adotado pela indústria brasileira, mas ainda com muito potencial de expansão, visto a necessidade contínua por redução de custos, aumento de produtividade e a preocupação com questões ambientais, visando o crescimento sustentável do negócio (MEIER *et al.*, 2010).

De acordo com Aurich *et al.* (2010), uma forma de criar valor adicional nos mercados de negócios e se diferenciar dos concorrentes, é trabalhar no desenvolvimento de soluções integradas e personalizadas, combinando produtos e

serviços. A competitividade e aumento de lucro tem sido uma pressão constante para as indústrias, assim como a satisfação dos clientes (FARSI *et al.*, 2021).

Para Pontevedra *et al.* (2019), os modelos de negócios PSS que envolvem produtos físicos e respectivos serviços, estão intimamente interligados.

Desta forma, o PSS promove oportunidades positivas para obtenção de diversos ganhos para indústria (MEIER *et al.*, 2010).

No contexto da tecnologia de Integração de Informações Industriais, Chen (2016) realizou um estudo relatando que o monitoramento no processo de usinagem necessita de padrões de comunicações rápidos, fáceis e eficientes, neste estudo foi apresentado a implementação do *office* Ethernet, um sistema em rede e de baixo custo, como uma estrutura de transmissão de dados para monitorar o processo em uma indústria do setor aeroespacial.

Já Mourtzis *et al.* (2017), utilizaram a tecnologia de Realidade Aumentada (RA) aplicada ao chão de fábrica no setor de manutenção, e propuseram um PSS de monitoramento, baseado em algoritmos para geração automática de sequências de montagem, scripts de movimento das peças e interfaces melhoradas, visando maximizar a utilização do conhecimento existente, enquanto se criam instruções de RA. Além disso, o sistema de monitoramento proposto, foi suportado por uma rede de sensores sem fios (WSN) e implementado em um ambiente de nuvem com o apoio da tecnologia de RA.

No contexto de *Cloud Manufacturing* (CMfg), Charro *et al.* (2018) exploraram novas oportunidades de modelo de negócios com base na ideia de fornecer o CMfg como um tipo completamente novo de PSS. Com base no paradigma da computação em nuvem, os autores propuseram transferir uma rede de recursos de manufatura integrados verticalmente e / ou horizontalmente em recursos e serviços que podem ser gerenciados como um coletivo.

De acordo com Linder *et al.* (2017), o PSS é a aplicação potencial mais citada em práticas de modelos de negócios circulares, quando as empresas adotam um modelo de negócio PSS com o objetivo de alcançar a EC, os riscos financeiros são transferidos dos usuários para os fornecedores.

Nos modelos de negócios PSS, nos quais a função ou a utilização de um produto é vendida em vez do próprio produto, têm sido reconhecidos como um fator

capacitador do paradigma da Economia Circular (EC), (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2016).

Segundo Tukker (2015), o PSS é considerado eficaz para mover a sociedade em direção à EC garantindo a eficiência dos recursos.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

O PSS é um modelo de negócio que pode ser implementado pelas empresas a fim de apoiar a transição do modelo econômico linear para a EC. (REIGADO *et al.*, 2017). Diversos trabalhos apresentam iniciativas relacionadas a melhorias ecológicas, financeiras e monitoramento dentro dos processos de manufatura.

Uma análise aprofundada da literatura, revelou que de fato, há uma necessidade crescente de novos modelos de negócios em torno do setor da I4.0 (MARTINEZ *et al.*, 2010).

Martinez *et al.* (2010), abordaram a aplicação do PSS para o monitoramento de máquinas de usinagem através de sensores instalados, utilizando a tecnologia de *Cloud Manufacturing* para monitorar em tempo real a disponibilização de capacidade das máquinas e oferecê-las ao mercado de usinagem.

Mourtzis *et al.* (2017), apresentaram um estudo com aplicação do PSS de uma plataforma baseada em *Cloud Manufacturing* para manutenção preventiva de máquinas em um processo de usinagem, apoiadas por serviço de monitorização de chão da fábrica com aplicação da tecnologia de realidade aumentada (RA). Em função da manutenção ser realizada remotamente, os resultados obtidos foram, a redução de 54% no tempo de manutenção e 91% em custos.

De acordo com Charro *et al.* (2018) uma empresa pode ter o PSS orientado a Produtos e Serviços: Os produtos são produzidos e depois utilizados, enquanto os serviços são produzidos e usados simultaneamente. A propriedade do produto é transferível por meio da venda, porém, a propriedade do serviço é mais difícil de transferir com exceção do conhecimento.

Kerin *et al.* (2019) realizaram uma revisão da literatura abordando a utilização das tecnologias de Manufatura Aditiva (MA), Realidade Virtual e Internet das coisas aplicada aos processos de remanufatura, o objetivo foi apoiar práticas sustentáveis

em direção a EC, auxiliando na seleção de materiais relevantes e rastreabilidade dos produtos em uso.

Desta forma, não foram identificados na literatura artigos que tenham avaliado a implantação de PSS de ferramentas de corte como um modelo de negócio circular, apoiado por tecnologias de I4.0 em processo de usinagem no setor automotivo.

Sendo assim, essa lacuna sugere a seguinte questão de pesquisa: O PSS de ferramentas de corte apoiado por tecnologias de I4.0 é um modelo de negócio circular que oferece vantagens em processo de usinagem?

1.3 OBJETIVOS

Com intuito de obter a resposta da questão levantada, o objetivo geral deste estudo foi avaliar os ganhos econômicos, sociais e ambientais com a implantação do PSS de ferramentas de corte apoiado por tecnologias de I4.0 em processo de usinagem. O objetivo geral desta dissertação foi desdobrado em quatro objetivos específicos:

1.3.1 Objetivo específico

- Buscar na literatura artigos sobre PSS em manufatura;
- Identificar nos artigos selecionados as tecnologias de I4.0 empregadas;
- Realizar um estudo de caso em um processo de usinagem;
- Avaliar vantagens econômicas, ambientais e sociais obtidas com a implantação do PSS de ferramentas de corte apoiado por tecnologias de I4.0.

1.4 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A servitização de modelos de negócios PSS está provando ser uma proposta de valor vencedora para muitas empresas, pois é uma mistura distinta de soluções econômicas, sociais e ambientalmente sustentáveis, destinadas a atender e satisfazer as necessidades do cliente (ANNARELLI *et al.*, 2020).

A EC é um conceito em que o processo produtivo de recursos, promove readquirir e reintroduzir continuamente os ativos descartados após a conclusão de um ciclo de vida (POMPONI *et al.*, 2017).

A demanda crescente por materiais pode ameaçar as vendas no futuro, isso acontecerá devido a extração de recursos naturais, como minerais que são finitos e muitas reservas já estão limitadas (BRITISH GEOLOGICAL SOCIETY, 2015).

Muitas empresas de manufatura nas últimas décadas têm mostrado uma crescente consciência em mudar suas estratégias de negócios em direção a cadeias de criação de valor que maximizem a lucratividade, sustentabilidade e mantenham seus clientes fiéis. No contexto de EC, a integração de modelos de PSS faz com que as ofertas se estendam ao longo do ciclo de vida dos produtos (FARSI *et al.*, 2021).

Por meio da implantação do modelo de negócio PSS, as tecnologias de I4.0 como *Big Data*, RFID e *Cloud Computing* possibilitaram monitorar e coletar dados das ferramentas das máquinas, contribuindo para melhorar a gestão das ferramentas de corte no processo de usinagem.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está estruturado em 6 capítulos, conforme a seguinte descrição.

Capítulo 1 – Introdução, neste capítulo é apresentada a contextualização, a identificação do problema e perguntas de pesquisa, objetivos, a justificativa e a estrutura da dissertação.

Capítulo 2 – Revisão Bibliométrica e Sistemática da literatura

Capítulo 3 – Metodologia de pesquisa científica que explica os procedimentos e métodos adotados na realização deste trabalho.

Capítulo 4 – Estudo de caso, neste capítulo é apresentado o processo de usinagem convencional sem PSS, processo com a implementação do PSS, avaliação econômica, ambiental e social, vantagens e desvantagens.

Capítulo 5 – Discussões após tratamentos dos dados.

Capítulo 6 – Conclusões

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nos últimos anos, a engenharia de automação Industrial tem atraído muito a atenção do público de tecnologia da informação e comunicação (CHEN, 2016). Isso se dá, em função da necessidade de rápidas avaliações e precisão nas decisões.

O monitoramento dos processos de usinagem requerem padrões de comunicação rápido, fácil e eficiente (CHEN, 2016). A tecnologia facilita os processos da indústria fornecendo melhores diagnósticos, alertas antecipados para maior confiabilidade do processo, flexibilidade, simplificação e segurança pessoal (MAZUR, *et al.*, 2015). As tecnologias da I4.0 permitem serviços de monitoramento em tempo real e modelos de negócios PSS orientados à disponibilidade (KOLSCH *et al.*, 2017).

Os desenvolvimentos tecnológicos de I4.0 como o *Cloud Manufacturing* (CM), estão desafiando os modelos de negócios tradicionais, e sua adaptação é essencial para uma vantagem competitiva sustentável (CHARRO *et al.*, 2018). A indústria de manufatura está vivenciando a quarta revolução industrial com mudanças tecnológicas abrangentes, baseada na digitalização que afeta todas as atividades de negócios dentro e fora de uma empresa.

Ao longo do tempo, o setor de serviços vem ganhando mais importância, oferecendo novos empregos, aumentando o poder de compra e as fábricas adotando a terciarização do setor industrial por meio do PSS para manter sua competitividade e sobrevivência (MEIER *et al.*, 2010).

Ao longo da história, a indústria de manufatura sofreu grandes mudanças, categorizadas como revoluções industriais. A primeira revolução industrial, que ocorreu no século XVIII, foi uma mudança do trabalho predominantemente manual para a mecanização da produção, máquinas movidas a vapor, possibilitaram uma transição de extremo impacto de forma permanente a sociedade ocidental, gerando um crescimento sustentado nos padrões de vida das pessoas (CHARRO *et al.*, 2018).

A segunda revolução, conhecida como revolução tecnológica (século XX até a Primeira Guerra Mundial), houve a introdução da energia elétrica na fabricação, permitindo a produção em massa e a divisão do trabalho. A terceira (década de 1970),

conhecida como revolução digital, revolucionou o campo da eletrônica possibilitando a implementação da automação nos processos de produção. A velocidade de introdução da robótica nas linhas de produção aumentou drasticamente, a qualidade e a repetibilidade na produção dos produtos melhoraram significativamente, reduzindo os custos associados à mão-de-obra e resíduos (SACOMANO *et al.*, 2018). A figura 1 demonstra as fases da revolução.

Figura 1 - Fases da revolução industrial



Fonte: <https://engprocess.com.br/tag/quarta-revolucao-industrial>

A produção e o consumo sustentável, são tópicos de estratégia competitiva para as empresas transformadoras, uma vez que a sua aplicação pode ajudar os fabricantes a alcançar planos de desenvolvimento globais e reduzir a utilização de recursos naturais (ROY *et al.*, 2017).

Ishida *et al.* (2012), afirmaram que se o volume da produção industrial continuasse inalterado, os materiais e derivados de tungstênio globais seriam removidos do mundo inteiro em cerca de 40 anos. Portanto, a reciclagem do tungstênio a partir de resíduos está se tornando cada vez mais importante. Segundo dados de 2013 da *International Tungsten Industry Association* (ITIA), a taxa de reciclagem deste material na Europa e nos Estados Unidos foi de 50%, enquanto no Japão de 30%.

A manufatura sustentável faz parte do desenvolvimento sustentável, uma estrutura que tenta manter um equilíbrio dinâmico entre as preocupações humanas, financeiras e ambientais (LOREK *et al.*, 2014).

A diversificação de máquinas, permite uma gama mais ampla de recursos de

fabricação, baseando-se nas necessidades individuais das empresas (SOUSA *et al.*, 2014).

Desta forma, o termo Indústria 4.0 refere-se a sistemas integrados e avançados de fabricação, equipamentos que podem se comunicar em tempo real (ou com humanos) para analisar dados, prever falhas e se auto reconfigurar para atender os processos de manufatura (LIU *et al.*, 2019).

Alinhados com as tecnologias de I4.0 e modelos de PSS, está a economia circular, em que os processos produtivos de recursos, promovem readquirir e reintroduzir continuamente os ativos descartados após a conclusão de um ciclo de vida (POMPONI; MONCASTER, 2017). Um dos fatores mais importantes para práticas de fabricação sustentáveis em uma economia circular é a conscientização do cliente (MEIER *et al.*, 2010).

Ellen Macarthur Foundation (2015) propôs algumas definições para EC. Primeiro, a EC é definida como um modelo econômico global para reduzir o consumo de recursos finitos, focando no design inteligente de materiais, produtos e sistemas. Segundo, a Economia Circular visa uma abordagem mais ampla e completa superando o modelo de economia linear dominante, ou seja, um modelo tradicional de economia aberta desenvolvido sem tendência interna de reciclagem.

A reciclagem de metais duros e materiais de revestimentos feitos de metais nobres, são elementos importantes na EC, ambiental e na segurança do trabalhador (MATT *et al.*, 2019).

O crescimento e a estabilidade do modelo linear tradicional “produzir, consumir e descartar” depende muito da disponibilidade de recursos. No entanto, o modelo linear agora é desafiado por um aumento na demanda por suprimentos finito de recursos, pois a expectativa é que até 2030 tenha uma classe média com mais três bilhões de consumidores em todo o mundo (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2014). A demanda crescente por materiais pode ameaçar as vendas no futuro, isso devido a extração de recursos naturais, como minerais que são finitos e muitas reservas já estão limitadas (BRITISH GEOLOGICAL SOCIETY, 2015).

Com isso em mente, os modelos de negócios PSS voltado a EC estão chamando a atenção global como uma abordagem para dissociar o crescimento

econômico das restrições de recursos. O princípio subjacente da EC é tornar produtos e materiais restauradores e regenerativos por design e mantê-los em sua maior utilidade e valor (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017).

De acordo com Preston (2012) a EC é uma cadeia de valor em circuito fechado. Nas cadeias de valor de malha fechada, todos os resíduos são coletados pelos canais adequados e devolvidos à unidade de re-fabricação para reutilização. A EC garante os processos de fabricação sustentáveis e práticas ambientais sustentáveis por prevenção e redução de resíduos inerentes (FISCHER *et al.*, 2017).

2.1 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA SOBRE I4.0 e PSS.

Na fase de planejamento desta pesquisa, foram estabelecidos parâmetros para realizar a busca na literatura dos artigos publicados que abordaram o tema de PSS em ferramentas de corte com apoio de Tecnologias de I4.0 em usinagem. Desta forma, foram definidas as palavras-chave e suas cognatas, assim como as bases de busca e critério de seleção para a revisão sistemática.

As palavras selecionadas para busca de artigos foram Sistema de produto e serviço, Indústria 4.0 e suas tecnologias e usinagem e operações ao processo produtivo. A lista com todas as palavras estão descritas no capítulo de metodologia.

Na sequência, segue os resultados dos dados bibliométricos que estão relacionados aos 11 artigos selecionados e que estão alinhados com PSS, Tecnologias da Indústria 4.0 e Processos de Usinagem.

Os artigos selecionados estão concentrados em diferentes áreas de publicações: um estudo realizado no setor de manufatura, cinco estudos no setor de manutenção e cinco estudos no setor de usinagem. No gráfico 1 ilustra a distribuição das áreas.

Gráfico 1 - Quantidade de publicações representadas Área/ Setor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Não foi definido um período específico de para seleção dos artigos. O período de publicação dos artigos selecionados mostra que foi entre 2011 e 2020, tendo uma maior quantidade em 2017 e 2018. A pesquisa nas bases de dados foi realizada em novembro de 2020 e atualizada em outubro de 2021. A distribuição dos artigos por ano de publicação estão apresentadas no gráfico 2.

Gráfico 2 - Quantidade de publicações representadas por ano.

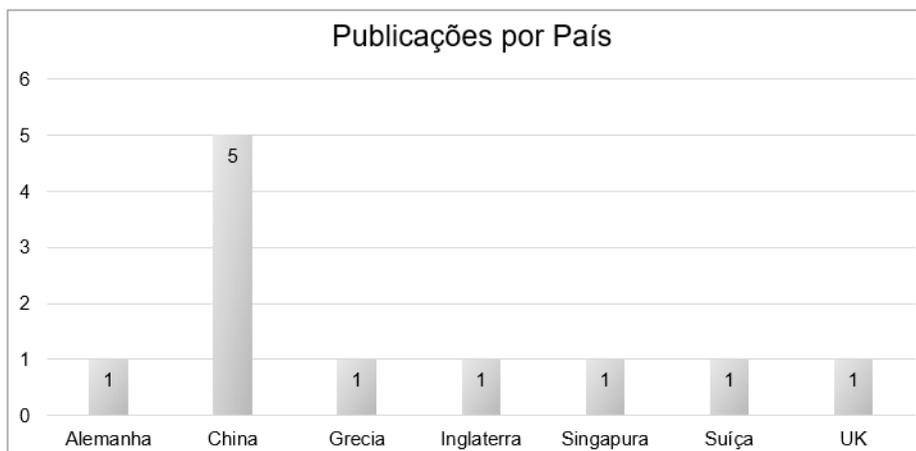


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na distribuição dos artigos selecionados por País de publicação, nota-se que existe uma maior concentração de artigos publicados na China. Provavelmente, isso

demonstra um maior interesse de estudos no assunto em relação aos outros países. No gráfico 3 ilustra a distribuição das publicações por país.

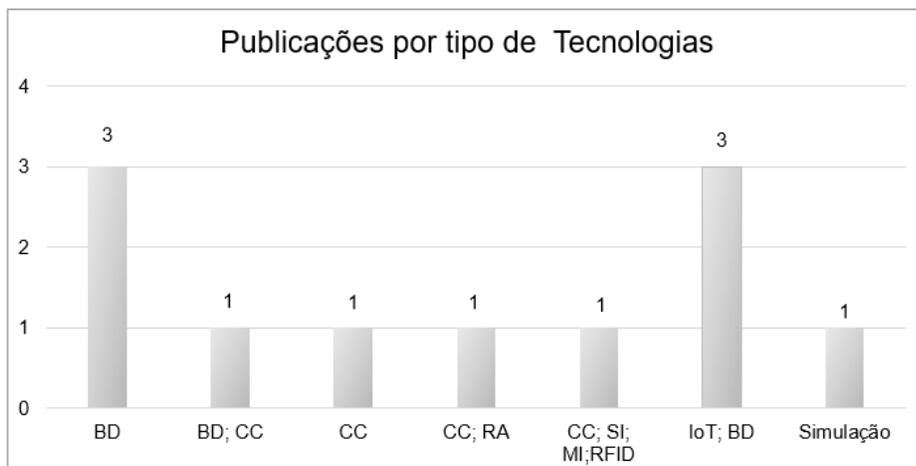
Gráfico 3 - Quantidade de publicações representadas por país.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os tipos de tecnologias com abordagem nos modelos de PSS são bem diversificados. Nos artigos selecionados, é notável uma maior aplicação da tecnologia BD (*Big data*) nos modelos de negócios, inclusive aplicado com outras tecnologias. No gráfico 4 ilustra a quantidade de publicações por tipos de tecnologias.

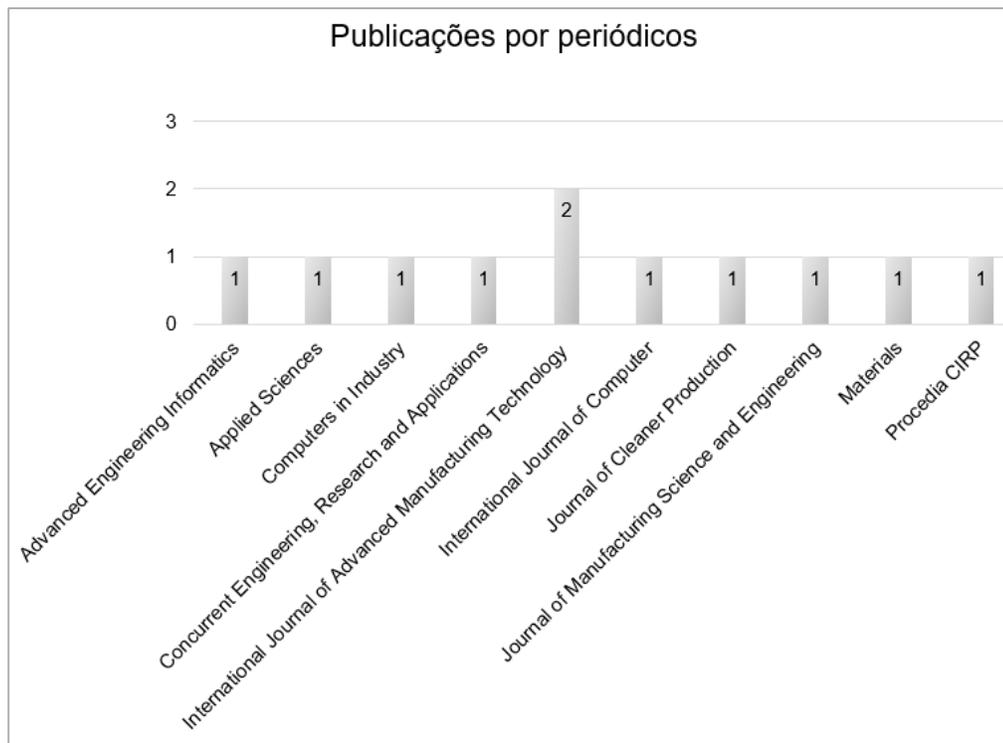
Gráfico 4 - Quantidade de publicações representadas por tecnologias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os periódicos que realizaram publicações com abordagem no PSS, Tecnologias da Indústria 4.0 e Processos de Usinagem estão bem pulverizados. Porém, conforme mostra no gráfico 6, o “*International Journal of Advanced Manufacturing Technology*” teve duas publicações. Isso pode ser justificado em função do escopo de publicações do periódico. No gráfico 5 ilustra as publicações dos periódicos dos artigos selecionados.

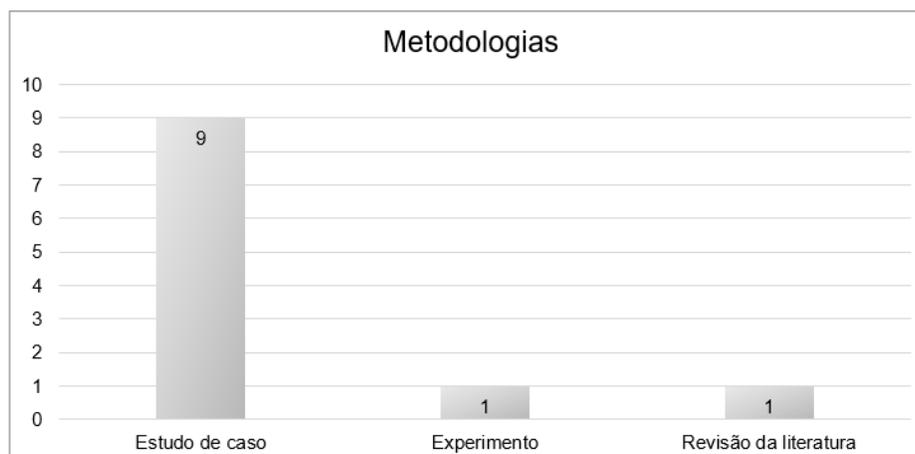
Gráfico 5 - Quantidade de publicações representadas por Periódicos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As metodologias mais utilizadas nos artigos selecionados foi o estudo de caso, é muito usual este tipo de metodologia quando o objetivo é explorar o tema. A forma de coleta de dados nos estudos de casos foi realizada dentro dos processos das empresas em situações reais do dia a dia. No gráfico 6 ilustra as publicações dos artigos selecionados por metodologias adotadas.

Gráfico 6 - Quantidade de publicações representadas por Metodologias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2 REVISÃO SISTEMÁTICA

A revisão sistemática dos artigos selecionados na literatura possibilitou a construção da base teórica desta dissertação. Nesta seção serão apresentados as tecnologias de I4.0 e tipo de abordagem PSS mencionadas nos artigos, vantagens econômica, ambiental e social obtidas por meio da adoção de práticas de economia circular. Os onze artigos selecionados na literatura estão apresentados no quadro 01:

Quadro 1 - Artigos selecionados na literatura

#	Autor	Ano	Título do artigo	Periódico	País	Tecnologia I4.0	Abordagem PSS
01	Mourtzis <i>et al.</i>	2017	Cloud-Based Augmented Reality Remote Maintenance Through Shop Floor Monitoring A Product-Service System Approach	Journal of Manufacturing Science and Engineering	Grecia	CC; RA	Manutenção
02	Wan <i>et al.</i>	2017	Process and knowledge management in a collaborative maintenance planning system for high value machine tools	Computers in Industry	China	BD	Manutenção

03	Charro <i>et al.</i>	2018	Cloud Manufacturing as a new type of Product Service System	International Journal of Computer	Inglaterra	CC	Manutenção
04	Ren <i>et al.</i>	2018	Comprehensive review of big data analytics throughout product lifecycle to support sustainable smart manufacturing A framework, challenges and future research directions	Journal of Cleaner Production	China	IoT; BD	Usinagem
05	Kolsch <i>et al.</i>	2017	A Novel Concept for the development of availability-Oriented Business Models	Procedia CIRP	Alemanha	BD; CC	Manufatura
06	Liu <i>et al.</i>	2019	Edge-cloud orchestration driven industrial smart product-service systems solution design based on CPS and IIoT	Advanced Engineering Informatics	China	IoT; BD	Usinagem
07	Yang <i>et al.</i>	2018	Opportunities for Industry 4.0 to Support Remanufacturing	Applied Sciences	Singapura	CC; SI; MI; RFID	Manutenção
08	Fotia <i>et al.</i>	2018	Product-service system (PSS) complexity metrics within mass customization and Industry 4.0 environment	International Journal of advanced manufacturing	UK	IoT; BD	Manutenção
09	Rizzo <i>et al.</i>	2020	The Critical Raw Materials in Cutting Tools for Machining Applications A Review	Materials	Suíça	Simulação	Usinagem
10	Zhu <i>et al.</i>	2011	Implementing an industrial product-service system for CNC machine tool	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	China	BD	Usinagem
11	Sun <i>et al.</i>	2016	Cutting-tool delivery method in the context of industrial product service systems	Concurrent Engineering, Research and Applications	China	BD	Usinagem

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise aprofundada dos artigos listados no quadro 01 será apresentada nas próximas seções.

2.2.1 Tecnologias de Indústria 4.0 e PSS em usinagem

As tecnologias de I4.0 associadas aos modelos de negócios PSS e Processos de Usinagem, são bem diversificadas nos artigos pesquisados.

As tecnologias IoT e RFID permitem que as empresas colem uma grande quantidade de dados, ambas referem-se a implementação de sensores em máquinas e dispositivos, capacitando-os de forma a se comunicarem e se tornarem participantes ativos em uma rede de informações (BRESSANELLI *et al.*, 2018).

A tecnologia RFID associada a tecnologia de IoT, foram utilizadas para obtenção de informações em um ambiente de rede, controlando os níveis de estoque de matéria-prima (CHARRO *et al.*, 2018). Também, aplicado para verificação da disponibilidade de recursos em um remanufaturador de motores, para dar suporte ao agendamento da produção em tempo real (KERIN *et al.*, 2019). Incorporados à fábrica, permitiu que as máquinas colaborassem umas com as outras usando uma análise inteligente (YANG *et al.*, 2018) em um sistema de execução de manufatura, habilitado para identificação por radiofrequência por (LIU *et al.*, 2019).

A tecnologia *Big data* é definida como um maior conjunto de dados complexos que chegam em velocidades crescentes cada vez maior, sua análise não pode ser realizada por métodos tradicionais e necessitam de ferramentas especiais e preparadas para lidar e analisar com grandes volumes de dados (REN *et al.*, 2018).

As tecnologias de IoT e *Big data* foram aplicadas em um processo de produção para coleta de dados e ideia de servitização onipresente para avaliar o ciclo de vida do produto, permitindo que possa ser usado como uma diretriz para selecionar os estágios do ciclo de vida relevantes que impactam a produção sustentável (REN *et al.*, 2018), também, utilizado nas máquinas de usinagem de fresamento para o monitoramento em tempo real das vibrações dos equipamentos, sinalizando ao operador o momento da parada preventiva do equipamento para evitar danos (LIU *et al.*, 2019).

Com abordagem na redução de energia, o monitoramento das emissões industriais e dados do ciclo de vida do produto apoiado pela tecnologia IoT, melhora a eficiência da reciclagem no processo de fresamento na usinagem (REN *et al.*, 2018).

O termo computação em nuvem foi introduzido em 2010 por Li *et al.* (2010) e posteriormente adaptado e interpretado de várias maneiras por outros autores. É uma tecnologia de I4.0 baseada na internet que permite o acesso de redes onipresentes sob demanda de computação, armazenamento de dados e aplicações em ambiente compartilhado de maneira integrada, como software, máquinas, equipamentos e recursos de fabricação que podem ser rapidamente configurados e liberados com o mínimo esforço de gerenciamento ou interação do provedor de serviços (CHARRO *et al.*, 2018).

As tecnologias de IoT e CC foram aplicadas em um processo de usinagem a laser, para avaliação do fornecimento do PSS por meio do monitoramento remoto, serviços de nuvem e conexão de rede privada virtual que recebem os dados, analisam e em seguida fornecem um resumo e uma visão de recomendação aos clientes (FOTIA *et al.*, 2018).

De acordo com Fotia *et al.* (2018), a implementação de um modelo de PSS em um processo de fabricação flexível em uma empresa fabricante de chapas metálicas de máquinas a laser permitiu por meio de um sistema, a personalização das máquinas para os produtos e monitoramento da saúde dos equipamentos utilizando sensores para detecção de vibrações e verificação das necessidades de manutenção urgentes e não urgentes das máquinas.

Em uma aplicação da tecnologia de computação em nuvem, foi proposto um serviço de usinagem utilizando uma plataforma para gerenciamento de máquinas, onde uma empresa compra os equipamentos de fabricação e os instala em fábricas hospedeiras, e com o uso de sensores embutidos nas máquinas, a plataforma permite verificar a disponibilidade das máquinas para locação de usinagem (CHARRO *et al.*, 2018).

Outro modelo de negócio PSS aplicado por Charro *et al.* (2018) foi a ideia de fornecer um ambiente de computação em nuvem como um tipo completamente novo de PSS, com alvo no setor de fabricação geral e pagamento de acordo com o uso. Este modelo de PSS foi implementado em um processo de chão fábrica para monitoramento avançado, a fim de detectar facilmente avarias das máquinas-ferramentas antes da ocorrência (MOURTZIS *et al.*, 2017). Impulsionado pela

colaboração da computação de borda e da computação em nuvem, baseado em sistemas cyber físicos e internet das coisas (LIU *et al.*, 2019).

Uma plataforma baseada na tecnologia de computação em nuvem foi aplicada em um ambiente de produção utilizando um modelo de PSS para manutenção de máquinas, por meio de um sistema de monitorização RA suportado por uma rede de sensores sem fio, capaz de identificar o estado das máquinas ferramentas, tempo restante de funcionamento entre falhas, bem como as janelas disponíveis onde a manutenção possa ser efetuada (MOURTZIS *et al.*, 2017). O serviço de manutenção por meio da tecnologia da RA, consiste em algoritmos com geração automática de sequências de montagem, scripts de movimento das peças e interface melhorada que visam maximizar a utilização do conhecimento existente.

Os autores (YANG *et al.*, 2018) realizaram um trabalho onde o conjunto de tecnologias de computação em nuvem, simulação e máquinas inteligentes, foram aplicados no ambiente de produção por meio da instalação de diversos sensores de monitoramento em uma máquina de controle numérico computadorizado (CNC). O monitoramento foi feito durante o processo de usinagem e os dados capturados em tempo real e armazenados em nuvem para manutenção preventiva da máquina, os parâmetros dos alarmes foram definidos por meio de simulação das falhas. O serviço de monitoramento permitiu reduzir o tempo de inatividade das máquinas, resultando em um aumento da disponibilidade dos equipamentos (KOLSCH *et al.*, 2017).

A tecnologia de simulação consiste na utilização de técnicas matemáticas que são amplamente adotadas por diversos setores da indústria com o objetivo de imitar o funcionamento de uma operação ou processo, otimização de desempenho, segurança e testes (FARSI *et al.*, 2021).

A tecnologia de simulação, foi aplicada no desenvolvimento de ferramentas de corte com foco em sustentabilidade e redução da utilização de recursos naturais de materiais nobres e críticos, como o carboneto cimentado e tungstênio que possuem vida útil finita, populares na utilização nos processos de usinagem e aplicado nas ferramentas de cortes (RIZZO *et al.*, 2020).

Wan *et al.* (2017) investigaram as relações entre diferentes partes interessadas no ciclo de vida de máquinas-ferramenta para desenvolver um sistema colaborativo de planejamento de manutenção de máquinas-ferramenta baseada na web e

suportada por tecnologias de I4.0.

Sun *et al.* (2016) desenvolveram um modelo de PSS com apoio da tecnologia BD para melhora do processo logístico e operacional, por meio de um modelo de PSS de ferramentas de corte, baseado na previsão de demanda e tempo de entrega just-in-time das ferramentas.

De acordo com Kolsch *et al.* (2017), o PSS pode ser oferecido por meio de diferentes modelos de negócios, um novo conceito para desenvolver modelos de negócios orientados à disponibilidade, que considera a elicitação de requisitos para o desenvolvimento técnico de componentes de máquinas.

A primeira etapa do modelo de negócio PSS é a documentação dos requisitos elicitados para desenvolvimento técnico, gerando um adequado modelo de especificação dividido em duas partes. Na primeira parte, os requisitos essenciais para o desenvolvimento do serviço e na segunda parte os requisitos técnicos, quanto a tecnologia de sensores, tecnologias de nuvem e análise de *big data*, são necessárias para extrair dados relevantes das máquinas, analisar e finalmente calcular a disponibilidade (KOLSCH *et al.*, 2017).

Zhu *et al.* (2011) também desenvolveram um modelo de PSS com apoio da tecnologia BD para criação de um framework de PSS de máquinas CNC, hardware e software, baseado em disponibilização e melhoria de capacidade em processo de usinagem.

2.2.2 Vantagens econômicas do PSS em usinagem

Para Mourtzis *et al.* (2017), os ganhos econômicos com a implantação de um PSS por meio de um sistema de plataforma com tecnologia RA para monitorização do estado real das máquinas-ferramentas em um processo de produção, demonstrou ganhos no tempo de manutenção global reduzido em 54%, o custo total de manutenção reduzido em 91%. Uma vez que as manutenções são feitas remotamente e a usabilidade global das máquinas aumentaram 40%, os benefícios foram menor tempo de resposta na análise dos dados, maior conectividade e melhor ciclo de manutenção dos equipamentos.

Devido ao grande potencial de detecção de dados, a tecnologia *IoT* foi utilizada para monitorar dados do ciclo de vida do produto, consumo de energia, melhorar a eficiência da reciclagem, taxas de reutilização dos produtos, assim, o autor conclui que a implementação das tecnologias *IoT* pode melhorar a eficiência operacional de remanufatura em pelo menos 30% (REN *et al.*, 2018).

Para Rizzo *et al.* (2020) o desenvolvimento de novos materiais com características superiores ou melhor desempenho do que os materiais existentes é desejável para levar a uma vida útil mais longa do produto e, portanto, reduzir o custo do produto.

O modelo PSS de ferramenta de corte proposto por Sun *et al.* (2016) foi orientado para prever a demanda e entrega just-in-time de ferramentas. Portanto, esta proposta tem analisado conjuntamente três aspectos: a seleção da ferramenta de corte, a previsão de demanda e a entrega da ferramenta de corte. Os resultados mostraram que a terceirização da gestão de ferramentas de corte, reduz os custos operacionais e melhora a produtividade.

Zhu *et al.* (2011) apresentaram um framework PSS de máquinas CNC, hardware e software, baseado na capacidade de usinagem e melhoria contínua. A estrutura introduzida, alterou o papel dos fornecedores de máquinas-ferramenta para fornecedores de capacidade de usinagem, envolvendo operação, reparo e manutenção da máquina. O negócio inovador, ainda não familiar às empresas deste segmento, aliado à falta de proteção da propriedade intelectual tecnológica, foram barreiras para a implementação do PSS proposto pelo estudo.

Wan *et al.* (2017) investigaram os relacionamentos entre diferentes stakeholders no ciclo de vida de máquinas ferramenta para propor um sistema de planejamento de manutenção colaborativa de máquina-ferramenta no modelo de PSS. O compartilhamento de informações apoiado pela tecnologia BD, permitiu o planejamento de produção e condições de máquina entre usuário e fabricante da máquina-ferramenta, que é o provedor do PSS, também possibilitou o planejamento de manutenção e otimizou atividades de compra de peças de reparo e agendamento dos serviços.

2.2.3 Vantagens sociais do PSS em usinagem

Wan *et al.* (2017) desenvolveram uma plataforma para o desenvolvimento de um sistema de planejamento de manutenção e serviço colaborativo para máquinas-ferramentas com foco em processos e gestão do conhecimento das pessoas, esse trabalho tem melhorado o envolvimento e nivelamento de conhecimentos entre as partes interessadas dentro e fora da organização.

Sun *et al.* (2016) apresentaram um modelo de PSS para serviços de ferramentas de corte e identificação de ganhos de produtividade no processo de usinagem. Os benefícios foram o cálculo automático da demanda de ferramentas de corte para o dia seguinte no processo de usinagem, serviço técnico, compartilhamento da responsabilidade do serviço e gerenciamento das ferramentas.

Zhu *et al.* (2011) apresentaram um framework de modelo PSS para máquinas CNC baseado na capacidade das máquinas e melhoria contínua, este framework demonstrou benefícios sociais para os colaboradores otimizando o processo de trabalho apoiado pela tecnologia BD.

Os autores Rizzo *et al.* (2020) realizaram um estudo de aplicação do *machining learning* apoiado pela tecnologia BD e inteligência artificial, estas tecnologias permitiram a redução de intervenção humana em função do aprendizado automático das máquinas com a extração automática de dados e aprendizado com o banco de dados pré-existentes com rapidez e precisão.

Já Mourtzis *et al.* (2017), apresentaram um estudo com aplicação do PSS para monitoramento e manutenção preventiva de máquinas de usinagem, baseada em uma plataforma em *Cloud Manufacturing*. Eles recebem os dados, analisam, e em seguida, fornece um resumo e visão de recomendação para os clientes. Os benefícios para a empresa são, menor tempo de resposta comparado ao processo de execução manual, visão geral de todas as máquinas, conectividade e manutenção aprimorada. Todos os dados das máquinas, bem como todos os problemas relatados ou soluções relacionadas podem ser armazenados e recuperados de maneira fácil e rápida para serem reutilizados.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

As informações obtidas na literatura foram a base teórica para a realização deste trabalho de pesquisa. O método utilizado nesta pesquisa foi um estudo de caso conduzido em uma indústria de motores Diesel. O estudo de caso possibilita uma visão geral do sistema, o que destaca seu caráter empírico na investigação do processo (YIN, 2017). Estudo de caso tem se revelado uma poderosa metodologia de pesquisa em gestão de operações (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002), com significativas contribuições para a teoria e a prática organizacional (BARRATT; CHOI; LI, 2011).

O desenvolvimento desta pesquisa consistiu em 4 etapas: Definição do problema; característica da pesquisa; coleta de dados e análise de dados.

3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A definição de um problema de pesquisa é o processo comum de iniciar uma investigação. O problema de pesquisa é o ponto de partida para as seguintes atividades de pesquisa (YIN, 2017). A questão de pesquisa deve ser definida em uma estrutura precisa, consistente e evidente, a fim de apresentar uma noção clara do objetivo. A questão de pesquisa deve ser realista, para que possivelmente possa ser exequível e pertinente, abordando assuntos já explorados sobre o tema principal e buscando mudanças substanciadas em decorrência de novos estudos sobre ele. A partir de um problema definido de forma objetiva e específica, é possível orientar a pesquisa, permitindo uma investigação sobre temas teóricos e relevantes. O problema de pesquisa apresentado na introdução deste artigo é resultado da seguinte pergunta original: O PSS de ferramentas de corte apoiado por tecnologias de I4.0 é um modelo de negócio circular que oferece vantagens em processo de usinagem?

3.2 CARACTERÍSTICA DA PESQUISA

Essa pesquisa tem como objetivo exploratório com abordagem quantitativa e qualitativa, mostrar potenciais ganhos econômicos, ambientais e sociais do PSS com o uso de tecnologias 4.0. Estudo exploratório é um passo inicial para entender um fenômeno, quando o assunto não permite conclusões definitivas (YIN, 2017).

3.3 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada por meio de observação do processo de manufatura, análise de documentos e entrevistas com gestores e técnicos de usinagem. As principais documentações analisadas foram base dados de ferramentas, relatórios operacionais e indicadores de performance. Este procedimento permitiu avaliar o PSS de ferramentas de corte apoiado por tecnologias de I4.0 em processo de usinagem. A avaliação econômica foi realizada com base nas informações fornecidas pelo fornecedor de ferramentas. Para a avaliação ambiental foi aplicado o método de balanço de massa dos resíduos de materiais destinados a reciclagem. Já a avaliação social, foi um ganho decorrente da implantação do PSS e com a utilização um software de cálculos ergonômicos, foi possível mensurar a condição de trabalho do colaborador antes e depois do PSS implementado.

3.4 ANÁLISE DE DADOS

A análise dos dados é uma verificação empírica que oferece outros elementos ou relações inicialmente negligenciadas. Além disso, proporciona uma interpretação de novos fatos e uma revisão de hipóteses iniciais, buscando a proposição de novos estudos e pesquisas. Nesta pesquisa, a análise de dados avaliou os ganhos obtidos com a implementação do PSS de ferramentas de corte apoiado por tecnologias de I4.0 em processo de usinagem, abrangendo as dimensões econômica, ambiental e social.

O estudo de caso facilitou a compreensão do assunto na prática, o que possibilitou a análise crítica da teoria pesquisada e tem mostrado contribuições significativas na área de gestão de operações (MOURTZIS *et al.*, 2017).

A metodologia da pesquisa foi dividida em 2 partes. Inicialmente foi realizado a pesquisa bibliográfica, na qual foram buscados artigos a fim de obter referências sobre o tema do PSS apoiado por tecnologias de I4.0 e em seguida a revisão sistemática da literatura. A busca de artigos científicos, foi realizada nas seguintes bases acadêmicas:

As palavras-chave utilizadas para a busca foram:

- Idioma Português: Sistema de Produto e Serviço, Economia Circular, Industria 4.0, Internet das coisas, Computação nas nuvens, Big data, Segurança cibernética, Simulação, 3D, Realidade aumentada, RFID, Robôs, Manufatura Aditiva, Usinagem, Furação, Mandrilamento, Fresamento, Ferramentas de Metal duro, Ferramentas de corte metal duro.
- Idioma Inglês: Product service system, Circular Economy, Industry 4.0, Internet of Things, Cloud computing, Big data, Cybersecurity, Simulation, 3D, Augmented Reality, RFID, Robots, Additive Manufacturing, Machining, Drilling, Boring, Milling, Carbide tools.
- As palavras foram divididas em 3 grupos deram origem a 132 combinações. O quadro 2 mostra as palavras utilizadas nas combinações.

Quadro 2 - Grupo de palavras chaves

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Sistema de produto e serviço PSS Product service system Economia Circular Circular Economy	Industria 4.0 Internet das Coisas Computação nas nuvens Integração de Sistemas Big data Segurança Cibernética Simulação 3D Realidade Aumentada Identificação por radio frequencia Robôs Manufatura Aditiva Industry 4.0 Internet of Things Cloud computing System integration Big data Cybersecurity Simulation 3D Augmented Reality RFID Robots Additive Manufacturing	Usinagem Furação Mandrillamento Fresamento Ferramentas de Metal Duro Ferramentas de corte Metal Duro Machining Drilling Boring Milling Carbide tools Cutting tools

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para realizar a busca dos artigos publicados sobre o tema da pesquisa, foram utilizadas as palavras chaves nas seguintes bases de dados: Science Direct, Capes, Emerald, ProQuest, Wiley Library, Compendex, Scopus, Scielo, Web of Science, Capes, Revista Exacta e Google Acadêmico. A figura 2 ilustra as principais bases acadêmicas utilizadas na pesquisa.

Figura 2 - Bases acadêmicas consultadas.



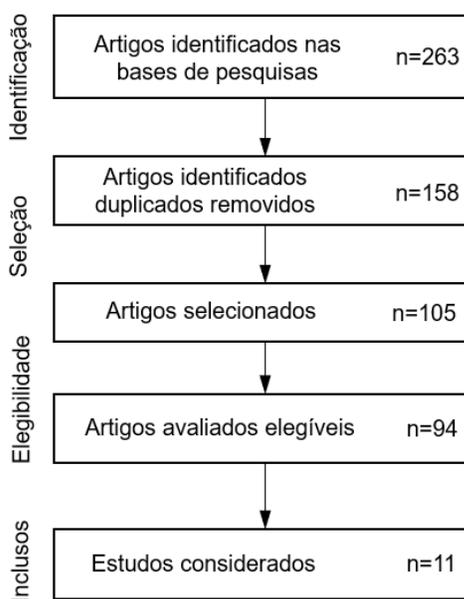
Fonte: Elaborado pelo autor

O critério definido para pesquisar os artigos nas bases acadêmicas foram: Título, Resumo e palavras chaves. Em seguida os artigos foram baixados das bases acadêmicas.

Para realizar a seleção dos artigos, foram definidos critérios de seleção em que todos os artigos tivessem relação com PSS, Tecnologias de I4.0 e Processos de Usinagem.

Para as buscas, seleção, elegibilidade e definição dos artigos, foi aplicado a técnica do PRISMA (MOHER *et al.*, 2010) demonstrado na figura 3.

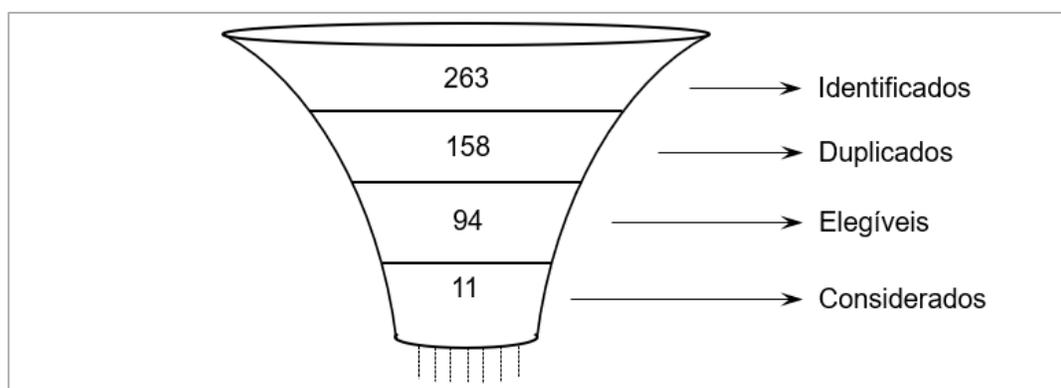
Figura 3 - Fluxo de informação Prisma



Fonte: (MOHER *et al.*, 2010)

Foram baixados 263 artigos das bases acadêmicas, 158 artigos foram duplicados e 105 avaliados. Do conjunto de 105 artigos, foram selecionados 11 estudos que abordaram PSS, Tecnologias da I4.0 e Processos de Usinagem. Os 94 artigos eliminados não atendiam completamente os critérios de seleção da pesquisa, porque não abordaram PSS, Tecnologias da Indústria 4.0 e Processos de Usinagem. Na figura 4 ilustra um filtro representando as fases de seleção até o resultado de 11 artigos finais.

Figura 4 - Filtro de seleção dos artigos.



Fonte: Elaborado pelo autor

4 ESTUDO DE CASO

Este estudo de caso aborda a implementação de um sistema de produto e serviço para o fornecimento e gerenciamento de ferramentas de corte para um processo de usinagem. Nas seções 4.1 e 4.2 conseqüentemente serão apresentados os cenários antes e depois da implantação do PSS.

O estudo de caso foi conduzido em uma empresa multinacional localizada na cidade de São Paulo, a empresa atua no setor automotivo responsável pela manufatura e montagem de motores.

A empresa possui certificações de qualidade (ISO 9001), meio ambiente (ISO 14001) a segurança e saúde ocupacional (OHSAS 18001). A empresa encoraja os colaboradores a implementarem tecnologias de I4.0 nos processos de produção, educacional e práticas sociais. A empresa também promove o aprimoramento intelectual para o desenvolvimento profissional e pessoal de seus colaboradores. Além disso, a empresa oferece oportunidades de crescimento na carreira profissional, inclusão social e profissionais que agregam valor ao setor, à sociedade e trazem melhor qualidade de vida às pessoas.

4.1 APRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM – CONVENCIONAL

O processo produtivo da fábrica consistia em quatro linhas de usinagem compostas de máquinas manuais, semiautomáticas e centros de usinagem CNC. A movimentação do produto entre as máquinas era realizada por meio de esteiras de roletes não tracionados. O tempo de processamento da entrada da peça bruta à saída do produto acabado era de aproximadamente 10 horas.

Durante o processo de usinagem, é mandatório realizar inspeções para assegurar a qualidade do produto. As ferramentas de corte são fatores fundamentais para garantir o acabamento e a qualidade do produto. Durante a usinagem as ferramentas se desgastam naturalmente, decorrente do atrito da ferramenta com a peça, exigindo que os operadores realizem trocas periódicas para evitar problemas como refugo, retrabalhos do produto e quebras das ferramentas de corte.

Para cada ferramenta do processo é determinada uma vida útil, definida e baseada em testes de desgastes, qualidade do produto e produtividade da máquina. O controle das ferramentas de corte são fatores fundamentais para garantir o acabamento e a qualidade do produto. Os desgastes das ferramentas de corte, requerem trocas periódicas para evitar problemas de qualidade como refugo e retrabalhos. O controle de vida útil das ferramentas era realizado por meio de planilhas eletrônicas e a comunicação da necessidade de troca de ferramenta era realizada verbalmente aos operadores, o que tornava vulnerável o processo de troca de ferramentas. As causas de falhas de ferramenta não eram analisadas em profundidade, o que tornava difícil a eliminação de novas ocorrências.

Não tinha como saber se as ferramentas atingiram a vida útil determinada ou se foi trocada antes, a necessidade de troca da ferramenta pode acontecer por diversas variáveis no processo de usinagem, tais como: desgaste prematuro, quebras, problemas de qualidade, manutenções nas máquinas e outros.

As trocas de ferramentas ocasionadas por quebras, eram constantes, porém, não havia aprofundamento nas análises para prevenir novas ocorrências, muitas eram concluídas como causa indefinida.

4.1.1 Aquisição de ferramentas

A complexidade do fluxo de aquisição de ferramentas também prejudicava o desempenho da usinagem. Requisições de novas ferramentas entravam na fila de compras e necessitava de cotação e autorização de três gestores. As diversas etapas deste processo levavam em média sete dias para serem concluídas.

Os Engenheiros de processos, Líderes ou Analistas de ferramentas eram o contato direto com os fornecedores de ferramentas. Outro aspecto que tornava difícil a gestão de ferramentas era a grande quantidade de fornecedores, atrasos nas entregas que ocorriam frequentemente.

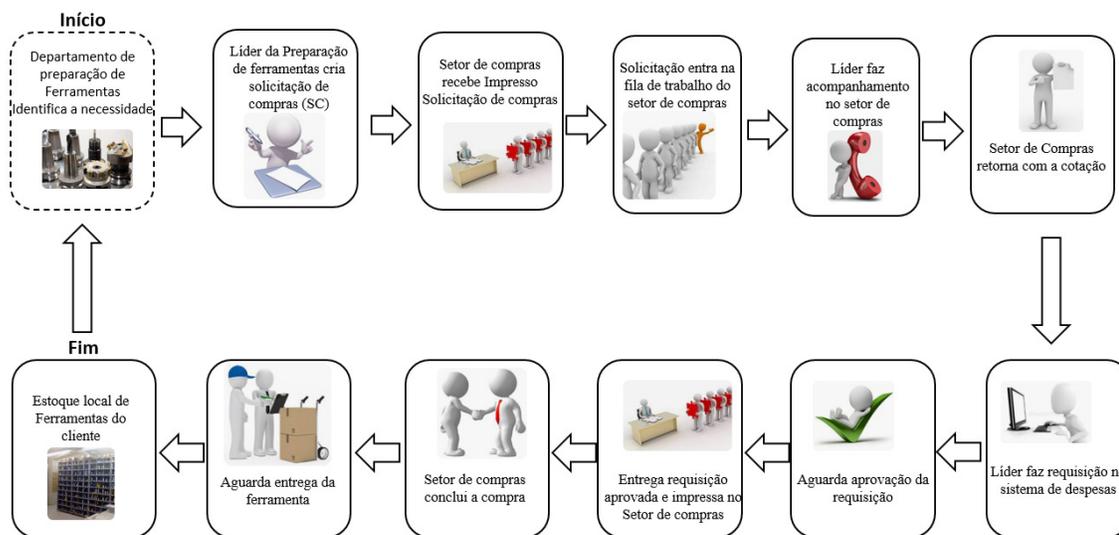
O critério para aquisição de ferramentas era baseado na contagem manual das requisições geradas, um processo manual que demandava tempo e frequentemente apresentava falhas.

Todas as solicitações de compras de ferramentas eram realizadas manualmente e entregue ao departamento de compras, descrevendo o tipo, acessório da ferramenta e indicações de fornecedores.

Após receber as cotações, esta era direcionada ao solicitante que registrava a cotação em um sistema de controle de despesas para obter as aprovações.

Com solicitação aprovada pela supervisão, o documento era impresso e entregue novamente ao departamento de compras para que a aquisição fosse formalizada com o fornecedor e aguardar a entrega da ferramenta. Na figura 5 é demonstrado o fluxo de compras para aquisição de uma nova ferramenta. O tempo para todas as etapas do processo era em média 7 dias, podendo ser superior, dependendo da demanda de trabalho no departamento de compras.

Figura 5 - Fluxo de compras para aquisição de ferramentas.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2 Estoque

O estoque de ferramentas era constituído por uma quantidade de 901 tipos de ferramentas totalizando um custo do inventário físico de R\$6.800.000,00.

Os fatores que influenciavam na quantidade de itens no estoque eram: negociação de compras, tempo de entrega dos fornecedores, riscos de quebras ou desgastes prematuro das ferramentas.

Qualquer armazenamento de materiais gera custos para a empresa, como, juros, depreciação, aluguel, gastos com equipamentos de movimentação, deterioração de equipamentos e produtos, obsolescência, seguros e conservação.

Existem duas variáveis que aumentam os custos do estoque, a quantidade de itens e o tempo de permanência. Quanto maior a quantidade em estoque, maior a necessidade de mão de obra, equipamentos para movimentação dos materiais tendo como consequência a elevação destes custos.

O estoque era gerenciado pelo próprio cliente e o controle realizado de forma manual, apresentava frequentes problemas como falta de ferramentas e acessórios para as ferramentas por falhas no gerenciamento.

As requisições eram realizadas em formulário em papel e nos fechamentos mensais, as requisições nunca coincidiam com o estoque. Não havia controle do que realmente era consumido, devido muitas ferramentas serem retiradas do estoque sem realizar a requisição.

O controle do consumo de ferramentas detalhado por produto, linha de usinagem e máquinas eram importantes, porém, não tinha como obter essas informações em função das falhas de gerenciamento. Desta forma, as despesas com ferramentas de corte, eram distribuídas na forma de rateio entre as linhas de usinagem devido não haver precisão no controle.

4.1.3 Ferramentas Circulantes (ferramentas reservas para trocas)

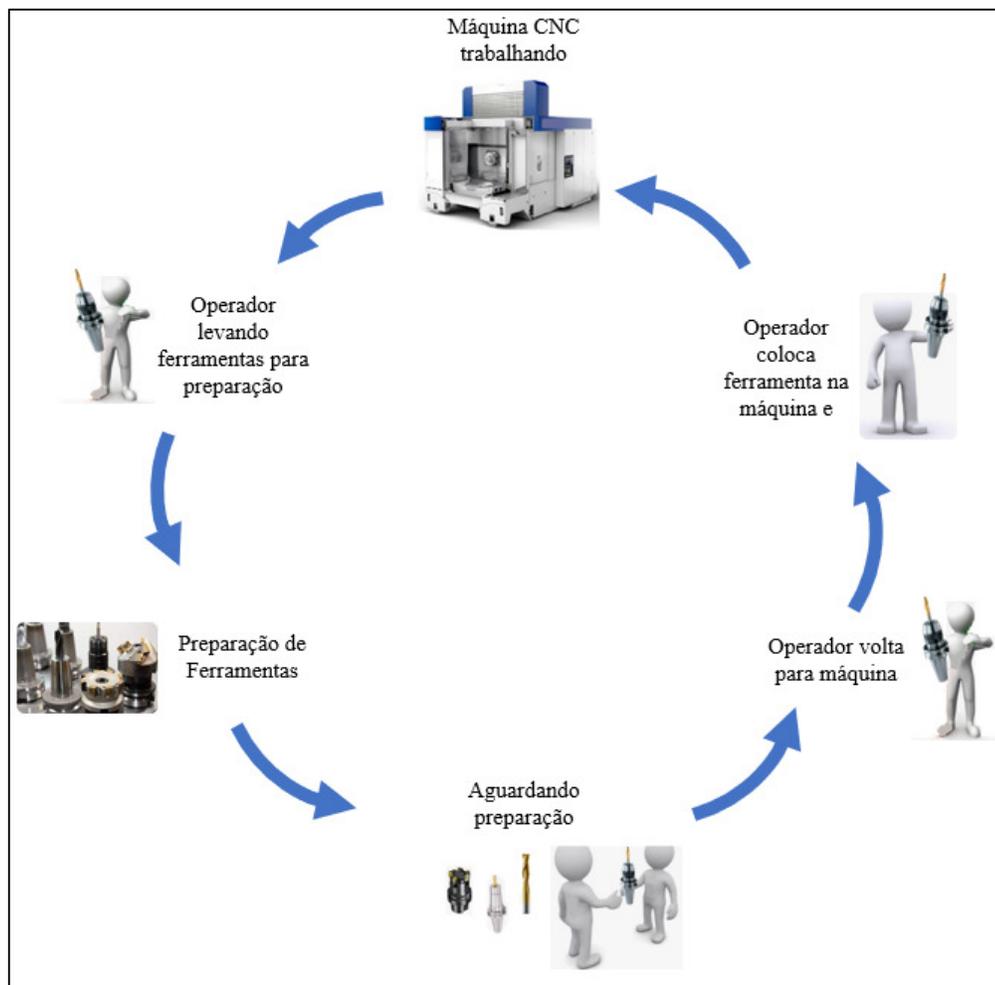
As ferramentas chamadas de circulantes, são as ferramentas necessárias para as trocas periódicas e que asseguram a continuidade do processo de usinagem, evitando paradas desnecessárias por falta de ferramentas.

O circulante é basicamente formado por ferramentas reservas, que estão em processos de preparação, cobertura e afiação.

A falta de ferramentas reservas para todas as máquinas causava perdas de produção devido as paradas do processo. Durante as trocas de ferramentas, o operador se deslocava até o departamento de preparação de ferramentas, aguardava a montagem de uma nova ferramenta e em seguida retornava para a máquina e colocava o equipamento em funcionamento.

O fluxo de troca de ferramentas do processo de usinagem convencional está apresentado na figura 6.

Figura 6 - Fluxo de troca de ferramentas “antes do PSS”.



Fonte: Elaborado pelo autor

A quantidade determinada de ferramentas existentes no circulante pode variar em função da frequência de troca de cada modelo de ferramenta, prazo de entrega dos fornecedores e se a ferramenta exige ou não cobertura especial após a reafiação. O custo mensal para manter as ferramentas do circulante era de R\$2.040.000,00.

4.1.4 Vulnerabilidade de falhas de qualidade

Além disso, o *preset* de ferramentas era carente de recursos tecnológicos para a operação e controle do processo. Os equipamentos de afiação e preparação de ferramentas eram de difícil operação, o que limitava o seu uso a um especialista na área. Um técnico realizava a medição da ferramenta por meio de um altímetro e registrava os resultados no corpo da ferramenta, gerando riscos de qualidade para o processo de usinagem, erros e falhas na digitação dos dados na tela da máquina CNC, refugos, retrabalhos e até mesmo uma colisão da máquina com a peça. A equipe de preparação de ferramentas era formada por funcionários da própria empresa.

A figura 7 ilustra o instrumento de medição “altímetro” utilizado para realizar a medição de *preset* das ferramentas.

Figura 7 - *Preset* manual com instrumento de medição altímetro.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 IMPLANTAÇÃO DO PSS

Um contrato de PSS foi sugerido aos gestores da empresa pela empresa fornecedora de ferramentas. A perspectiva de aumento da demanda de produção e consequente consumo de ferramentas, aliada a falhas de gerenciamento de estoque de ferramentas e mão de obra especializada para a preparação das ferramentas motivou o interesse no novo modelo de negócio. Então, fornecedor e cliente iniciaram os trabalhos de melhoria de consumo e gerenciamento de ferramentas.

A avaliação de desgastes e definição da vida útil de ferramentas foram fatores chave para determinar o consumo real e o custo de ferramenta por peça produzida. A implementação da tecnologia RFID em gestão de ferramentas aumentou a

confiabilidade do registro de informações e controle de consumo das ferramentas. A fase de análise preliminar ao PSS teve duração de cinco anos. Este período foi fundamental para aprofundar o conhecimento do processo, o que reduziu incertezas na definição do preço do PSS e fortaleceu a confiança do relacionamento cliente-fornecedor. A partir do acordo de PSS firmado, a empresa cliente deixou a gestão de ferramentas de corte a cargo do fornecedor. No PSS, ao invés da compra da ferramenta, o cliente paga um valor acordado de consumo de ferramenta por peça produzida.

O contrato de PSS, incluiu além do uso de ferramenta a prestação de serviços de mão de obra especializada em preparação, afiação, compra de materiais, controle de estoque, suporte de engenharia e melhorias de produtividade relacionados a ferramentas de corte no processo de usinagem.

A vida útil e o custo de aquisição variam conforme o tipo de ferramenta. A vida útil de ferramenta foi definida com base em testes práticos realizados no processo de usinagem. Especialistas em ferramentas, realizaram e acompanharam os testes em todas as ferramentas, para um resultado robusto e seguro, os testes foram realizado três vezes para cada ferramenta, o propósito foi analisar capturar as variações do processo de usinagem. Para o resultado de vida útil, levou-se em conta a média dos três testes realizados e aplicado uma taxa de 2%, ou seja, um fator de segurança para evitar quebras de ferramentas e problemas de qualidade do produto.

As informações de vida útil, possibilitou estabelecer a quantidade de peças produzidas com uma ferramenta. Assim, o custo de ferramenta por peça (CPP) foi obtido por meio da divisão do custo da ferramenta pela quantidade de peças produzidas com uma ferramenta, conforme é mostrado na equação 1.

$$CPP = \frac{\text{Custo da Ferramenta}}{\sum_{t=1}^n \text{Quantidade de peças produzidas com a ferramenta}}$$

(eq.1)

Na qual:

CPP é o custo por peça

t é a quantidade de ferramentas utilizadas na usinagem de uma peça

A fórmula, é aplicada para 100% das ferramentas utilizadas no processo de usinagem. A somatória dos custos por peça individualmente por ferramenta é

denominada custo por peça com ferramentas do processo. Na tabela 1, mostra o exemplo de uma peça cuja usinagem requer 81 tipos de ferramentas de corte.

Tabela 1 - Custo por peça com ferramentas

Nº	Código	Descrição	Qtde	Vida útil total da ferramenta	Custo da Ferramenta	Custo p/ peça
1	1	Broca Ø20mm	1	282	R\$ 680,00	R\$ 2,41
2	2	Rebaixador Ø15mm	1	1120	R\$ 2.790,00	R\$ 2,49
3	3	Broca Escalonada Ø4,5mm	1	4000	R\$ 1.601,00	R\$ 0,40
4	4	Lâmina 32mm	1	340	R\$ 148,29	R\$ 0,44
5	5	Broca 8,5mm	1	1760	R\$ 1.472,30	R\$ 0,84
n+1	1
81	181	Alargador 22mm	1	2000	R\$ 1.100,00	R\$ 0,55
Total						R\$ 73,00

Fonte: Elaborado pelo autor

O custo de R\$73,00 significa o valor que o fornecedor de ferramentas receberá do cliente a cada peça produzida na linha de usinagem. Neste exemplo, admitindo-se um cenário no qual o volume anual de produção seja vinte mil peças, o custo de ferramenta de corte seria de R\$1.460.000,00 por ano ou R\$28.076,92 por semana. O pagamento de consumo de ferramenta é realizado semanalmente de acordo com a produção realizada no período de sete dias, o que visa mitigar a flutuação de produção em relação ao planejamento anual. A retirada de ferramentas do estoque para a produção ocorre por meio de uma requisição que gera a emissão de uma nota fiscal. O custo de mão de obra especializada para o gerenciamento e preparação de ferramentas foi de R\$251.000,00 por mês.

A tabela 2 demonstra uma aplicação do PSS implementado na produção de uma linha de usinagem:

Tabela 2 - Volume anual de peças x custo por peça.

Descrição	Anual	Mensal	Semanal
Planejamento do volume anual de produção	20000		
Custo por peça	R\$73,00		
Planejamento de Custo anual com ferramentas corte:	R\$1,460,000.00	R\$121.666,67	R\$28.076,92

Fonte: Elaborado pelo autor

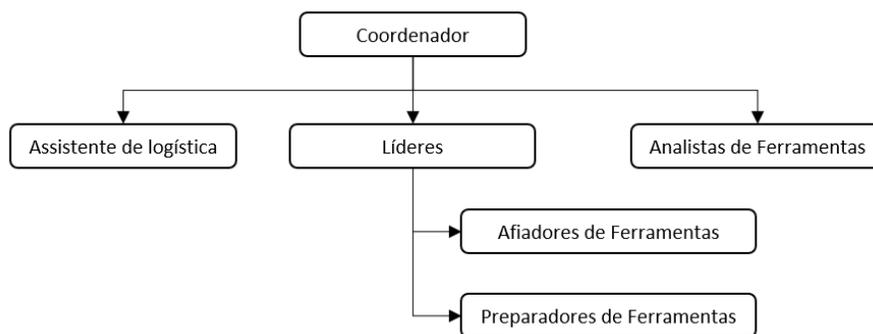
O PSS tem o objetivo de prover um melhor controle de orçamento para a cliente por meio do custo por peça (CPP) fixo e otimizado e também melhoria na produtividade dos processos produtivos e administrativos.

4.2.1 Preparação de ferramentas no PSS

A preparação de ferramentas era realizada por máquinas e equipamentos obsoletos que não atendiam plenamente normas de segurança e exigiam frequentemente intervenções da manutenção. A obsolescência de preparação de ferramentas foi diagnosticada pelo fornecedor de ferramentas que exigiu a modernização do setor para a implantação do PSS. Com isso, a empresa foco do estudo realizou um investimento de R\$4.100.000,00 para a aquisição de novas máquinas e equipamentos.

A preparação de ferramentas foi instalada no centro da fábrica, o que facilitou o acesso e atendimento à usinagem. A equipe é formada por Analistas, Afiadores, Assistente de logística, Preparadores de Ferramentas e Líderes. No local, também funciona um escritório do fornecedor no qual trabalham especialistas em ferramentas de corte que suportam o processo de usinagem nos turnos de produção. Na figura 8 demonstra o organograma da área de preparação de ferramentas.

Figura 8 - Organograma da equipe de gerenciamento de ferramentas.

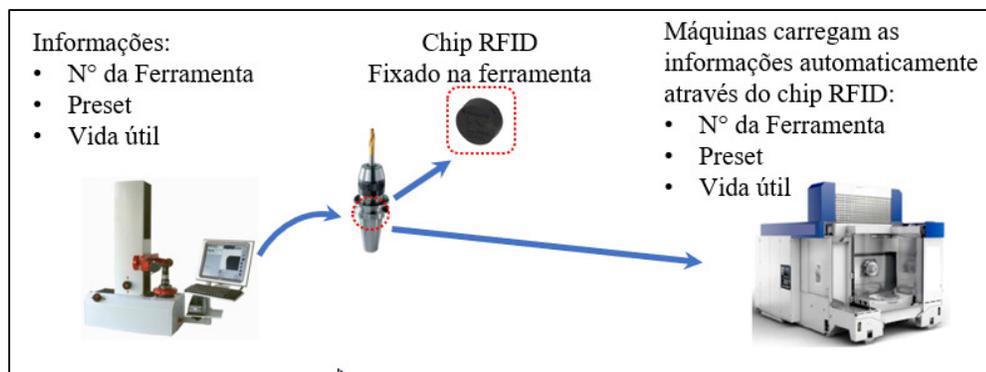


Fonte: Elaborado pelo autor

Além de melhorias em infraestrutura, o controle de dados de preparação foi modernizado. A instalação de chip de RFID em ferramentas possibilitou o

armazenamento e fácil acesso a informações de preset, vida útil e identificação da ferramenta. Ao instalar a ferramenta no centro de usinagem CNC, os dados armazenados no chip são transferidos automaticamente para a máquina sem a intervenção do operador. Este recurso permitiu que a máquina parasse automaticamente o processo de usinagem ao término da vida útil da ferramenta de corte, o que reduziu quebras de ferramentas e problemas de qualidade de produto. Na figura 9 demonstra o chip de RFID fixado na ferramenta.

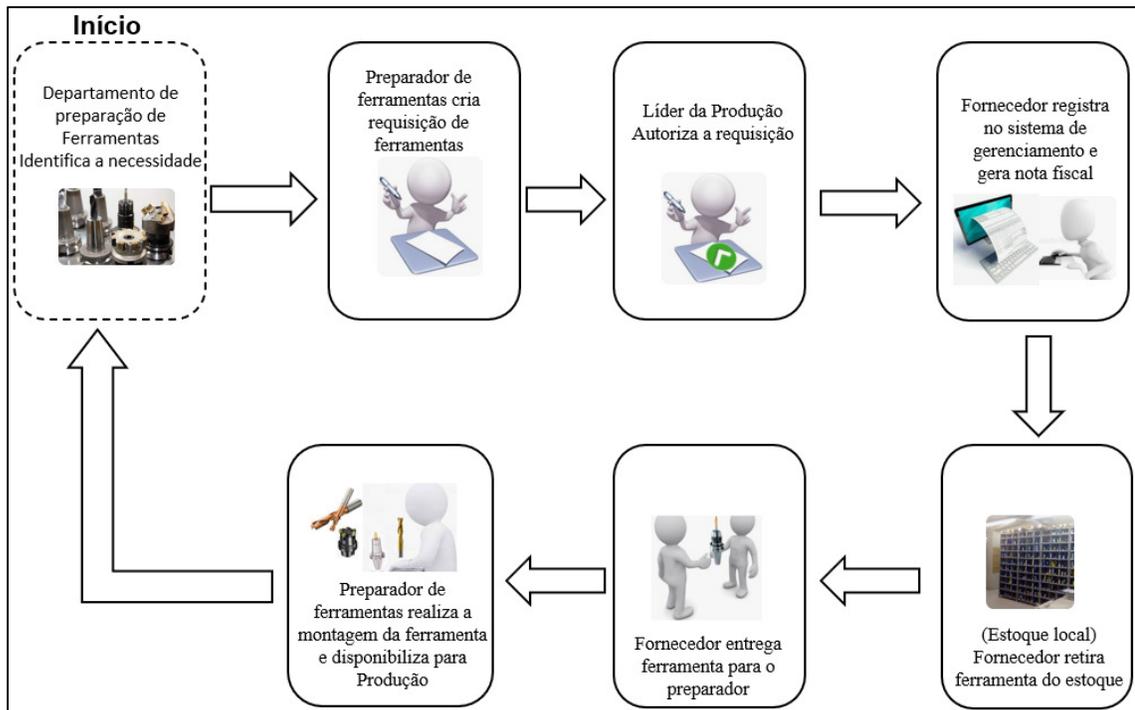
Figura 9 - Gravação dos dados da ferramenta no chip RFID.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na preparação de ferramentas, o técnico identifica a ferramenta em final de vida e providencia a sua substituição. No PSS, o tempo de reposição de ferramenta foi encurtado de sete dias para 20 minutos. O técnico cria uma simples requisição manual contendo as descrições de ferramenta e motivo da reposição. Após a aprovação da requisição pelo líder da usinagem, a mesma é lançada no sistema de gerenciamento *tool supply* por meio da máquina “*vending machine*”, em seguida, o técnico retira a nova ferramenta do estoque e disponibiliza para a produção. A figura 10 demonstra o fluxo para requisição de ferramentas.

Figura 10 - Etapas para requisição e ferramentas do estoque.



Fonte: Elaborado pelo autor

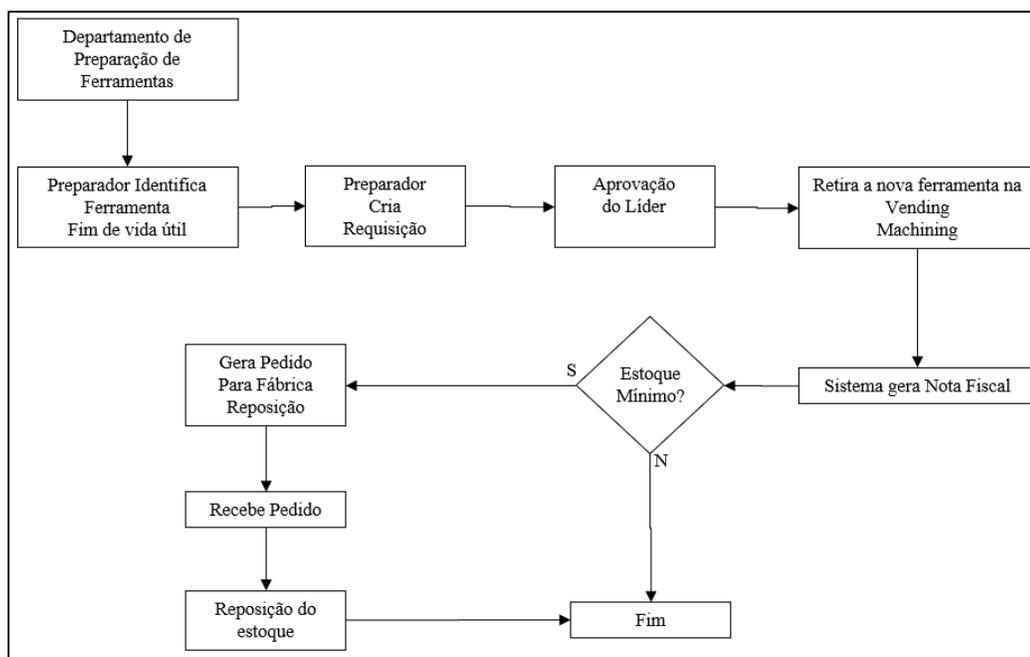
4.2.2 Gerenciamento do estoque de ferramentas

O estoque de ferramentas é composto de ferramentas novas e circulante. Uma máquina denominada *Vending Machining* gerencia 70% dos itens e tem capacidade de alocar mais de 600 itens como insertos, lâminas, brocas e machos. A *Vending Machining* funciona como uma estação de venda do fornecedor localizada na sala de preparação de ferramentas. O acesso à *Vending Machining* realizado por meio de usuário e senha tornou o controle de estoque mais robusto e a requisição de ferramentas mais rápida.

O equipamento *Vending Machining*, está equipado com a tecnologia big data, que possui alta capacidade de armazenamento, gerenciamento de dados e emissão automática de ordens de compra no sistema. As requisições de ferramentas são registradas eletronicamente no sistema, o qual emite nota fiscal e envia automaticamente ao cliente para o acerto de contas semanalmente com o fornecedor.

Uma quantidade mínima de ferramentas em estoque foi definida para cada item, com o propósito de evitar falta de ferramentas. Ao atingir o estoque mínimo, o sistema gera automaticamente um pedido de compras e o envia para a fábrica fornecedora de ferramentas providenciar a reposição do estoque. As etapas de requisição e reposição de ferramentas é mostrada na figura 11.

Figura 11 - Etapas para requisição e reposição de ferramentas.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A análise de implantação do PSS em usinagem foi iniciada por meio da avaliação de viabilidade econômica deste modelo de negócio. Para isto, foram coletados dados de investimentos e custos operacionais.

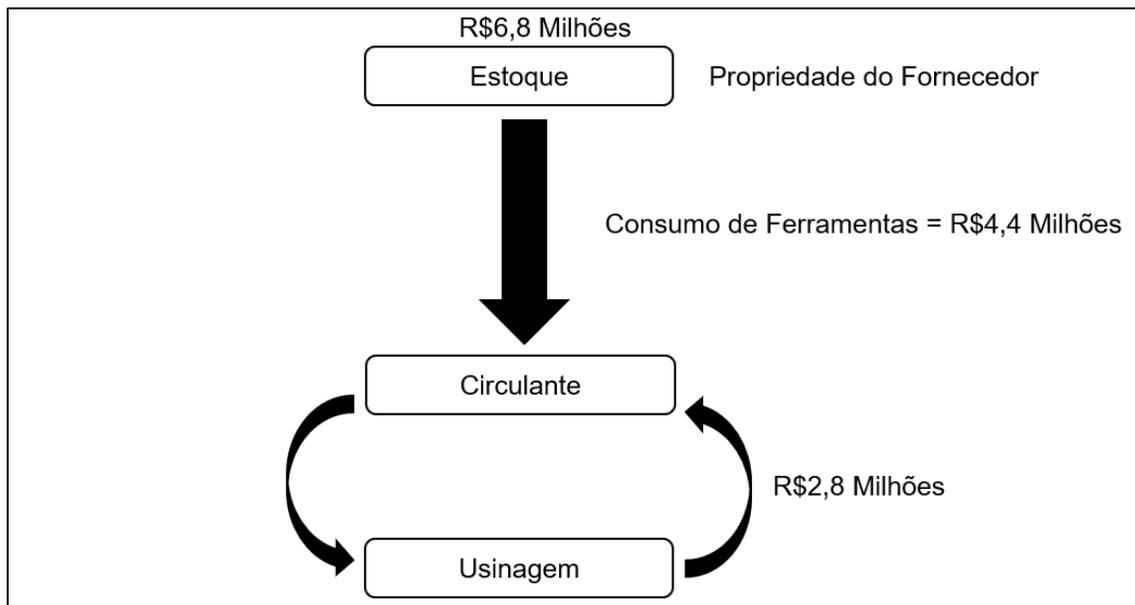
O investimento realizado foi exclusivamente na sala de preparação de ferramentas, a qual foi equipada com: dois afiadores de machos; três afiadores de aço rápido, metal duro e lapidação; uma afiadora múltipla; duas máquinas de preset de ferramentas; uma retífica cilíndrica; duas retíficas planas; uma lavadora automática;

duas mesas de granito (desempeno). O investimento total em máquinas e equipamentos foi de R\$4.100.000,00.

A análise de redução custo em usinagem obtida por meio do PSS levou em conta todo o processo, da gestão de estoque de ferramenta até o seu consumo na produção. No PSS, a responsabilidade sobre o estoque e gestão de ferramentas ficou a cargo do fornecedor. Com isso, a empresa cliente deixou de manter R\$6,8 milhões imobilizados em estoque de ferramentas.

Além disso, as ferramentas do estoque circulante contabilizaram R\$2,8 milhões. O consumo de ferramenta para o volume anual de produção de 20.000 peças foi calculado em R\$4,4 milhões por ano. A figura 12 demonstra os custos representados no estoque e circulante de ferramentas na usinagem.

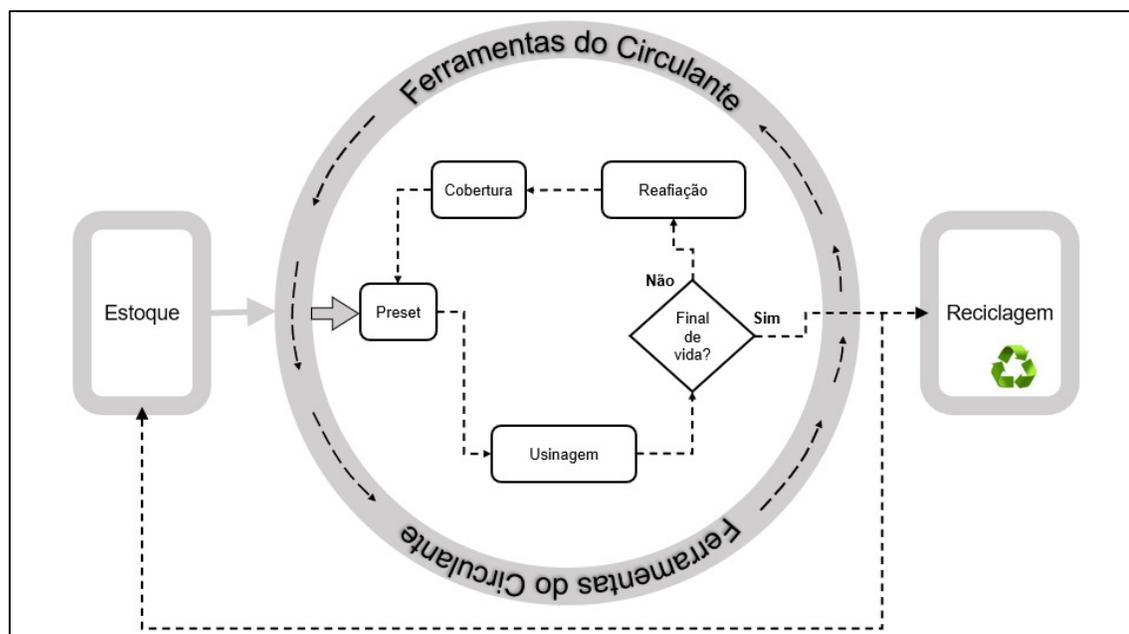
Figura 12 - Representação do Circulante de ferramentas.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 13 demonstra a representação de estoque, circulante e reciclagem onde o estoque suporta o circulante e o circulante suporta toda usinagem.

Figura 13 - Representação do circulante x usinagem



Fonte: Elaborado pelo autor

O custo de mão de obra na gestão de estoque e preparação de ferramentas foi reduzido de R\$3.974.400,00, antes do PSS, para R\$3.012.000,00 com a adoção do PSS. Além dos aspectos operacionais, a implantação do PSS motivou a reciclagem de ferramentas de corte em final de vida. A reciclagem de material metálico de ferramentas proporcionou receita de R\$28.000,00 à empresa. Os dados utilizados na avaliação estão mostrados na tabela 3.

Tabela 3 - Cálculo de vantagens econômicas do PSS

Descrição dos custos	Antes	Depois	Ganho Anual	Ganho Mensal
Estoque de ferramentas	R\$6.800.000,00	0		
Consumo de ferramentas	R\$3.400.000,00	R\$4.400.000,00		
Ferramentas circulante	R\$2.040.000,00	R\$2.800.000,00		
Mão de obra	R\$3.974.400,00	R\$3.012.000,00		
Receita de reciclagem		- R\$28.000,00		
Total	R\$16.214.400,00	R\$10.184.000,00	R\$6.030.400,00	R\$502.533,33

Fonte: Elaborado pelo autor

O cálculo do payback indicou que o investimento de R\$4.100.000,00 para à modernização da sala de preparação de ferramentas será recuperado em nove meses, conforme demonstrado na tabela 4.

Tabela 4 – Cálculo de Payback

Fluxo de caixa	Mês 0	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4
Investimento total	-4.100.000,00				
Lucro líquido		502.533,33	502.533,33	502.533,33	502.533,33
Fluxo de caixa acumulado	-4.100.000,00	-3.597.466,67	-3.094.933,34	-2.592.400,01	-2.089.866,68
Fluxo de caixa	Mês 5	Mês 6	Mês 7	Mês 8	Mês 9
Investimento total					
Lucro líquido	502.533,33	502.533,33	502.533,33	502.533,33	502.533,33
Fluxo de caixa acumulado	-1.587.333,35	-1.084.800,02	-582.266,69	-79.733,36	422.799,97

Fonte: Elaborado pelo autor

A implantação do PSS gerou redução de R\$6.030.400,00 de custo operacional por ano, ou R\$502.533,33 por mês. Com isso, o cálculo de payback indicou que o investimento de R\$4.100.000,00 realizado na modernização da sala de preparação de ferramentas retornará em nove meses.

4.4 AVALIAÇÃO AMBIENTAL

A preocupação com o meio ambiente é um dos princípios tanto do cliente quanto do fornecedor de ferramentas, buscando sempre uma economia circular e sustentabilidade.

Os elementos que compõe a matéria prima para ferramentas de corte, são retirados da natureza em forma de minérios, são eles: Tungstênio que é a base do Metal Duro (MD), Titânio, Nióbio, Tântalo e o Cobalto, que é empregado como elemento liga e responsável pelo aumento da tenacidade.

As ferramentas de MD são ricas em Carbono, Tungstênio e outros minerais finitos na natureza. São utilizadas em diferentes aplicações de usinagem, e quando perdem suas propriedades de corte, não podem ser mais utilizadas para usinagem.

Desta forma, todas as ferramentas que atingem o final de vida, são coletadas em locais demarcados para serem destinadas ao processo de reciclagem.

O material destas ferramentas ainda continuam valiosos, e todo material coletado é vendido por quilograma para o próprio fornecedor de ferramentas e destinado ao processo de reciclagem.

A prática de produção mais limpa incorporada na gestão de ferramentas do PSS possibilitou a reciclagem de material de ferramenta em final de vida. Esta ação contribuiu para a redução de extração de material virgem e a conservação do ecossistema. O material de ferramentas de corte é composto de tungstênio, titânio, nióbio, tântalo e o cobalto.

O levantamento de balanço de massa identificou 602 kg de material que foi destinado à reciclagem em 2020.

A figura 14 demonstra os coletores instalados na área de preparação para que sejam depositados os resíduos de ferramentas, sejam por quebras ou por final de vida.

Figura 14 - Coletores de ferramentas



Fonte: Elaborado pelo autor

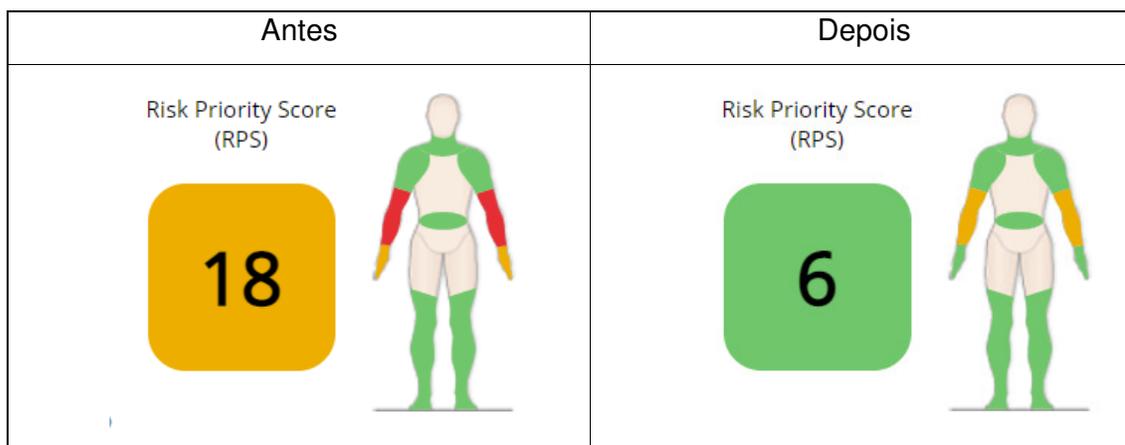
4.5 AVALIAÇÃO SOCIAL

O fator social também foi foco da avaliação das vantagens do PSS em usinagem. A lavagem de ferramentas envolvia riscos à saúde de operadores ao devido à ergonomia e ao manuseio de produto químico. As ferramentas encaminhadas à preparação deviam ser lavadas previamente. Antes do PSS, a lavagem das ferramentas ocorria em reservatório no qual o operador utilizava uma mangueira com esguicho e escova de cerdas. Esta atividade causava esforços na região dos braços com risco de lesão.

A modernização realizada na sala de preparação de ferramentas ocorrida com a implantação do PSS proporcionou redução do risco à saúde humana. No novo processo, uma máquina lavadora faz a limpeza e secagem da ferramenta automaticamente. O operador trabalha no abastecimento e retirada de peças da máquina. Com isso, o contato humano com o produto químico foi eliminado e os esforços nos braços foram reduzidos.

As vantagens obtidas para a saúde humana foram mensuradas por meio do cálculo de Risk Priority Number (RPS) realizado no software Humantech. A análise comparativa de risco (RPS) do processo antes e depois está mostrado na figura 15.

Figura 15 - Avaliação Ergonômica



Fonte: Elaborado pelo autor

4.6 OPORTUNIDADES E AMEAÇAS DO PSS EM USINAGEM

O PSS tem sido avaliado positivamente por gestores da empresa. O incremento de conhecimento técnico obtido por meio da incorporação de especialistas em ferramentas no processo produtivo proporcionou ganhos econômicos, ambiental e social.

No entanto, fatores de risco do PSS foram levantados com o intuito de mitigar impacto negativo ao negócio. Um aspecto mencionado por gestores é que o conhecimento técnico de ferramentas de corte ficou sob domínio do fornecedor. Outro ponto destacado é que apesar do fornecedor ser referência mundial em fabricação de

ferramentas de corte, existe o risco de limitação às tecnologias adotadas pelo fornecedor.

Além da vulnerabilidade de conhecimento técnico, existe risco de capacidade financeira do fornecedor. A ameaça à empresa surge da possibilidade do fornecedor ir à falência ou desistir do negócio. O impacto ao risco financeiro foi mitigado por cláusulas de contrato que definiram a obrigação do fornecedor em homologar um outro fornecedor de ferramentas de corte para suprir a demanda do cliente. Além disso, reuniões entre a alta direção das empresas (cliente x fornecedor) são conduzidas semestralmente para a apresentação dos resultados, que inclui a condição financeira do fornecedor.

5 DISCUSSÕES

Os resultados deste estudo mostraram que PSS em usinagem aproximou fornecedor e cliente. O diagnóstico de defasagem tecnológica na preparação de ferramentas, elaborado pelo fornecedor, abriu a mente da alta direção para a necessidade de investimentos nesta área. A aquisição de máquinas e equipamentos aumentou a confiabilidade de preparação de ferramentas, reduziu custos da não qualidade e tornou uma operação mais segura aos técnicos. Com isso, PSS em usinagem se mostrou vantajoso como um modelo de negócio. Este resultado está alinhado ao trabalho de Liu *et al.* (2019) que constatou que o uso de IoT e o incremento tecnológico proporcionou o monitoramento de parâmetros que aumentou a confiabilidade do processo.

Outro aspecto positivo ligado ao PSS foi a implantação de reciclagem de ferramentas de corte em final de vida. A exclusividade no fornecimento de ferramentas tornou atrativa a reciclagem de metal duro. A venda do material de metal duro em final de vida, que antes do PSS era descartado, resultou em receita adicional e redução da extração de matéria-prima virgem. A conservação do ecossistema realizada por meio da redução do impacto ambiental está inserida na política ambiental das empresas foco deste estudo. Esta constatação corroborou o resultado de Rizzo *et al.* (2020) no qual o envolvimento de fornecedores que adotaram práticas ambientais ajudou ambas as empresas relacionadas no negócio a atingir metas de desempenho ambiental. Além disso, a reciclagem de metal duro em específico tungstênio foi ressaltado por Ishida *et al.* (2012), como um material escasso cuja reserva podendo deixar de existir em 40 anos.

A avaliação econômica conduzida neste estudo levou em conta investimento para a implantação do PSS e custos de mão de obra e de estoque e consumo de ferramentas. Estas informações foram fundamentais para o cálculo de viabilidade econômica do PSS. Este resultado corrobora o estudo de Mourtzis *et al.* (2017) que mostrou ganhos econômicos em termos de redução de tempo de manutenção global em 54% e custo de manutenção em 91%.

As vantagens obtidas por meio do PSS indicaram que o fortalecimento da relação com o fornecedor de ferramentas melhorando os resultados na usinagem. A

viabilidade econômica do PSS apresentada neste trabalho revelou que o pagamento pelo uso da ferramenta ao invés da sua aquisição reduziu custo de inventário, tempo de reposição de estoque e risco de parada de produção devido a falta de ferramenta. Este achado corroborou o resultado de Sun *et al.* (2016), no qual a terceirização da gestão de ferramentas de corte, que é uma atividade fora do core business do usuário da máquina, reduziu custos e melhorou a produtividade.

6 CONCLUSÃO

Este estudo alcançou o seu objetivo que foi avaliar vantagens econômica, ambiental e social de PSS de ferramenta de corte em usinagem. Os resultados indicaram que o PSS em usinagem é uma alternativa vantajosa para gerenciamento de ferramentas na indústria. O PSS reduziu em R\$6,030,400.00 por ano o custo operacional, o que possibilitou o retorno do investimento em nove meses. Além disso, a reciclagem de 602 kg de metal duro por ano reduziu a extração de metal escassos na natureza como o Tungstênio e o Cobalto. Ainda, o avanço tecnológico reduziu risco de lesão de operadores.

A contribuição teórica desta pesquisa foi oferecer um trabalho ainda não encontrado na literatura sobre vantagens econômicas, ambientais e sociais de PSS em usinagem. A revisão sistemática da literatura identificou que os fatores econômicos, ambientais e sociais em estudos sobre PSS em usinagem. Com isso, os aspectos positivos relatados neste trabalho incrementaram o conhecimento acerca do tema pesquisado.

Como contribuição para a prática corporativa, este estudo pretende estimular gestores industriais a buscar negócios de PSS que garantam o gerenciamento e fornecimento de ferramentas de corte para seus processos produtivos. A divulgação deste trabalho pode alcançar gestores de fornecedores e clientes e incentivá-los na criação de estratégias que visam a substituição da propriedade de produto pelo serviço de uso deles.

O propósito exploratório desta pesquisa limitou as suas conclusões à empresa foco do estudo. O método e os dados coletados não permitem a generalização dos resultados. Sugestões de pesquisas futuras são direcionadas a trabalhos que aprofundem o conhecimento sobre PSS em usinagem, em especial, vantagens que promovam a economia circular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNARELLI, A.; BATTISTELLA, C.; NONINO, F. Competitive advantage implication of different Product Service System business models: Consequences of 'not-replicable' capabilities. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, p. 119-121, 2020.

AURICH J.C.; MANNWEILER, C.; SCHWEITZER, E. How to design and offer service successfully. **J Manuf Sci Technol**, v. 3, n. 2, p.136-43, 2010.

BARRATT, M.; CHOI, T. Y.; LI, M. Qualitative case studies in operations management: Trends, research outcomes, and future research implications. **Journal of Operations Management**, v. 29, n. 4, p. 329-342, 2011.

BRESSANELLI, G.; ADRODEGARI, F.; PERONA, M; SACCANI, NICOLA. The role of digital technologies to overcome Circular Economy challenges in PSS Business Models: an exploratory case study, **Procedia CIRP**, v. 73, p. 216–221, 2018.

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. **Risk List 2015**. Disponível em: <www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/risklist.html>. Acesso em: 22 set. 2021.

CHARRO, A.; SCHAEFER, D. Cloud Manufacturing as a new type of Product-Service System. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 31, n. 10, p. 1018–1033, 2018.

CHEN, Y. Industrial information integration - A literature review 2006–2015. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 2, p. 30-64, 2016.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. 2014, "Towards the Circular Economy", Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org>>. Acesso em: 3 set. 2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. 2015, "Circular Economy vision for a competitive europe", Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org>>. Acesso em: 22 set. 2021.

ELLEN MACARTHUR Foundation. Intelligent Assets: Unlocking the Circular Economy Potential. Ellen MacArthur Found, 2016.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. 2017, "Cities in the Circular Economy", Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org>>. Acesso em: 22 set. 2021.

FARSI, M.; ERKOYUNCU, J. A. An agent-based approach to quantify the uncertainty in Product-Service System contract decisions: A case study in the machine tool industry. **International Journal of Production Economics**, v. 233, p. 39-44, 2021.

FISCHER, A.; PASCUCCI, S. Institutional incentives in circular economy transition: The case of material use in the Dutch textile industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 155, p. 17–32, 2017.

GALANTUCCI, L. M.; GUERRA, M. G.; DASSISTI, M.; LAVECCHIA, F. Additive Manufacturing: New Trends in the 4th Industrial Revolution. **Springer Natural Switzerland**, p. 153-169, 2019.

GRUSCHKA, N.; LUSSEM, J. **Information Quality Challenges in Industry 4.0**. IN: ICIQ 2016, Ciudad Real (Spain), v. 10, 2016.

- HAYASHI, T.; SATO, F.; SASAYA, K.; IKEGAYA, A. Industrialization of Tungsten Recovering from Used Cemented Carbide Tools. **SEI Tech.** v. 82, p. 33-38, 2016.
- HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios, in 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), p. 3928-3937, 2016.
- ISHIDA, T.; ITAKURA, T.; MORIGUCHI, H.; IKEGAYA, A. Development of technologies for recycling cemented carbide scrap and reducing tungsten use in cemented carbide tools. **SEI Tech.** v. 75, p. 38-46, 2012.
- KAREEM, B.; ADEKIIGBE, A. Development of a system model for determining optimal personnel interaction strategy in a production industry. **J. Eng. Res.** v. 14, p. 49-63, 2017.
- KOLSCH, P.; HERDER, C. F.; ZIMMERMANN, V.; AURICH, J. C. A Novel Concept for the Development of Availability-Oriented Business Models. **Procedia CIRP**, v. 64, p. 340–344, 2017.
- KOOCHAKI, J.; BOKHORST, O. C.; WORTMANN, H.; AND KLINGENBERG, W. “Condition Based Maintenance in the Context of Opportunistic Maintenance,” **Int. J. Prod. Res**, v. 50, n. 23, pp. 6918-6929, 2012.
- KERIN, M.; PHAM, D. T. A review of emerging industry 4.0 technologies in remanufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, p. 117805, 2019.
- KOMOTO, H.; TOMIYAMA, T. Integration of a service CAD and a life cycle simulator. **CIRP Annals**, n. 57, p. 9-12, 2008.
- LI, B. H.; L. ZHANG.; S. L. WANG.; F. TAO.; J. W. CAO.; X. D. JIANG.; X. SONG.; X. D. CHAI. Cloud Manufacturing: A New Service-Oriented. **Journal of Computer Integrated Manufacturing Systems**, v. 16, n. 1, p. 1–7, 2010.
- LINDER, M.; WILLIANDER, M. Circular Business Model Innovation: Inherent Uncertainties, **Business strategy and the environment**, v. 26, n. 2, p. 182–196, 2017.
- LOREK, S.; SPANGENBERG, J. H. Sustainable consumption within a sustainable economy - Beyond green growth and green economies. **Journal of Cleaner Production**, v. 63, p. 33-44, 2014.
- LUTTROP, C.; JOHANSSON, J. Improved recycling with life cycle information tagged to the product. *J. Clean. Prod.* v.18, p.346–354, 2010.
- MATT, D.T.; GUALTIERI, L.; RAUCH, E.; VIDONI, R. An evaluation methodology for the conversion of manual assembly systems into human-robot collaborative workcells. **Procedia Manufacturing**, v. 38, n. 2019, p. 358-366, 2019.
- MARTINEZ, V.; BASTL, M.; KINGSTON, J.; EVANS, S. Challenges in transforming manufacturing organisations into product-service providers. **J Manuf Technol Manag** v. 21, n. 4, p. 449-69, 2010.
- MARTILLANO, D.A.; DITA, J.M.R.; CRUZ, C.G.; SADHRA, K.S. Android based real-time industrial emission monitoring system using IoT technology. **J. Commun**, v. 12, p. 623–629, 2017.

- MC CRACKEN, G. The long interview. Newbury Park: Sage. **Organização para a cooperação e o desenvolvimento econômico – OCDE**. Manual de Oslo: diretrizes para a coleta e interpretação de dados sobre inovação, 2005. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/manualoslo.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2021.
- MEIER, H.; ROY, R.; SELIGER, G. Industrial Product-Service systems-IPS2. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 59, n. 2, p. 607–627, 2010.
- MOURTZIS, D.; VLACHOU, A.; ZOGOPOULOS, V. Cloud-based augmented reality remote maintenance through shop-floor monitoring: A product-service system approach. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 139, n. 6, p. 1-11, 2017.
- MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. **International Journal of Surgery**, v.8 n. 5, p. 336-341, 2010.
- MAZUR, D.C.; KAY, J.A.; MAZUR, K.D. Intelligent motor control: innovations in process optimization, **Ind. Appl. Mag., IEEE**, p. 30-37, 2015.
- NEMOTO, Y.; AKASAKA, F.; SHIMOMURA, Y. A framework for managing and utilizing product-service system design knowledge. **Production Planning and Control**, v. 26, n. 14, p. 14–15, 2015.
- PEREIRA, A.C., ROMERO, F. A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. **Procedia Manuf.** v.13, p. 1206–1214, 2017.
- POMPONI, F., MONCASTER, A. Circular economy for the built environment: A research framework. **J. Clean. Prod.** v. 143, p. 710-718, 2017.
- PONTEVEDRA, V.; HALSTENBERG, R.; STARK, R. ScienceDirect Introducing Product Service System Architectures for realizing Introducing Product Service System Architectures for realizing Circular Economy Costing models for optimization in Industry Trade-off. **Procedia Manufacturing**, v. 33, p. 663–670, 2019.
- PRESTON, F. “A Global Redesign? Shaping the Circular Economy, Energy, Environment and Resource Governance”. London, 2012.
- REIGADO, C. R.; FERNANDES, S. C.; SAAVEDRA, Y, M, B.; OMETTO, A, R.; COSTA, J, M, H. A Circular Economy Toolkit as an Alternative to Improve the Application of PSS Methodologies, **Procedia CIRP**, v. 64, p. 37–42, 2017.
- REN, S.; ZHANG, Y.; LIU, Y.; SAKAO, T.; HUISINGH, D.; ALMEIDA, C. M. V. B. A comprehensive review of big data analytics throughout product lifecycle to support sustainable smart manufacturing: A framework challenges and future research directions. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 1343-1365, 2018.
- RIZZO, A.; GOEL, S.; GRILLI, M. L.; IGLESIAS, R.; JAWORSKA, L., LAPKOVSKIS, V., NOVAK, P., POSTOLNYI, B. O.; VALERINI, D. The critical raw materials in cutting tools for machining applications: **A review. Materials**, v.13, n. 6, 2020.
- ROY, V.; SINGH, S. Mapping the business focus in sustainable production and consumption literature: Review and research framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 150, p. 224-236, 2017.

- SÁTYRO, W. C.; SACOMANO, J. B.; GONÇALVES, R. F.; BONILLA, S.H.; SILVA, M. T. **Indústria 4.0: Conceitos e Fundamentos**. São Paulo: Blucher, 2018.
- SOUSA-ZOMER, T. T. MAGALHÃES, LUCAS.; ZANCUL, EDUARDO.; CAMPOS, LUCILA M.S.; CAUCHICK-MIGUEL, PAULO A. Cleaner production as an antecedent for circular economy paradigm shift at the micro-level: Evidence from a home appliance manufacturer. **Journal of Cleaner Production**, v. 185, p. 740-748, 2018.
- SÁENZ, T. W.; CAPOTE, E. G. **Ciência, Inovação e Gestão Tecnológica**. Brasília: CNI/IEL/SENAI, 2002.
- SUN, P.; ZHANG, C.; JIANG, P.; CAO, W. "Cutting-tool Delivery Method in the Context of Industrial Product Service Systems." **Concurrent Engineering, Research and Applications**, v. 24, n. 2, p. 178-90, 2016.
- TUKKER, A. Eight types of product service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. **Bus. Strategy Environ.** v.13, n. 4, p. 246- 260, 2004.
- TUKKER, A., TISCHNER, U. Product-services as a research field: past, present and future. Reflections from a decade of research. **J. Clean. Prod.** v.14, n. 17, p. 1552-1556, 2006.
- TUKKER A. Product services for a resource-efficient and circular economy - a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 97, p. 76-91, 2015.
- VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. Case research in operations management. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 22, n. 2, p. 195-219, 2002.
- WAN, S.; LI, D.; GAO, J.; ROY, R.; TONG, Y. "Process and Knowledge Management in a Collaborative Maintenance Planning System for High Value Machine Tools." **Computers in Industry**, v. 84, p. 14-24, 2017.
- WANG, Z.; SUBRAMANIAN, N.; GUNASEKARAN, A.; ABDULRAHMAN, M.D.; LIU, C. Composite sustainable manufacturing practice and performance framework: Chinese auto-parts suppliers' perspective. **Int. J. Prod. Econ.** n.170, p. 219-233, 2015.
- WU, D.; GREER, M.J.; ROSEN, D.W.; SCHAEFER, D. Cloud manufacturing: Strategic vision and state-of-the-art. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 4, p. 564-579, 2013.
- YAO, L.; GE, Z. Big Data quality prediction in the process industry: A distributed parallel modeling framework. **Journal of Process Control**. v. 68, p. 1-13, 2018.
- YIN ROBERT K. Case study research: Design and methods. Thousand Oaks, CA: **Sage Publications**, v.24, 2017.
- ZHANG, L.; Y. LUO, F. TAO, BH LI, L. REN, X. ZHANG, H. GUO, Y. CHENG, A. HU, AND L. YONGKUI. "In Cloud Manufacturing: A New Manufacturing Paradigm." **Enterprise Information Systems**, v. 8, n. 2, p. 1-21, 2012.
- ZHU, Q.Q.; JIANG, P.Y.; HUANG, G.Q.; QU, T. Implementing an industrial product-service system for CNC machine tool. **Int. J. Adv. Manuf. Technol**, v. 52, p. 1133–1147, 2011.