

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA DESENVOLVIMENTO E
VALIDAÇÃO DE FERRAMENTAIS DE PONTEAMENTO COM
AUXÍLIO DE TECNOLOGIAS IMERSIVAS**

TIAGO HENRIQUE DANTAS FERREIRA

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUÍS HELLENO

CO-ORIENTADOR: DR. PAULO HENRIQUE PEREIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2019

**PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA
DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE
FERRAMENTAIS DE PONTEAMENTO COM AUXÍLIO DE
TECNOLOGIAS IMERSIVAS**

TIAGO HENRIQUE DANTAS FERREIRA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, em 30 de agosto de 2019, pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. André Luís Helleno
UNIMEP

Prof^a. Dr^a. Maria Célia de Oliveira
UNIMEP

Prof. Dr. Raphael Galdino dos Santos
Insper - Instituto de Ensino e Pesquisa

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIMEP
Bibliotecária: Gislene Tais de Souza Sperandio - CRB-8/9596.

F383p	<p>Ferreira, Tiago Henrique Dantas Proposta de um método para desenvolvimento e validação de ferramentas de ponteamto com auxílio de tecnologias imersivas / Tiago Henrique Dantas Ferreira. – 2019. 96 f.: il.; 30 cm</p> <p>Orientador: Prof. Dr. André Luís Helleno. Coorientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Pereira Dissertação (Mestrado) – Universidade Metodista de Piracicaba, Engenharia de Produção, Santa Bárbara d'Oeste, 2019.</p> <p>1. Realidade virtual. 2. Inovações tecnológicas. 3. Planejamento da produção. I. Helleno, André Luís. II. Pereira, Paulo Henrique. III. Título.</p>
	CDD – 670

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Prof. Dr. André Luís Helleno e Dr. Paulo Henrique Pereira por me guiarem durante esta jornada árdua, me mostrando que após todo esforço existe uma recompensa.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por disponibilizar recursos em forma de bolsa de fomento.

Aos meus pais, Oduvaldo Lopes e Edileuza Dantas por serem minha referência de garra, dedicação e resiliência. À minha irmã Rosana que foi fonte de inspiração para buscar o nível de mestre.

À minha esposa, companheira que a vida me deu, que de forma similar também teve que se "desdobrar" para eu poder completar esta jornada. Às minhas filhas por serem fonte de motivação nos momentos de falta de ânimo.

Aos meus companheiros de pesquisa, José Vital, Mariana Bravo, Eduardo Marchesini, Carlos Adame e outros, por me motivar quando necessário.

RESUMO

FERREIRA, Tiago Henrique Dantas. Proposta de um Método para Desenvolvimento e Validação de Ferramentais de Ponteamento com Auxílio de Tecnologias Imersivas. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

Para sobreviver em um mercado cada vez mais exigente, e com ciclo de vida dos produtos cada vez menor, as organizações têm na introdução de novos processos com rapidez, eficácia e baixos custos, um diferencial competitivo (menor *time to market*). Para que consigam superar estes desafios, empresas utilizam para desenvolver, e validar, seus projetos de produtos, ambientes virtuais com tecnologias imersivas. A análise da situação atual da área de pesquisa deste estudo indica que, para projetos de ferramentais de ponteamento (processo anterior a soldagem), estas tecnologias são pouco utilizadas. Portanto, o objetivo deste trabalho é propor um método para reduzir não conformidades no desenvolvimento e validação de ferramentais com o auxílio de tecnologias imersivas. O método de pesquisa utilizado para identificar a quantidade, e tipos, de não conformidades no procedimento atual da empresa selecionada foi estudo de caso. A partir do resultado da pesquisa (método proposto de desenvolvimento e validação virtual), é possível que as empresas possam criar ferramentais de ponteamento corretos da primeira vez, reduzindo não conformidades antes da fabricação do mesmo, resultando em menor *time to market* e custos de implementação.

PALAVRAS-CHAVES: Realidade Virtual, Validação de Ferramentais de Ponteamento, Tecnologias Imersivas, Planejamento de Processos.

ABSTRACT

FERREIRA, Tiago. PROPOSAL OF A METHOD FOR DEVELOPMENT AND VALIDATION OF TACK WELD FIXTURE AIDED BY IMMERSIVE TECHNOLOGIES. 2019. Thesis (Master's Degree in Production Engineering) – Faculdade de Engenharia, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

To survive in an increasingly demanding market, and with a reduce product life cycle, organizations have in the introduction of new processes with speed, effectiveness and low costs, a competitive differential (lower time to market). In order to overcome these challenges, companies use to develop, and validate, their product's projects and virtual environments with immersive technologies. The analysis of the current situation of the area of research of this study indicates that, for tack weld fixture (process prior to welding), these technologies are little diffused. Therefore, the objective of this work is to propose a method to reduce non-conformities in the development and validation of tack weld fixture aided by immersive technologies. The research method used to identify the quantity, and types, of nonconformities in the current procedure of the selected company was a case study. From the result of the research (proposed method of virtual development and validation), it is possible that companies can create correct balancing tools the first time, reducing non-conformities before the manufacture phase, resulting in a reduced time to market and implementation costs.

Keywords: Virtual reality, Lean Thinking, Validation of tack welding fixture, Immersive Technologies, Process Planning

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
APQP	<i>Advance Product Quality Planning</i>
BOM	<i>Bill of Materials</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i>
CAFD	<i>Computer-Aided Fixture Design</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CAPP	<i>Computer-Aided Process Planning</i>
CIM	<i>Computer Integrated Manufacturing</i>
CPS	<i>Cyber-Physical System</i>
DoD	<i>Department of Defense (EUA)</i>
ECO	<i>Engineering Change Order</i>
ECR	<i>Engineering Change Request</i>
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
HMD	<i>Head-Mounted Display</i>
IV&V	<i>Independent Verification and Validation</i>
NC	Não Conformidade
NPI	<i>New Product Introduction</i>
NVA	<i>Non-Value Adding</i>
OF	Ordem de fabricação
PFMEA	<i>Process Failure Mode and Effects Analysis</i>
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i>

PPM	<i>Parts Per Million</i>
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
STD	<i>See Through Device</i>
TTM	<i>Time to Market</i>
VAR	<i>Virtual and Augmented Reality</i>
VR	<i>Virtual Reality</i>
VV&A	Validação, Verificação e Acreditação

LISTA DE FIGURAS

<i>FIGURA 1 – FERRAMENTAL PARA MONTAGEM E PONTEAMENTO DE PEÇA.....</i>	<i>2</i>
<i>FIGURA 2 - VARIAÇÃO HISTÓRICA PIB INDUSTRIAL BRASIL.....</i>	<i>5</i>
<i>FIGURA 3 - POSICIONAMENTO DOS PAÍSES CONSIDERANDO CRESCIMENTO DO PI</i>	<i>6</i>
<i>FIGURA 4 – ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO DE CASO</i>	<i>8</i>
<i>FIGURA 5 – PROCESSOS DO PRODUTO, OTD E SUAS RELAÇÕES</i>	<i>12</i>
<i>FIGURA 6 - CICLO DE VIDA DE PRODUTO</i>	<i>14</i>
<i>FIGURA 7 – CICLO DE VIDA DE UM PRODUTO BASEADO NAS VENDAS</i>	<i>15</i>
<i>FIGURA 8 - VISÃO TTM COM INOVAÇÃO VERSUS SEM INOVAÇÃO</i>	<i>16</i>
<i>FIGURA 9 - ORGANIZAÇÃO DA PRODUÇÃO</i>	<i>18</i>
<i>FIGURA 10 - PROCESSO MACRO INTRODUÇÃO PROCESSOS</i>	<i>20</i>
<i>FIGURA 11 – PRINCÍPIO DE 3-2-1.....</i>	<i>23</i>
<i>FIGURA 12 - DIAGRAMA DE FASES APQP</i>	<i>24</i>
<i>FIGURA 13 – CICLO DO PRODUTO</i>	<i>28</i>
<i>FIGURA 14 - SISTEMAS INTEGRADOS INDÚSTRIA 4.0</i>	<i>31</i>
<i>FIGURA 15 - GARTNER’S HYPE CYCLE.</i>	<i>33</i>
<i>FIGURA 16 - REALIDADE E VIRTUALIDADE CONTÍNUO</i>	<i>35</i>
<i>FIGURA 17 - HMD SAMSUNG ODYSSEY.....</i>	<i>36</i>
<i>FIGURA 18 - IMERSÃO AUDITIVA</i>	<i>36</i>
<i>FIGURA 19 - IMERSÃO DO TATO.....</i>	<i>37</i>
<i>FIGURA 20 - SENSOR DE MOVIMENTOS</i>	<i>37</i>
<i>FIGURA 21 - CONCEITO BÁSICO RA.....</i>	<i>42</i>

<i>FIGURA 22 - EXEMPLO DISPOSITIVO HMD</i>	43
<i>FIGURA 23 - FLUXO CRIAÇÃO AMBIENTE VIRTUAL VALIDAÇÃO DE PROJETOS</i>	46
<i>FIGURA 24 - FLUXOGRAMA DO PROJETO DE SIMULAÇÃO</i>	51
<i>FIGURA 25 -MÉTODO DE PESQUISA</i>	53
<i>FIGURA 26 - MATRIZ PARA SELEÇÃO DE TECNOLOGIA</i>	58
<i>FIGURA 27 – FLUXO CORRENTE DA EMPRESA PARA INTRODUÇÃO DE NOVO PROCESSO</i>	59
<i>FIGURA 28 – FORMULÁRIO PARA INSERÇÃO DE ORDEM DE FABRICAÇÃO FERRAMENTAL</i>	60
<i>FIGURA 29 - TIPOS DE NCs ENCONTRADAS NO ESTUDO DE CASO</i>	62
<i>FIGURA 30 – MÉTODO MEPF PROPOSTO</i>	65
<i>FIGURA 31 - FORMULÁRIO DO CICLO DE TESTES</i>	66
<i>FIGURA 32 - FORMULÁRIO PFMEA</i>	86

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – REQUISITOS PADRÃO DO FERRAMENTAL.....	21
QUADRO 2 – REQUISITOS ESPECÍFICOS DO FERRAMENTAL	22
QUADRO 3 – QUADRO RESUMO DA UTILIZAÇÃO DE RV, RA E CAD EM PROJETOS DE PRODUTOS E NA MANUFATURA (V – VELOCIDADE, Q – QUALIDADE E C – CUSTO).....	45
QUADRO 4 – RESUMO DE RETRABALHOS ENCONTRADOS DURANTE PEÇA TESTE.....	62
QUADRO 5 - PONTUAÇÃO DE OCORRÊNCIA DO PFEMA.....	81
QUADRO 6 - PONTUAÇÃO DE SEVERIDADE DO PFEMA.....	82
QUADRO 7 - PONTUAÇÃO DA DETECÇÃO DO PFEMA	83

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	I
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE QUADROS	V
SUMÁRIO	VI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	4
1.2. OBJETIVO	7
1.2.1. OBJETIVO GERAL.....	7
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
1.3. METODOLOGIA DE PESQUISA	7
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	9
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	11
2.1. CICLO DE VIDA DO PRODUTO	11
2.2. MANUFATURA DO PRODUTO	18
2.2.1. PLANEJAMENTO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E FERRAMENTAL	19
2.3. TECNOLOGIAS PARA VALIDAÇÃO DE FERRAMENTAIS	27
2.3.1. CIM - <i>COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING</i>	28
2.3.2. TECNOLOGIAS DISRUPTIVAS	30
2.3.2.1. TECNOLOGIAS IMERSIVAS.....	34
2.3.3. SIMULAÇÃO	46
3. MÉTODO DE PESQUISA.....	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
5. CONCLUSÕES.....	67
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
7. APÊNDICE	81

1. INTRODUÇÃO

Manufatura é um processo que consiste em transformar matéria prima em um produto com valor agregado para atender às necessidades do cliente. Este processo de transformação tem contribuído nos últimos anos para o crescimento econômico das nações. Porém, no atual ambiente de negócios globalizado e altamente competitivo, as indústrias estão enfrentando desafios para desenvolver processos de manufatura com os atributos aceitáveis de custo, qualidade e prazo (NEE, ONG, 2013).

Como efeito deste ambiente competitivo e surgimento de novas tecnologias, o ciclo de vida dos produtos está se reduzindo constantemente, por este motivo, as empresas de transformação têm buscado possibilidades de inserir novos produtos de forma mais eficiente, adicionando aos seus métodos tecnologias que possam auxiliar na redução do tempo de introdução, desenvolvimento e validação dos projetos (CHOI *et al.*, 2015).

Estrategicamente, para que consigam superar estes desafios, as empresas buscam como alternativa desenvolver e validar os seus projetos, e processos de planejamento, de produtos utilizando-se desenvolvimentos digitais por meio de validação virtual (SULI, 2019).

Enfrentando o mesmo desafio de custo, qualidade e prazo, a fase de desenvolvimento de ferramentais, parte do ciclo de desenvolvimento de processo de fabricação, sofre com ineficiências ao receber mudanças constantes nos requisitos dos clientes, também conhecidas como alterações técnicas (CICHOS e AURICH, 2016).

Considerando o setor de desenvolvimento de máquinas de grande porte, o qual é estudo desta dissertação, o processo de fabricação dos componentes desta indústria é caracterizado pela utilização de soldagem (manual ou robotizada), a qual pode ser definida por união de materiais por meio de fusão (ZHANG *et al.*, 2019).

Neste tipo de processo, para que seja possível atender medidas dimensionais específicas de um projeto de produto, são utilizados ferramentais para montagem das peças e para fixação dos componentes utilizados, e sendo posteriormente ponteamto em locais definidos entre as partes a serem soldadas (ANDERSEN *et al.*, 2017).

Li (2009) define ferramental como sendo um dispositivo que localiza, fixa e mantém posicionado os componentes de uma peça em produção durante o processo de ponteamto, garantindo a qualidade dos produtos manufaturados por meio da padronização da sequência de posicionamento dos componentes, redução do tempo de ciclo por meio da repetibilidade dos dimensionais e, por consequência, reduzindo o custo final da peça. A Figura 1 apresentam um exemplo de ferramental de montagem de peça.



FIGURA 1 – FERRAMENTAL PARA MONTAGEM E PONTEAMENTO DE PEÇA

FONTE: BEJLEGAARD ET AL. 2018

Segundo Wang e Rong (2008), o custo com introdução de novo ferramental (projeto e produção) pode chegar a 20% do custo total do sistema de manufatura. A introdução de novos produtos resulta diretamente no desenvolvimento de novos ferramentais ou alterações em ferramentais já existentes, portanto, o tempo de desenvolvimento e validação destes dispositivos, assim como a sua qualidade, é fundamental para a eficiência do ciclo de vida dos produtos (PENG *et al.*, 2010).

Com isso, para auxiliar no atendimento dos atributos de baixo custo, alta qualidade e menor prazo, inúmeras tecnologias têm sido desenvolvidas para aumentar o conhecimento sobre o produto/processo durante etapas de concepção e desenvolvimento, o que pode ser chamado de desenvolvimento digital do produto e processo (KOVAR *et al.*, 2016; WOLFARTSBERGER, 2019).

Dentre estas tecnologias destacam-se a Manufatura Integrada por Computador (CIM - *Computer Integrated Manufacturing*) e as Tecnologias imersivas de realidade Virtual e Aumentada.

A CIM é um conjunto de tecnologias já consolidada e bastante difundida, a qual consiste na utilização de computadores que utilizam de ambientes de projeto 2D e 3D em substituição aos métodos manuais (NOVAK *et al.*, 2013). Dentre as tecnologias que fazem parte do CIM destacam-se os Sistemas CAD/CAM/CAE.

O Sistema CAD (Computer Aided Design) pode ser definido como a utilização de sistemas computacionais para auxiliar no processo de criação, modificação, análise e otimização de um projeto (GROOVER e ZIMMERS, 2008). Ex.: utilização do CAD para projeto do produto e ferramentais. Nesta utilização são apresentadas tabelas indicando materiais utilizados (bill of material – BOM), tipos de solda a serem executas, dimensionais dos componentes e suas tolerâncias em 2D;

O Sistema CAM (Computer Aided Manufacturing) pode ser definido como a utilização de sistemas computacionais para auxiliar no planejamento, gerenciamento e controle de operações de um processo de manufatura (GROOVER e ZIMMERS, 2008). Ex.: utilização de software para simular/controlar as máquinas e ferramentas relacionadas ao processo de fabricação, principalmente voltado ao processo de usinagem;

O Sistema CAE (Computer Aided Engineering) pode ser definido como a utilização de sistemas computacionais para simular e analisar como o produto irá se comportar estruturalmente, possibilitando a redefinição e otimização (LEE, 1999). Ex.: a utilização de software para análises de elementos finitos (FEA) e dinâmica computacional de fluídos (CFD).

As Tecnologias Imersivas podem ser definidas como ambientes que misturam a fronteira entre o mundo físico e virtual que permitem aos usuários experimentar uma sensação de estar imerso em uma realidade paralela (FREEMAN, 2016), as duas tecnologias mais conhecidas são:

- Realidade Virtual (RV): esta tecnologia possibilita a criação de ambiente totalmente virtual onde é possível o usuário interagir e navegar sem influência do mundo real;

- Realidade Aumentada (RA): de forma oposta à RV, permite que objetos virtuais sejam projetados no ambiente real.

Nesse cenário, a motivação para realizar este trabalho é o alto volume de retrabalhos encontrados normalmente durante o desenvolvimento e validação de ferramentais de ponteamento ao se introduzir novas alterações técnicas, os quais somente utilizam suporte de tecnologias tradicionais (CIM) para predição de não conformidades e, por não detectar as falhas durante as validações iniciais, prolongam o tempo total de introdução do processo e o custo envolvido (LI, 2009).

Segundo dados encontrados durante avaliações preliminares na empresa do estudo de caso, para alguns modelos de produtos, houve até 60% de retrabalho dos ferramentais de ponteamento entre as fases de peça teste e produção.

Paralelo a este cenário, tecnologias imersivas, com utilização de Realidade Virtual e Realidade Aumentada (VAR) vêm sendo utilizadas ao longo dos anos (OLIVEIRA, 2008; SHERMAN, CRAIG, 2019) para validação de projetos de produtos, reduzindo atividades que não agregam valor, evitando aumento de custos, reduzindo tempos de validação e aumentando a produtividade.

Portanto, de forma análoga, como desenvolver ferramentais de ponteamento é equivalente a projetar um produto, surge como pergunta de pesquisa:

A utilização de tecnologias imersivas pode contribuir para o aumento da eficiência do processo de desenvolvimento e validação de ferramentais?

Quais são os principais fatores relacionados com a falta de eficiência durante desenvolvimento e validação de ferramentais de ponteamento?

1.1. IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Além de aumentar o conhecimento científico através da aplicação de tecnologias imersivas ao processo de desenvolvimento de ferramentais, área ainda pouco estudada, este trabalho se justifica por estar inserido no aumento da eficiência do desenvolvimento de processos das fábricas nacionais.

Aumentando-se esta eficiência, pode-se contribuir com melhoras no PIB industrial brasileiro, o qual conforme pode ser observado na Figura 2, apresenta uma constante redução nos últimos anos em função da redução dos processos nacionais industriais (IBGE, 2019).

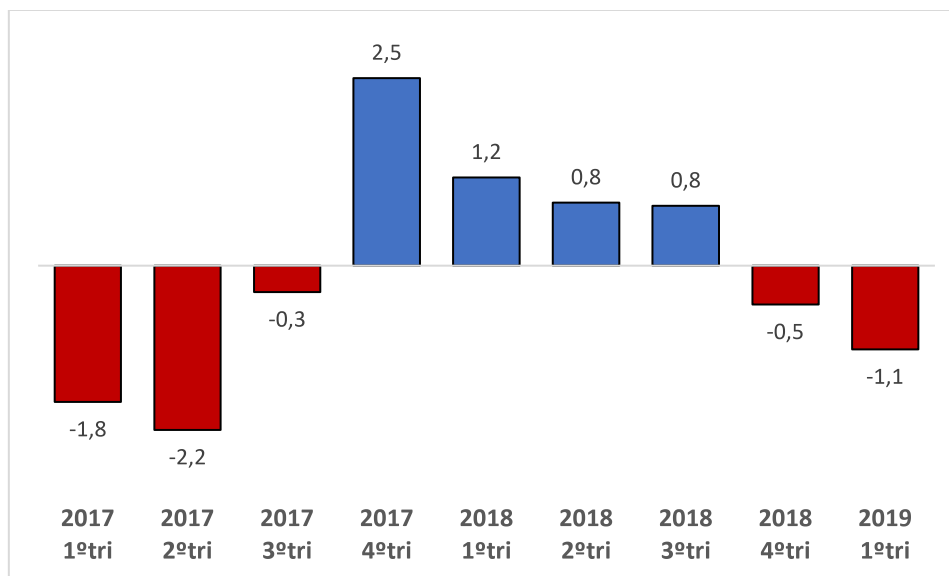


FIGURA 2 - VARIAÇÃO HISTÓRICA PIB INDUSTRIAL BRASIL

FONTE: IBGE 2019

Como complemento aos dados do IBGE, a lista da *Austing Rating* (2019) (Figura 3), agência classificadora de risco que traz os resultados das maiores economias do mundo, compara o desempenho do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro em 2018 de 1,1%, com outras economias mundiais.

Neste *ranking* o Brasil assume 40ª posição, o que reflete a baixa competitividade do setor industrial, se comparado com outros países que já utilizam tecnologias imersivas (KOVAR *et al*, 2016).



FIGURA 3 - POSICIONAMENTO DOS PAÍSES CONSIDERANDO CRESCIMENTO DO PIB 2018

FONTE: AUSTING RATING (2019)

Conforme indica Bottani e Vignali (2018) e Li *et al.* (2017), o uso de tecnologias imersivas aumenta a competitividade dos processos onde são utilizados e, por consequência, podem aumentar a competitividade dos países que utilizam em sua manufatura este tipo de tecnologia.

Segundo estudos (MUND, 2014; HENAO *et al.*, 2018; NEGRAO *et al.*, 2016), para que um sistema esteja no caminho da excelência, desde sua etapa de planejamento (ferramentais e processos), os fatores essenciais devem ser baseados no Projeto de Produto Enxuto e nos Processos de Fabricação Enxutos.

Autores (BELLGRAN, SÄFSTEN, 2014; MATSAS, VONIAKOS, 2015; DALLE-MURA *et al.*, 2016; SCHUELKE, 2018; BROCAL *et al.*, 2019) indicaram em seus estudos que a aplicação de ambientes imersivos, como por exemplo a realidade virtual e aumentada (VAR - *Virtual and Augmented Reality*), traz benefícios aos processos de manufatura por meio da redução de problemas de segurança, previsão de possíveis

colisões, aumento de qualidade do produto final ao treinar virtualmente operadores de linhas de montagem, etc, antes da introdução do produto real.

Para atingir os mesmos benefícios com o desenvolvimento dos ferramentais, buscou-se a utilização de tecnologia imersivas na validação virtual dos dispositivos de ponteamento na fase de desenvolvimento, de forma similar que utilizado na validação de projetos de produtos (WOLFARTSBERGER, 2019), tornando os produtos nacionais mais competitivos por meio de processos mais eficientes.

1.2. OBJETIVO

Para melhor compreensão dos objetivos desta dissertação, os mesmos foram divididos em objetivo geral e específico.

1.2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é propor um método para desenvolvimento e validação de ferramentais de ponteamento com o auxílio de tecnologias imersivas.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para desenvolver o método fez-se necessário:

1. Através do estudo de caso, identificar as principais fontes de alterações durante desenvolvimento e validação de ferramental de ponteamento que levaram ao redesenho e remanufatura;
2. Avaliar os benefícios da implementação de tecnologias imersivas ao desenvolvimento e validação de projetos de produtos (área que já utiliza com sucesso a tecnologia).

1.3. METODOLOGIA DE PESQUISA

O método inicialmente utilizado é um estudo de caso a ser desenvolvido conforme detalhado na Figura 4.

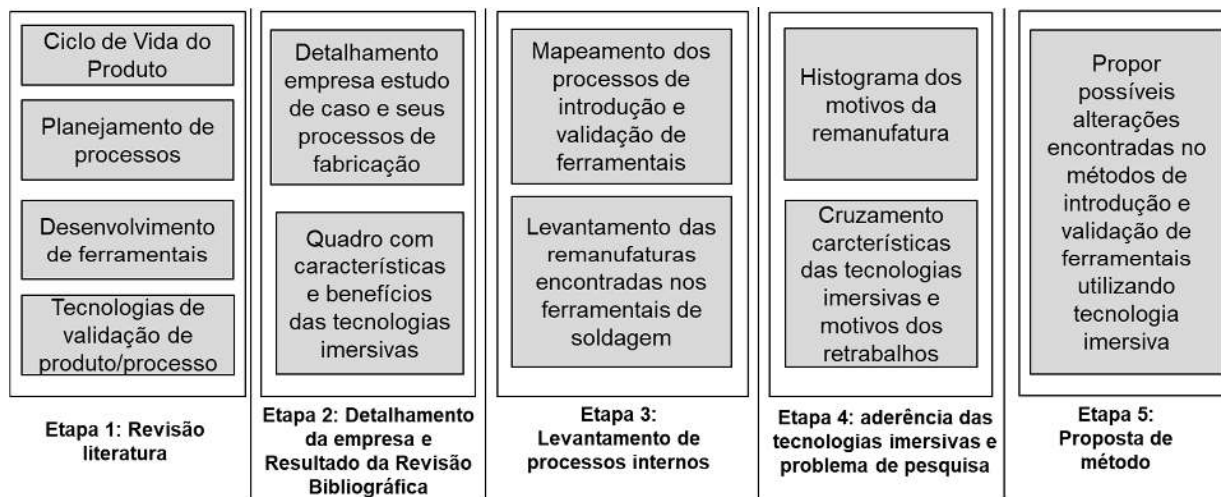


FIGURA 4 – ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO DE CASO

A revisão bibliográfica detalha os temas básicos para o desenvolvimento adequado da pesquisa, iniciando-se a partir do ciclo de vida do produto, seguido do planejamento de processos de manufatura, desenvolvimento do ferramental de ponteamto e, por fim, detalhamento das tecnologias de validação de processo.

Para a etapa 2, a empresa selecionada para o estudo de caso deve utilizar em seu processo produtivo ferramentais de ponteamto de peças. Para detalhamento de seus processos foram feitas visitas para levantamento dos processos fabris.

Para a etapa 3, a coleta de dados, foram utilizadas as técnicas: análise documental do sistema ISO e observação sistemática (observação das etapas do processo, das ferramentas utilizadas, das dificuldades encontradas e dos resultados) através da extração das informações do sistema de gerenciamento de projeto dos ferramentais.

Para a etapa 4, foram tabuladas as não conformidades (NC) encontradas durante validação dos ferramentais da etapa 3 e, a partir dos benefícios encontrados na revisão da literatura da utilização de ambientes imersivos em revisão de projetos, realizou-se o cruzamento destes com os problemas encontrados na validação dos dispositivos. O intuito é verificar se estas novas tecnologias teriam identificado os problemas encontrados na fase de validação virtual.

Para a etapa 5, com os fluxos encontrados das fontes (estudo de caso e literatura), foram propostos possíveis melhorias no procedimento da empresa com a adição de etapas que contemplem a avaliação através de sistemas imersivos.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos detalhados a seguir.

O capítulo 1 inicia-se com a contextualização do problema, avaliações preliminares na empresa do estudo de caso indicam que, para alguns modelos de produtos, houve 60% de retrabalho dos ferramentais de ponteamento entre as fases de peça teste e produção em escala ao se utilizar CIM.

No capítulo 2, o referencial teórico é desenvolvido por meio do detalhamento dos temas básicos para o desenvolvimento adequado da pesquisa, sendo:

- Ciclo de vida: detalha as fases da vida do produto, focando principalmente na parte de transformação do projeto em produto (manufatura);
- Planejamento de processos: parte do ciclo de vida do produto, é a fase responsável por criar as etapas de transformação do projeto em produto;
- Desenvolvimento do ferramental: como se trata de um processo de ponteamento, para garantir a repetibilidade do processo, padronização, velocidade e custo, será detalhado o procedimento de desenvolvimento de ferramental;
- Tecnologias imersivas: este tópico tem como objetivo explicar o funcionamento destas novas tecnologias. Além disso é apresentado um quadro resumo contendo os benefícios da utilização das tecnologias.

O capítulo 3 destina-se ao detalhamento do método de pesquisa utilizado nesta dissertação para obtenção dos dados do fenômeno em estudo (estudo de caso), serão detalhados “como” cada etapa é executada.

No capítulo 4 estão apresentados os resultados da pesquisa de campo contendo os métodos, fluxogramas e não conformidades encontradas durante validações dos ferramentais de ponteamento pelo do procedimento da empresa em estudo.

E, por fim, no capítulo 5, são apresentadas as lacunas encontradas no método da empresa do estudo de caso, as quais são entradas para a criação do método proposto.

Esses dados são comparados ao que existe sobre o tema na literatura científica e um novo método é proposto.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Para melhor entendimento do benefício que a validação, e desenvolvimento, virtual de ferramentais de ponteamento podem trazer na redução do *Time-to-Market* (TTM), serão detalhados os tópicos que visam criar uma fundação sólida para alcançar o objetivo proposto. Foram considerados os seguintes temas: ciclo de vida do produto, sistemas de manufatura, planejamento de processos, tecnologias disruptivas, tecnologias imersivas e simulação.

Devido as tecnologias imersivas serem pouco utilizadas para validação e desenvolvimento de projeto de ferramentais de ponteamento, parte da revisão da literatura fará referência ao projeto de produto, área a qual, devido ao benefício, já faz uso destas tecnologias (BERG e VANCE, 2016).

2.1. CICLO DE VIDA DO PRODUTO

Para este trabalho, entende-se como produto um objeto tangível, resultante do processo de produção, que é introduzido no mercado com a intenção de satisfazer a necessidade de um consumidor (MILLAR *et al.*, 2018).

Devido às mudanças constantes nos requisitos dos clientes, o ciclo de vida dos produtos tem se tornado cada vez menor (CHICOS, AURICH, 2015). Para atender de forma rápida a estas mudanças, faz-se necessário entender as fases que o produto passa, identificando assim como a redução no tempo de validação dos processos de manufatura pode ser uma estratégia competitiva (SULI, 2019).

Segundo Stark (2015), a gestão de vida de um produto, também conhecida como *Product Lifecycle Management* (PLM), tem como objetivo principal a gestão do produto da empresa, desde a sua concepção como ideia até o momento de seu descarte.

Saaksvuori e Immonem (2008) indicam que o PLM é um sistema de gerenciamento integrado, não só de controle das informações do produto, mas também do gerenciamento do processo de pedido até entrega (OTD – *Order To Delivery*), estes dois fluxos, e suas relações, são indicados na Figura 5:

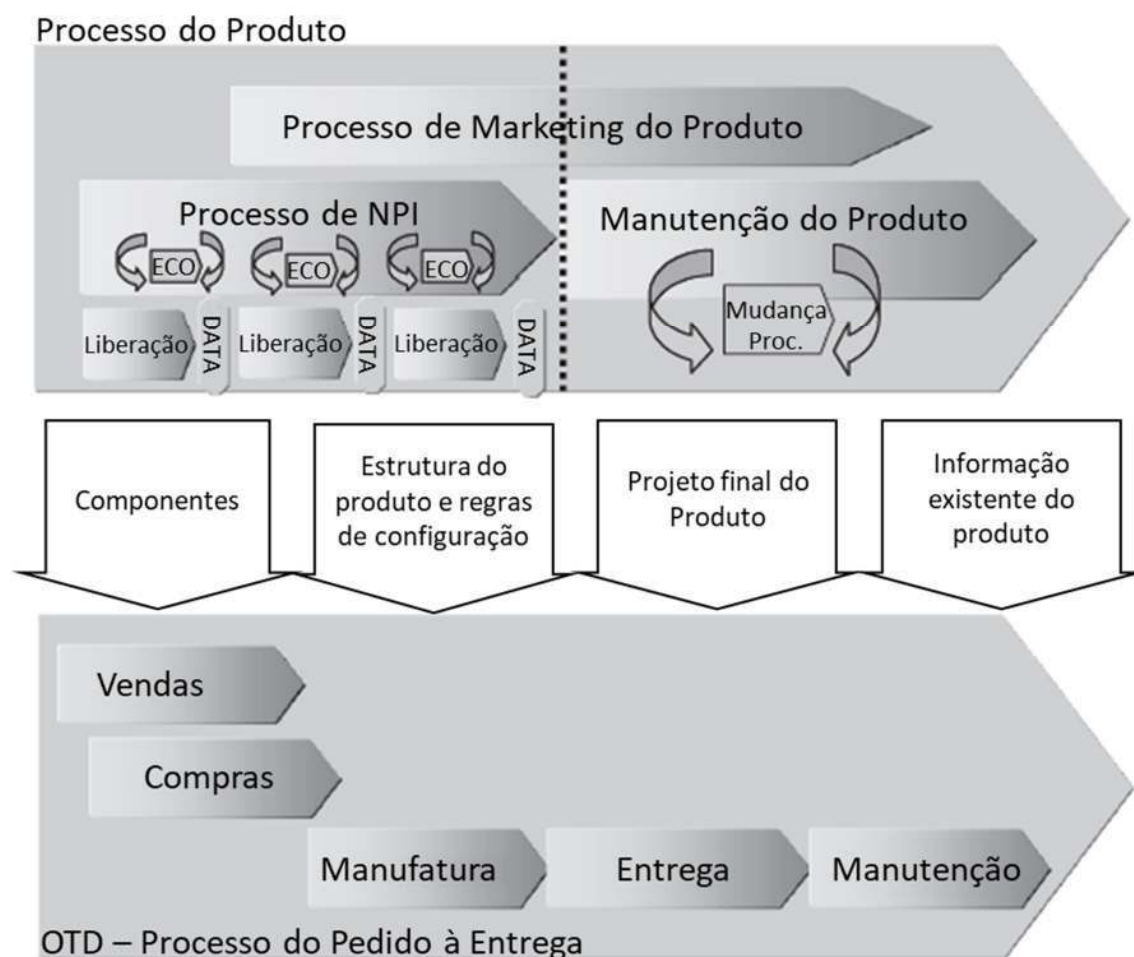


FIGURA 5 – PROCESSOS DO PRODUTO, OTD E SUAS RELAÇÕES

FONTE: SAAKSVUORI E IMMONEM, 2008

A fase do Processo do Produto é dividida em introdução (NPI – *New Product Introduction*) e manutenção da vida do produto. É responsável pelo gerenciamento das informações, a diferença entre ambos reside no seguinte escopo:

-
- NPI – focado na introdução de novos produtos no mercado, o gerenciamento de mudanças é feito através do ECO (*Engineering Change Order*);
 - Manutenção da vida do produto – focado na manutenção/atualização de produtos já introduzidos no mercado (ex.: componentes, alteração técnica na estrutura e documentação).

A etapa de Processo do OTD, fluxo de criação do produto fisicamente, contempla a entrada do pedido do cliente, recebimento das peças/componentes do fornecedor, manufatura, entrega do produto e manutenção do mesmo.

Estes dois processos centrais do ciclo de vida do produto são fortemente integrados dividindo-se em quatro fases:

- Componentes: no início da vida do produto, desenhos técnicos e estrutura dos componentes são entregues para que seja possível definir se os mesmos serão comprados de fornecedores ou fabricados internamente;
- Estrutura e regras do produto: as configurações estruturais do produto são compartilhadas com o time de vendas;
- Projeto final do produto: quando o produto chega a sua versão final de projeto, o responsável pela manufatura desenvolve um processo de manufatura para validação de versões de protótipo de produto (validação física dos requisitos) e posteriormente é produzido o piloto antes da produção massiva;
- Informações existentes do produto: após implementação, informações de mudanças no produto são transferidas para produção, assim como para o time de peças de reposição e vendas.

Em uma visão simplificada, Nafisi *et al.* (2019), define o ciclo de vida do produto em cinco fases bem determinadas:

- Ideia: a partir de um requisito do cliente (oportunidade de mercado), alinhado com a visão de posicionamento estratégico da empresa, inicia-se a análise de tornar o desejo do cliente em resultado (produto através do desenho);
- Projeto: após validação da ideia, as mesmas são convertidas em desenhos de engenharia, contemplando requisitos de dimensão, lista de componentes (*Bill of Material* - BOM), tipo de materiais e características especiais;
- Processo Manufatura: liberados os desenhos de engenharia, inicia-se o planejamento dos recursos de produção, para viabilizar a manufatura do produto. Nesta etapa é feita a introdução do ferramental de ponteamto, objeto deste estudo;
- Suporte: após manufaturado e vendido, o produto passa a ser utilizado pelo cliente, que, quando necessário, busca o suporte do fabricante;
- Descarte: após final de vida do produto, o mesmo é descartado.

A Figura 6 indica a sequência das fases do ciclo de vida de um produto.



FIGURA 6 - CICLO DE VIDA DE PRODUTO – FONTE: STARK, 2015

Entre as fases de Ideia e Projeto, e de forma similar entre Projeto e Manufatura, há o processo de revisão de projeto (*Engineering Design Review*). Esta etapa é o momento o qual os engenheiros responsáveis pelo produto planejam, criam e avaliam o projeto em relação aos objetivos e requisitos do dimensionais.

O principal propósito da revisão é avaliar o resultado previsto do projeto e tomar decisões de como o mesmo deve seguir. Nesta fase é revisada a geometria e esforços (FEA – *Finite Element Analysis*) relacionados às peças e, quando necessário, são implementadas melhorias (FREEMAN *et al.*, 2016).

Após a etapa de introdução do produto no mercado (quarta e quinta etapa da figura 6), alguns autores (MAS *et al.*, 2015; SAAKSVUORI e IMMONEM, 2008) recomendam o indicador de quantidade de produtos vendidos para decidir o momento de retirada do modelo do mercado. Este momento é determinado pela fase de declínio das vendas. A Figura 7 ilustra o ciclo de vida de um produto baseado na perspectiva das vendas.

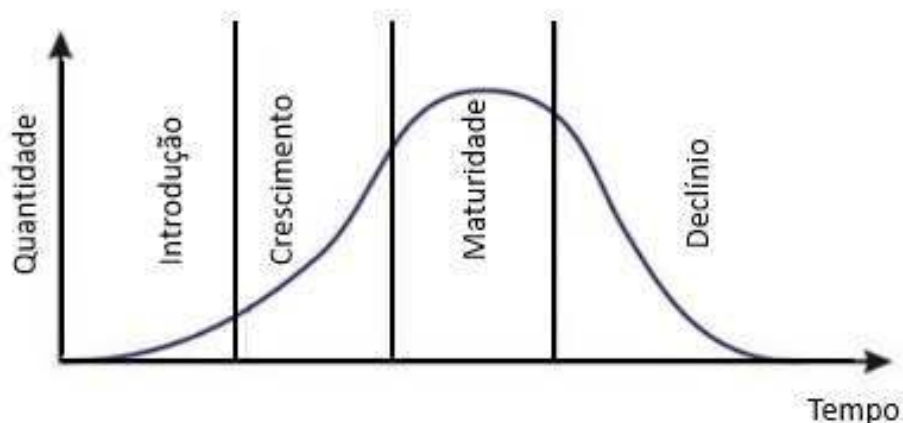


FIGURA 7 – CICLO DE VIDA DE UM PRODUTO BASEADO NAS VENDAS
FONTE: MAS ET AL., 2015; SAAKSVUORI E IMMONEM, 2008;

Cada fase do ciclo de vida na perspectiva das vendas é definida como:

- Introdução: fase onde as vendas do produto se iniciam no mercado alvo;
- Crescimento: produtos bem aceitos pelo mercado alvo, aumento das vendas;
- Maturidade: produtos já estão bem aceitos pelo mercado, atingindo seu maior volume de vendas (pico);
- Declínio: volume de vendas em tendência decrescente onde o produto pode ser retirado do mercado, ou substituído.

As constantes mudanças nos requisitos dos clientes exigem que os produtos sejam introduzidos no mercado cada vez mais rapidamente e com a qualidade

esperada. Vesey (1992) denomina este tempo, entre a ideia do produto até a disponibilidade do mesmo para venda, de *Time To Market* (TTM).

Afonso *et al.* (2008) indica que a introdução precoce do produto, antes do esperado, melhora a sua rentabilidade, possibilitando um aumento na vida útil das vendas do produto, permitindo o desenvolvimento e vantagens de custo de fabricação.

A utilização de novas tecnologias nos métodos de introdução de produtos, se comparados aos procedimentos clássicos (CIM), possuem um maior custo, porém, permitem o desenvolvimento mais rápido do produto. Conforme pode ser observado na Figura 8, o lucro aumenta em função da antecipação da introdução de um produto antes de seus concorrentes (BOTTANI e VIGNALI, 2018; NAFISI *et al.*, 2019):

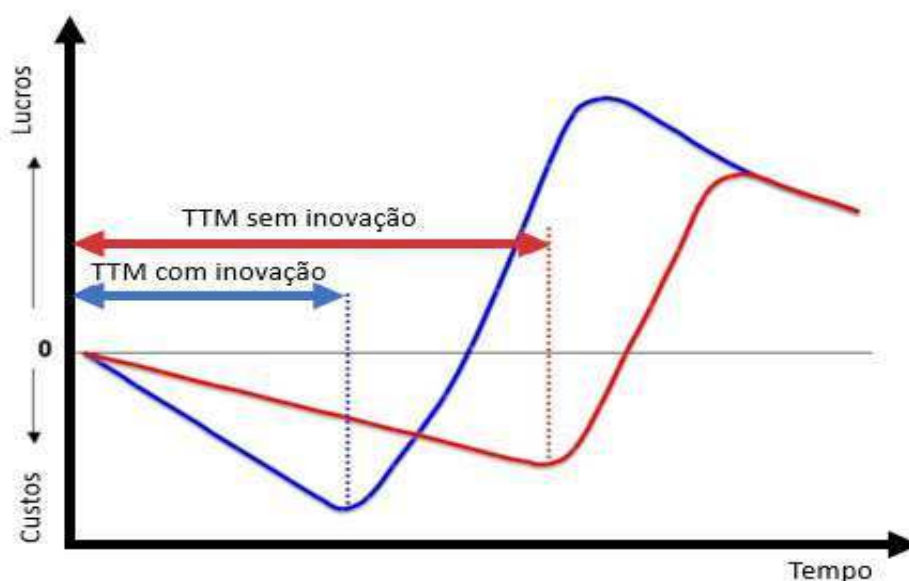


FIGURA 8 - VISÃO TTM COM INOVAÇÃO VERSUS SEM INOVAÇÃO
FONTE: SAAKSVUORI E IMMONE, 2008; NAFISI ET AL. (2019);

Alinhado com o objetivo deste trabalho, a mudança no método de validação dos ferramentais de ponteamto possibilita a introdução do processo mais rapidamente (conforme indica curva "TTM com inovação"), possibilitando

maiores lucros.e eliminando a lacuna da aplicação apenas em projeto de produtos.

Conforme indicado na Figura 6, a manufatura é parte fundamental do ciclo de vida do produto, as informações do PLM, bem integradas entre a engenharia de produto e manufatura, facilita que as alterações em componentes, no plano de introdução de novos modelos e mudanças em versões projetos possam chegar aos procedimentos de desenvolvimento de ferramentais de ponteamento em tempo hábil, evitando retrabalho desnecessários.

2.2. MANUFATURA DO PRODUTO

Jacobsen *et al.* (2002) define manufatura como sendo um sistema viável e ágil que transforma especificações de produto, expectativas do mercado, e matéria prima em produto final. Na transformação é utilizado um fluxo de trabalho, ferramentais de ponteamto adequados e controle de processos.

Bortolini *et al.* (2018) define fluxo de trabalho como sendo uma maneira pela qual as tarefas individuais se juntam para representar um processo de negócios claramente definidos dentro de uma empresa.

Benkamoun et. Al. (2014) define que dados das atividades de produção podem ser divididas em três grupos (Figura 9):

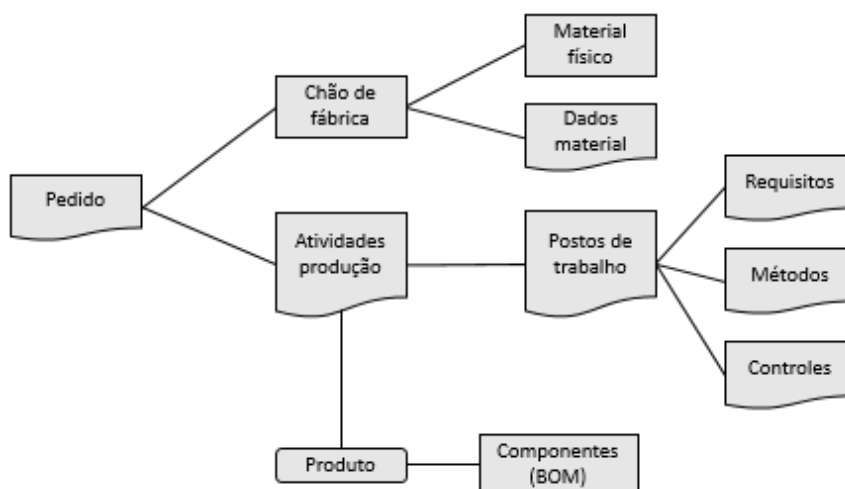


FIGURA 9 - ORGANIZAÇÃO DA PRODUÇÃO

FONTE: ADAPTADO BENKAMOUN ET AL., 2014

- Dados dos produtos: contêm as informações relacionadas às características críticas do mesmo, indicando qual dimensão deve ser alcançada ao longo do processo produtivo;
- Dados dos métodos: neste grupo estão inclusas as instruções relacionadas aos métodos utilizados no processo fabril, assim como também planos de processamento;

- Dados de controle: contempla as informações relacionadas ao controle produtivo, informando sequência de produção, controle de tempos e também controle do quadro de funcionários.

Ferramentais de ponteamto, objeto de estudo desta dissertação, classificam-se como “dados dos métodos”, estes dispositivos são utilizados para garantir repetibilidade de produção através do trabalho padrão e serão detalhados a seguir.

Portanto, conforme indica Benkamoun *et al.* (2014) e Danese *et al.* (2017), o processo de planejamento de manufatura, que contempla as atividades anteriores à implementação do sistema que une características de produto e seu processo de realização pelo sistema de fabricação, são fundamentais no processo de concepção do sistema ideal, assim como, as seleções corretas dos métodos de produção, recursos e arranjos apoiam o processo de planejamento, possibilitando um sistema produtivo enxuto.

2.2.1. PLANEJAMENTO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E FERRAMENTAL

Para que uma organização desenvolva um processo que atenda à especificação de projeto, a fabricação de cada peça e dos componentes devem ser planejados a ponto de garantir o resultado correto, e rentável, da implementação (LUNDGREN *et al.*, 2018).

Um planejamento de processo de produção analisa e define todos os recursos necessários (máquinas, *setups*, especificação de ferramentas, tempos estimados, etc) para converter matéria prima em produto (DENKENA *et al.*, 2007). Em algumas empresas, após definido todo o roteiro produtivo e inserido dentro do CAPP (*Computer-Aided Process Planning*), o processo é liberado para execução (IVANOV *et al.*, 2016).

De forma macro, o fluxo para criação de um novo processo, deve seguir os passos conforme indicado na Figura 10:

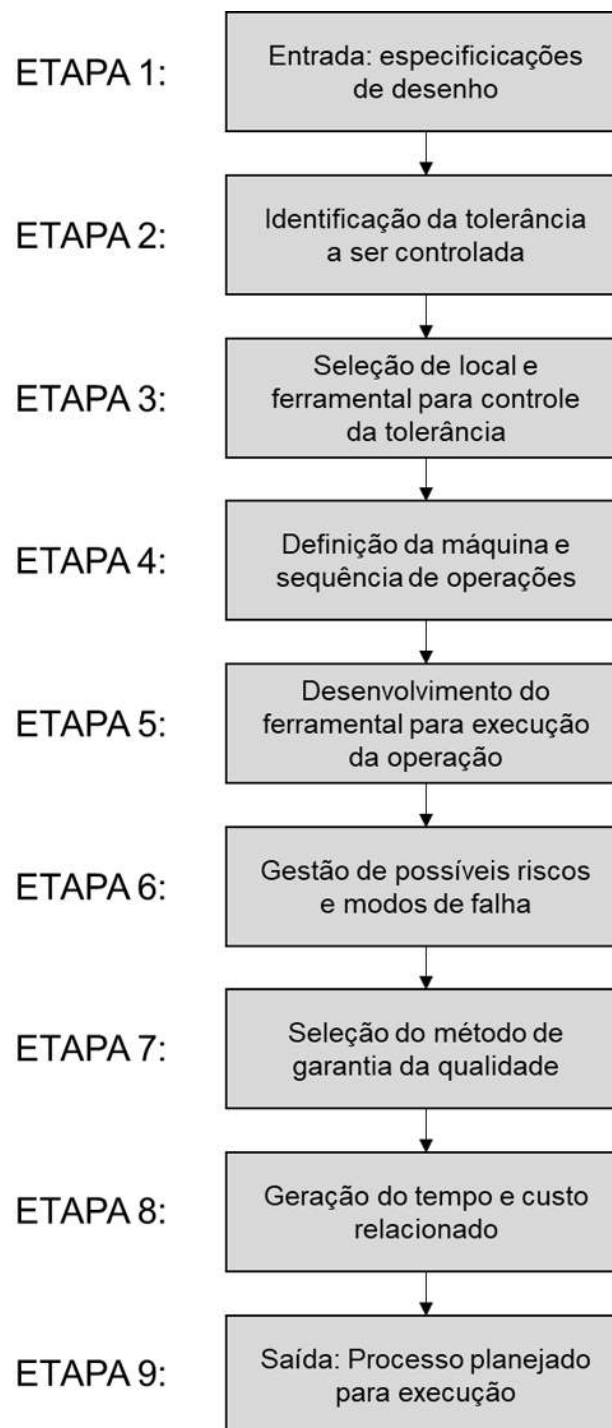


FIGURA 10 - PROCESSO MACRO INTRODUÇÃO PROCESSOS

FONTE: HALEVI, 2003; NAFISI ET AL., 2019

Mesmo considerando que as etapas da Figura 10 sejam executados de forma correta, só haverá a validação do processo criado durante a produção da primeira peça, processo conhecido como piloto (SCALLAN, 2002).

Visando definir o escopo desta dissertação, é na etapa três da Figura 10 que inicia-se a necessidade de desenvolver o dispositivo de ponteamento adequado.

Li (2009) define ferramental como sendo um dispositivo que localiza, fixa e mantém os componentes de uma peça em produção durante o processo de ponteamento, garantindo a qualidade dos produtos manufaturados por meio da padronização da sequência de posicionamento dos componentes, redução do tempo de ciclo através da repetibilidade dos dimensionais e, por consequência, reduzindo o custo final da peça.

De forma complementar, na visão de Gameros *et al.* (2017) e Forstmann *et al.* (2017), os ferramentais possuem os seguintes requisitos, conforme indicado nos Quadros 1 e 2.

QUADRO 1 – REQUISITOS PADRÃO DO FERRAMENTAL DE PONTEAMENTO

Requisitos	Exemplos de funções
Requisitos padrão	Localizar e orientar o componente no espaço Euclidiano através da remoção dos graus de liberdades adequados. Os pontos de contato entre peça e dispositivo são chamados de localizadores, independente do dimensional e peso (estratégia de localização)
	Manter a peça na posição contra qualquer força que tente mover os componentes (estratégia de aperto)
	Ser à prova de erros (conceito <i>Poka Yoke</i>) evitando montagem incorreta
	Evitar danos físicos aos componentes
	Garantir organização da área

Fonte: Gameros *et al.* (2017) e Forstmann *et al.* (2017)

QUADRO 2 – REQUISITOS ESPECÍFICOS DO FERRAMENTAL DE PONTEAMENTO

Requisitos	Fator	Exemplos de funções
Requisitos Específicos	Tolerância	Respeitar a tolerância do componente mantendo o dispositivo dentro de suas tolerâncias dimensionais
	Estabilidade	Garantir a estabilidade da peça durante o processo de montagem
		Evitar danos na peça e no dispositivo através do aperto adequado
		Minimizar a deformação da peça em processo durante procedimento de ponteamento
	Custo/Tempo	Baixo custo de aquisição
		Permitir tempos adequados de montagem e desmontagem do dispositivo
		Permitir tempos de processos adequados
	Prevenção de colisão	Evitar contato incorreto entre peça e dispositivo
		Restringir áreas de contato entre peça e dispositivo somente nos locais adequados

Fonte: Gameros *et al.* (2017) e Forstmann *et al.* (2017)

Como os ferramentais retêm os movimentos das peças, vários métodos de localização foram criados para restringir os graus de liberdade, o mais utilizado é o princípio do 3-2-1 (Figura 11), fazendo a definição do primeiro plano com três pontos de referência, seguido de dois pontos no segundo plano e, por fim, um ponto (IVANOV *et al.*, 2019).

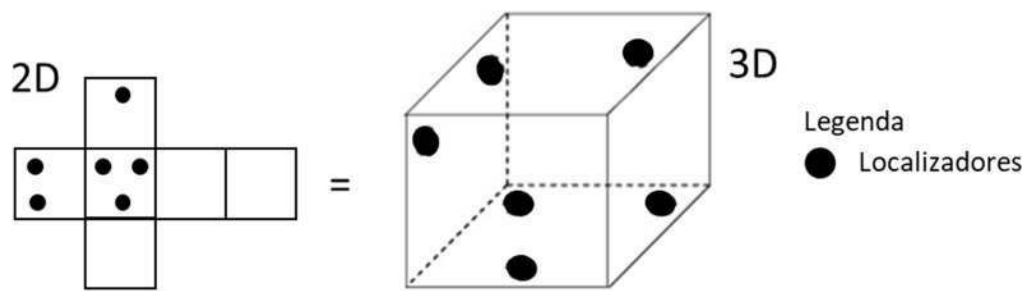


FIGURA 11 – PRINCÍPIO DE 3-2-1
FONTE: ADAPTADO JIANG ET AL., 2013

A utilização de CAD para criação de ferramentais, conhecido como CAFD (*Computer-Aided Fixture Design*), é amplamente aplicada em desenvolvimento de dispositivo de usinagem, porém, ainda pouco utilizado em processos de ponteamto. Em ambos casos, seguem as seguintes etapas (ANDERSEN *et al.*, 2017):

- Planejamento de utilização: analisar a peça e os dados de projeto para determinar a posição adequada dos planos dos localizadores para que a operação seja executada;
- Planejamento do ferramental: geração dos requisitos de posicionamento (pontos de contato e suporte) para um parâmetro de manufatura e plano de fixação;
- Projeto do ferramental: detalhamento do projeto do dispositivo com um parâmetros de manufatura e plano de fixação;
- Verificação: teste do projeto do dispositivo. Esta etapa pode ser realizada antes do projeto de ferramental com o objetivo de avaliar viabilidade do conceito.

Apesar de sistemas CAD/CAM serem mais utilizados na validação de ferramentais, a avaliação correta ainda é dependente do conhecimento humano, podendo levar até 10 anos para se desenvolver um bom projetista (WANG e RONG, 2008; JIANG *et al.*, 2013).

Para garantir a robustez e repetibilidade das peças devem ser utilizados, durante o desenvolvimento do processo e ferramental, métodos de previsão de riscos, e possíveis não conformidades, os quais auxiliam na identificação das falhas antes de sua ocorrência na fase de piloto.

Um método bastante difundido é o *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), o mesmo auxilia na predição de possíveis modos de falha e identificação das causas raízes (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Segundo manual APQP (2008) da *Automotive Industry Action Group* (AIAG), entre a fase de protótipo e piloto do produto, conforme indica a Figura 12, é recomendado a execução do FMEA de processo antes do início da produção.

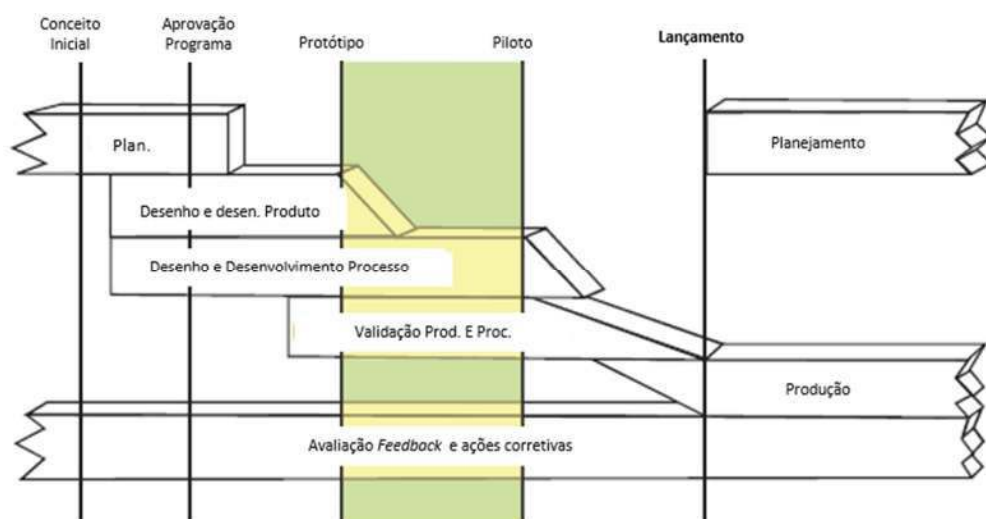


FIGURA 12 - DIAGRAMA DE FASES APQP

FONTE: MANUAL APQP, AIAG, 2008

Conforme apresentado na Figura 12, o FMEA é uma ferramenta de previsão utilizada para definir, identificar e eliminar falhas conhecidas ou potenciais de projeto, conceito e processos, antes que estas atinjam o cliente (LEAL *et al.*, 2006).

Ao utilizar o FMEA para analisar os possíveis modos de falhas para um processo, a ferramenta passa a ser chamada de PFMEA (*Process Failure Mode and Effect Analysis*), o qual será parte integrante do método proposto.

Segundo o manual AIAG (2008), ao se iniciar um PFMEA deve-se, primeiramente, criar o Fluxograma do processo a ser analisado. Em seguida, após levantamento dos possíveis modos de falhas, avalia-se três fatores, ocorrência (O), severidade (S) e detecção (D).

Para ocorrência é considerado o fator de partes por milhão (*PPM*) que avalia a quantidade produzida com falha, em relação às peças produzidas totais. Para auxiliar na pontuação, é utilizado o Quadro 5, encontrado no apêndice deste estudo.

Para severidade, o fator indica o quão grave é o efeito ao ocorre a falha prevista. Para auxiliar na pontuação, é utilizado o Quadro 6, encontrado no apêndice deste estudo.

Para detecção, o último fator indica a capacidade que o controle proposto tem de identificar a falha em potencial do processo, antes que a peça seja liberada para a próxima estação, para auxiliar na pontuação, é utilizado o Quadro 7, encontrado no apêndice deste estudo.

Após finalizar a pontuação dos três fatores, ocorrência (O), severidade (S) e detecção (D), é feito o cálculo do RPN (número de prioridade de risco - *risk priority number*), através da multiplicação entre os 3 resultados individuais encontrados. Os RPNs com maior pontuação, são os elementos de maior risco ao processo, sendo recomendado um plano de ação para reduzir o risco de a falha ocorrer.

Todos os resultados são lançados no formulário do PFMEA (Figura 32 – no apêndice deste estudo) e planos de ação controlados para reduzir possíveis RPN altos.

Durante o PFMEA, o qual é parte do planejamento do processo, o engenheiro de manufatura é responsável por garantir que o produto seja fabricado com a especificação correta, com o menor custo possível e no prazo acordado. Para tal, tendo como visão a redução de risco ao processo, é recomendado que o

mesmo possua as seguintes habilidades (SCALLAN, 2002; HALEVI, 2003; JIANG *et al.*, 2013):

- Habilidade para interpretação de desenhos;
- Conhecimento de materiais para manufatura;
- Conhecimento de processos de manufatura;
- Conhecimento de gabarito e ferramentais;
- Habilidades para utilizar material técnico de referência (FMEA, APQP, manuais de fabricantes e normas);
- Conhecimento relativo a custo de manufatura (matéria prima, processos e ferramentas);
- Habilidade em calcular parâmetros e custos de manufatura;
- Conhecimentos dos métodos de inspeção e de garantia de qualidade.

Apesar do FMEA auxiliar no levantamento de possíveis não conformidades, a mesma não garante que o processo implementado esteja totalmente livre de erros (KIRAN, 2017), a validação ainda será feita somente durante fase piloto, momento o qual, pela ordem cronológica de implementação, podendo gerar um maior custo e tempo de retrabalho.

2.3. TECNOLOGIAS PARA VALIDAÇÃO DE FERRAMENTAIS

Pode-se entender por tecnologia o conjunto de equipamentos, técnicas e processos necessários para transformar componentes de entrada (*input*) em produtos finais (*output*) (CHRYSSOLOURIS *et al.*, 2013).

Millar *et al.* (2018) indicam que os avanços nas tecnologias são gerados pelos seguintes fatores:

- Custo: assimilar novas tecnologias que possam tornar o processo mais barato;
- Qualidade: novas tecnologias podem aumentar a qualidade do produto;
- Cliente: mudanças constantes nas preferências dos clientes, podendo fazer produtos anteriores não serem mais atraentes;
- Novas leis: novas leis podem proibir a utilização de algumas tecnologias, gerando a necessidade de criação de novos conhecimentos;
- Recursos escassos: falta de produtos na natureza influenciam na criação de novas tecnologias.

Considerando o fator custo e qualidade, tecnologias imersivas (Realidade Virtual e Aumentada) têm sido desenvolvidas para aumentar o conhecimento sobre o produto/processo durante etapas de concepção e desenvolvimento, o que pode ser chamado de desenvolvimento digital do produto e processo (KOVAR *et al.*, 2016; WOLFARTSBERGER, 2019).

Dentre estas tecnologias têm-se a Manufatura Integrada por Computador (CIM - *Computer Integrated Manufacturing*) e as Tecnologias imersivas de realidade Virtual e Aumentada, as quais serão detalhadas a seguir.

2.3.1. CIM - COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING

O CIM é um conjunto de tecnologias, já consolidadas e bastante difundidas, que consiste na aplicação de computadores que utilizam de ambientes de desenho 2D e 3D em substituição aos métodos manuais (NOVAK *et al.*, 2013).

As tecnologias que fazem parte do CIM destacam o CAD/CAM/CAE. Para melhor entendimento dos papéis que estas tecnologias possuem, deve-se dividir o ciclo do produto em duas fases, projeto e manufatura, conforme indica Figura 13 (LEE, 1999; WANG e BI, 2018).

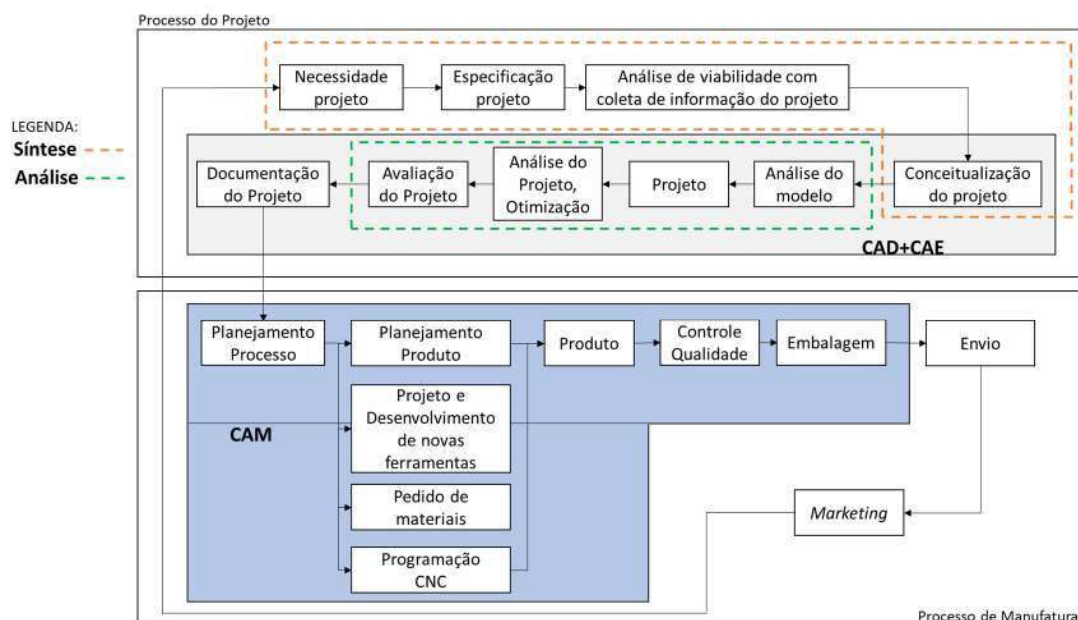


FIGURA 13 – CICLO DO PRODUTO

FONTE: TRADUZIDO DE LEE, 1999

O desenvolvimento de Projeto, etapa anterior à manufatura, se inicia a partir da demanda do cliente, identificada pela área de *marketing*, e finaliza com a entrega das especificações do produto. Esta fase é caracterizada por duas partes e atualmente já utilizam tecnologias imersivas para validação virtual (FREEMAN *et al.*, 2016, BERG e VANCE, 2016):

- Síntese: tem como resultado um projeto conceitual em forma de rascunho e o estudo de viabilidade do mesmo;

-
- Análise: a partir do projeto conceitual, são removidos detalhes desnecessários (chapas superdimensionadas) e otimizados os requisitos necessários, garantindo análise de elementos finitos, etc.

Após definição do projeto do produto, inicia-se o processo de manufatura, o qual termina com o embarque da máquina produzida.

As tecnologias assistidas por computador, são detalhadas a seguir:

- CAD (*computer aided design*): tecnologia a qual utiliza computadores para ajudar na criação, análise e otimização dos projetos dos produtos em estudo (CHRYSSOLOURIS, 2006). Apresenta como resultado tabelas que indicam os materiais utilizados (*bill of material – BOM*), tipos de solda a serem executas, dimensionais dos componentes e suas tolerâncias em 2D.
 - Vantagens:
 - Para validação de ferramentais, o modelo em CAD é revisado diretamente no computador buscando-se identificar possíveis falhas;
 - Promove melhor comunicação dos detalhes do projeto em execução;
 - Todo projeto criado em CAD pode ser utilizado diretamente pelos sistemas CAM e CAE (economia de tempo na conversão).
 - Desvantagens (WOLFARTSBERGER, 2019; PENG *et al.*, 2010):
 - Pessoas que não estão familiares com desenho técnico podem não entender perfeitamente os projetos, não identificando assim possíveis falhas no modelo;
 - Além de não oferecer uma simulação intuitiva completa durante a verificação do projeto, desenhos complexos podem dificultar

a percepção adequada da escala do dispositivo em estudo, conforme será apresentado no capítulo de resultados;

- **CAM** (*computer aided manufacturing*): é todo *software* utilizado para auxiliar a manufatura. É utilizado para simular/controlar as máquinas e ferramentas relacionadas ao processo de fabricação, principalmente voltado ao processo de usinagem (CHRYSSOLOURIS, 2006):
 - Vantagens:
 - Permite a geração da trajetória das ferramentas (simulação) no computador, auxiliando o programador a validar seu processo;
 - A partir da simulação feita, já é criado o programa a ser utilizado na manufatura.
 - Desvantagens:
 - Não possui muita aplicação para desenvolvimento dos ferramentais.
- **CAE** (*computer aided engineering*): faz a utilização de *software* para análises de engenharia, permitindo que o projetista simule e verifique como o produto criado irá se comportar no mundo real, permitindo que seja refinado e otimizado (CHOI *et al.*, 2015). Exemplos de utilização: análise de elementos finitos (FEA) e dinâmica computacional de fluídos (CFD).

A motivação que levou a realização deste trabalho é o alto volume de retrabalhos encontrados, normalmente durante o desenvolvimento de novos ferramentais de ponteamto ao se introduzir novos processos os quais somente utilizam suporte deste tipo de tecnologias tradicionais (CIM) para predição de não conformidades, e, por não detectar as falhas durante as validações iniciais, prolongam o tempo total de introdução do processo e o custo envolvido.

2.3.2. TECNOLOGIAS DISRUPTIVAS

Tecnologias disruptivas são aquelas que causam uma agitação na estrutura do mercado e empresas existentes por serem mais baratas, simples e muito mais convenientes se comparado às tecnologias atuais dominantes (SCHUELKE, 2017).

Segundo estudos recentes (BCG, 2018; WANG, 2018; MCKINSEY, 2013) com o avanço da Internet das Coisas, soluções em nuvem, inteligência artificial e monitoramento de informações em tempo real, os mundos real e virtual estão se fundindo, numa transição intitulada como a quarta revolução industrial, ou Indústria 4.0. Um dos principais objetivos desta revolução é cada vez mais vincular o mundo digital, virtual e real (WOLFARTSBERGER, 2019; CHOI et al., 2015)

A visão para esta transformação resume na integração de tecnologias conhecidas como disruptivas, indicadas na Figura 14.



FIGURA 14 - SISTEMAS INTEGRADOS INDÚSTRIA 4.0

FONTE: BCG (2018)

Segundo Kovar *et al.* (2016), a Indústria 4.0 lida com a conectividade de todas as partes da máquina (sistemas físicos, sensores, atuadores, hardware, software, etc) através de redes de dados integradas, as quais permitem, com utilização de tecnologias imersivas (Realidade Virtual – VR e Realidade Aumentada – RA), o monitoramento de dados operacionais e relatórios em tempo real.

Além disso, indicam os mesmos autores, que as tecnologias imersivas (RV e RA) podem efetivamente reduzir custos e tempo durante o projeto de novas máquinas.

As grandes vantagens relacionadas são a possibilidade de testar vários cenários, e fatores, sem que haja a necessidade de criação da estrutura física, evitando a validação somente quando da produção física do objeto em estudo.

Como indicador de maturidade de tecnologias, o Gartner's *Hype Cycle* (2017) avalia novas tecnologias, e classifica em 5 etapas conforme indica a Figura 15.

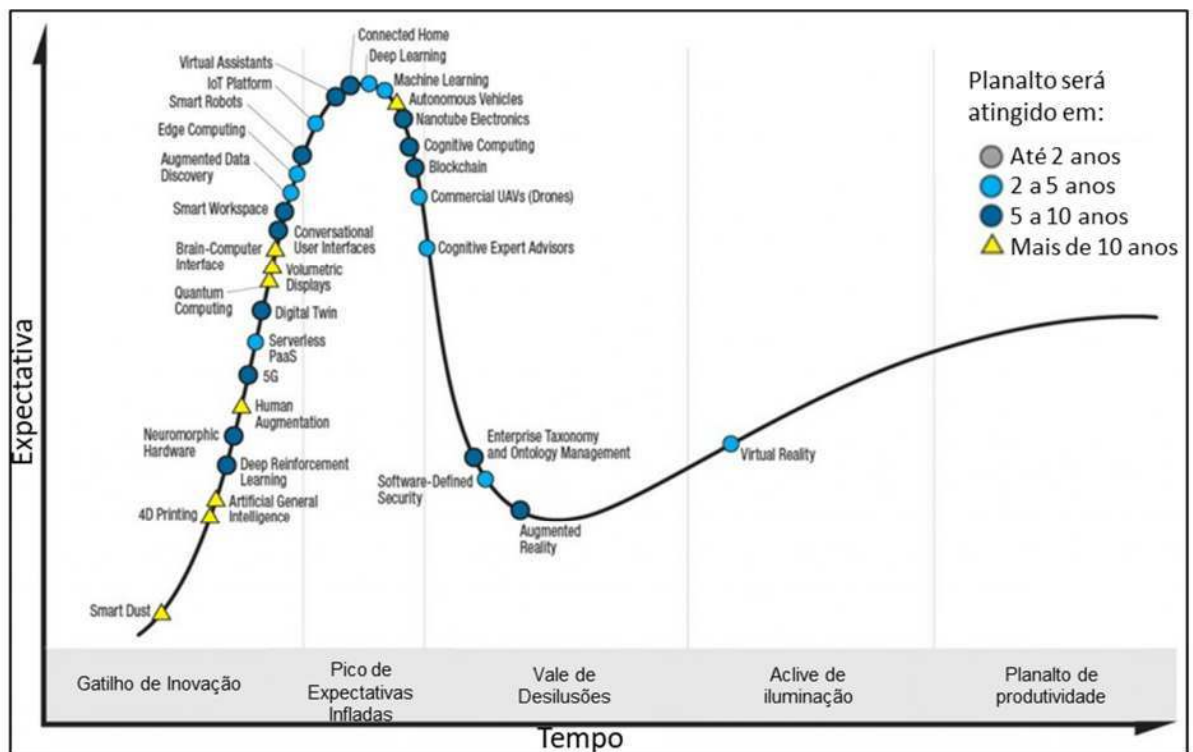


FIGURA 15 - GARTNER'S HYPE CYCLE

FONTE: GATNER, 2017.

Salimi (2018) e Dedehayir (2016) detalham as 5 fases:

1ª Fase: Gatilho de Inovação (*Innovation Trigger*) – introdução da nova tecnologia por um anúncio público ou demonstração. Nesta fase se captura a imaginação dos usuários o que leva a um rápido aumento nas expectativas.

2ª Fase: Pico de Expectativas Infladas (*Peak of Inflated Expectations*) – fase pela alta expectativa. Nesta fase, as empresas investem sem ter uma visão clara dos benefícios.

3ª Fase: Vale de Desilusões (*Trough of Disillusionment*) – fase na qual o entusiasmo passou e/ou desempenho esperado não foi atingido. Esta fase é determinante para a sobrevivência da tecnologia, a partir deste ponto elas caem em desuso ou receberam melhoras para sobreviver ao mercado.

4ª Fase: Aclive de iluminação (*Slope of Enlightenment*) – fase onde os produtos sofreram melhorias e continuaram disponíveis no mercado. Estas melhorias aumentam o desempenho das tecnologias e começam a gerar retornos. A tecnologia começa a ser socializada.

5ª Fase: Planalto de produtividade (*Plateau of Productivity*) – consolidação no mercado, a aceitação da tecnologia é avaliada realisticamente e passa a ser utilizada no dia a dia.

Por serem classificadas como inovações em estado avançado de maturidade (GARTNER HYPE CYCLE, 2017), as tecnologias imersivas (RV e RA) foram as selecionadas como possíveis soluções para validação e desenvolvimento virtual de ferramentais, ambas estão sendo largamente utilizadas para desenvolvimento de projetos de produtos (WOLFARTSBERGER, 2019), porém, ainda são pouco utilizadas para validação de ferramentais de ponteamento.

2.3.2.1. TECNOLOGIAS IMERSIVAS

Segundo Freeman (2016), tecnologias imersivas podem ser definidas como ambientes que misturam a fronteira entre os mundos físico e virtual e permite aos usuários experimentar uma sensação de estar imerso em uma realidade paralela.

Para melhor entendimento destas tecnologias, Milgram e Kishino (1994) propuseram o conceito de realidade-virtualidade contínuo, conforme indicado na Figura 16:

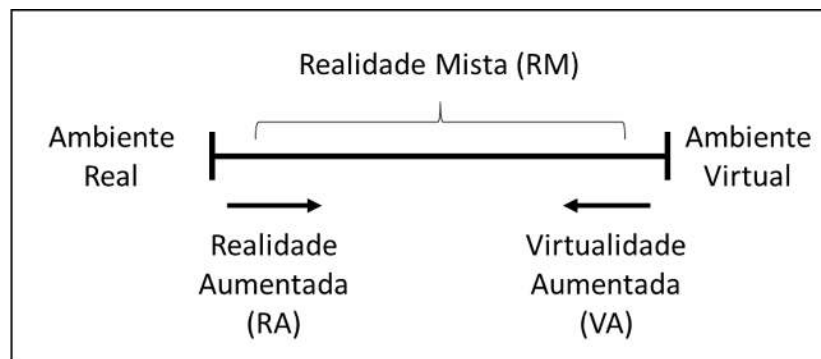


FIGURA 16 - REALIDADE E VIRTUALIDADE CONTÍNUO

FONTE: TRADUZIDO DE MILGRAM E KISHINO (1994)

Conforme indica a Figura 16, pode-se considerar dois extremos: de um lado o “real” e do outro o “virtual”. Próximo à extrema esquerda tem-se a RA a qual projeta objetos virtuais nos ambientes reais. De forma oposta, na extrema direita tem-se a Realidade Virtual (RV), a qual possibilita a criação de ambiente totalmente virtual onde seja possível o usuário interagir e navegar sem influência do mundo real.

Entre estes 2 extremos, há a RM, que, segundo Kovar *et al.* (2016), possibilita a co-existência entre objetos reais e virtuais de forma simultânea.

Para que haja a imersão desejada, há a necessidade de utilização de hardwares que possam auxiliar no processo de estímulo sensorial.

Considerando-se monitores, que buscam imergir através da visão, encontra-se dispositivos de mão (*hand-based display*), dispositivos de cabeça (*head-mounted display- HMD* – exemplificado na Figura 17) e dispositivo estáticos (POLYS *et al.*, 2011; GOH *et al.*, 2016; ZHAO *et al.*, 2016).



FIGURA 17 - HMD SAMSUNG ODYSSEY

FONTE: SAMSUNG, 2019.

Considerando-se a imersão auditiva, pode-se encontrar dispositivos estáticos (caixas de som externa) ou dispositivos de cabeça (WOJCIECHOWSKI, CELLARY, 2013; LIN, 2017) representados pelos fones de ouvido da Figura 18.



FIGURA 18 - IMERSÃO AUDITIVA

FONTE: SAMSUNG, 2019.

Considerando-se imersão para o tato, provendo possibilidade de interagir com objetos virtuais (HANDA, 2012), e até mesmo “sentir” toque virtuais, conforme indica Figura 19.



FIGURA 19 - IMERSÃO DO TATO

FONTE: TACTSUIT, 2019.

Imergindo os movimentos, são considerados receptores de movimento do tipo sensor (Figura 20), visão, marcadores e híbridos (ROVIRA, SLATER, 2017; MATEU *et al.*, 2014)



FIGURA 20 - SENSOR DE MOVIMENTOS

FONTE: SAMSUNG, 2019.

Dentre estas tecnologias, a simulação conjunta de tecnologias imersivas, como realidade virtual (RV) e aumentada (AR), aplicadas a desenvolvimento e/ou validação de novos ferramentais, desde a sua concepção até a implementação, traz um fator competitivo para empresas que visam a redução do tempo de desenvolvimento e validação dos processos de manufatura de componentes (MOURTZIS *et al.*, 2014).

Como o ciclo de vida dos produtos está reduzido, para que haja sucesso ao se introduzir um novo ferramental, fazendo certo da primeira vez, é fundamental que o conhecimento flua adequadamente a todos envolvidos na cadeia em todos os estágios do desenvolvimento, incorporando as considerações dos participantes e possibilitando a otimização nos estágios iniciais de desenvolvimento, onde o custo é ainda barato (KUTIN *et al.*, 2018).

Segundo Lu *et al.* (1999), os principais desafios técnicos na criação de um processo em empresas globais, podem ser classificados em três categorias:

- **Disciplinar:** para o desenvolvimento do processo são necessários colaboradores que possuam conhecimentos de áreas distintas, ou seja, um time multidisciplinar, contribuindo com visões diferentes para um mesmo ponto focal;
- **Geográfico:** o desenvolvimento do processo ocorre em locais diferentes, que possuam regras distintas ou onde o responsável pela aprovação possa estar longe;
- **Temporal:** nem toda informação ou ferramenta estará disponível no lugar e hora adequados e, neste mundo conectado, tem-se colaboradores trabalhando em locais diferentes no mesmo projeto.

Soluções de realidade aumentada e virtual (VAR – *Virtual and augmented reality*), que podem auxiliar em reduzir a distância geográfica e conectar pessoas simultaneamente, aumentam produtividade e, por consequência, ajudam os componentes de custo, qualidade e TTM.

A utilização destas tecnologias permite a visualização dos ferramentais em desenvolvimento através da validação em ambientes virtuais.

Classificada pelo *Gartner's Hype Cycle* (2017) na fase de Vale de Aclive de iluminação e em 2019 em Planalto de produtividade, a RV é uma tecnologia criada durante a década de 60.

A palavra “realidade” faz referência à vivência, utilizando capacidades sensoriais, de um mundo físico. A definição do dicionário para a palavra “virtual” é “Não real; simulado eletronicamente”. Quando combinadas, portanto, a palavra “realidade virtual” sugere um local virtual (que pode ser uma cópia digital do mundo real) que concilia capacidades sensoriais humanas (ONG, NEE, 2004; SALIMI, SALIMI, 2018).

Em outras palavras, tecnologia RV cria um ambiente em que o cérebro humano, e as funções sensoriais, são acoplados tão fortemente com o computador que o usuário sente estar se movendo dentro do mundo virtual como se fosse o mundo real (BERG, VANCE, 2016).

Desta definição pode-se entender que o resultado desta sinergia está focado na interface entre o homem e a máquina, cujos atributos devem ser: imersiva, interativa, intuitiva, em tempo real, multissensorial, vista da posição do usuário e em 3 dimensões.

A RV é dividida em 2 categorias (KOVAR *et al.*, 2016):

- Semi imersiva: quando a realidade virtual é apresentada por uma tela de computador, um teclado e um *mouse*, sem equipamentos adicionais imersivos;
- Imersivos: quando há a utilização de equipamentos imersivos os quais acompanham o movimento do usuário através de sensores.

Para os requisitos deste trabalho, será utilizado a segunda categoria, e serão consideradas as 3 seguintes características (LU *et al.*, 1999) que a aplicação de ambientes de RV devem atender:

-
- Imersivo: faz referência ao usuário sentir que o ambiente em questão é real, quanto maior a sensação de imersão, maior a dificuldade de identificar qual ambiente é “real” e qual o “virtual”;
 - Navegação: faz referência à capacidade de se mover e explorar no ambiente criado;
 - Interação: está relacionado à habilidade de interagir (pegar, transportar, posicionar, etc.) dentro do ambiente criado.

Alguns modelos de RV como *CAVE* (sala fechada onde as projeções do ambiente são feitas nas paredes) e HMD existem desde os anos 90, porém, devido às barreiras de alto custo e necessidade de espaço físico, a tecnologia ficou restrita a pouco adeptos. Devido ao aparecimento de dispositivos de baixo custo e portáteis, tornou-se possível o acesso a um número maior de pessoas e, conseqüentemente, ao aparecimento de novas pesquisas e novos campos de aplicação (FREEMAN *et al.* 2016).

Para a utilização desta tecnologia são necessários recursos básicos para criação/armazenamento, manipulação, simulação e apresentação:

- Um ambiente de desenvolvimento para criar e armazenar todas as informações necessárias dentro do computador;
- Um dispositivo de entrada para que seja possível o usuário manipular e interagir com o modelo virtual;
- Capabilidade dinâmica de sistema para gerar realismo ao ambiente em simulação, sob diferentes interações;
- Sistema de alta fidelidade com saída multissensorial para processar e retroalimentar o que foi criado e manipulado em tempo real.

As vantagens em sua utilização: ambientes virtuais podem trazer um alto grau de imersão ao usuário. Os artigos encontrados que apresentam os principais

benefícios de sua utilização, aplicados aos processos de manufatura/design estão listados de forma resumida no Quadro 3 no final desta seção.

Desvantagens em sua utilização:

- Para se criar uma representação do mundo real, com alto grau de credibilidade (mundo virtual equivalente ao simulado), é necessária a criação de um ambiente virtual completo, o qual consome muito tempo e dinheiro (WOJCIECHOWSKI, CELLARY, 2013).
- Não há relação física entre o usuário e o conteúdo virtual de forma que o usuário não possui influência sobre o ambiente criado, reduzindo a sensação de imersão, que pode causar sintomas de náusea durante a utilização (Li *et al.*, 2017).

A realidade aumentada (RA), classificada pelo *Gartner's Hype Cycle* (2017) na fase de Vale de Desilusões, é considerada uma variação da RV, a principal diferença reside na característica da imersão.

A realidade aumentada não utiliza ambientes virtuais, tendo como objetivo apresentar elementos virtuais (ativado ao se identificar o marcador) em um ambiente real o qual pode ser visto utilizando um dispositivo (conceito *See Through Device* – STD) possibilitando ao usuário interagir com objetos reais e virtuais ao seu entorno (ONG, NEE, 2004; SALIMI, SALIMI, 2018), conforme indicado na Figura 21.

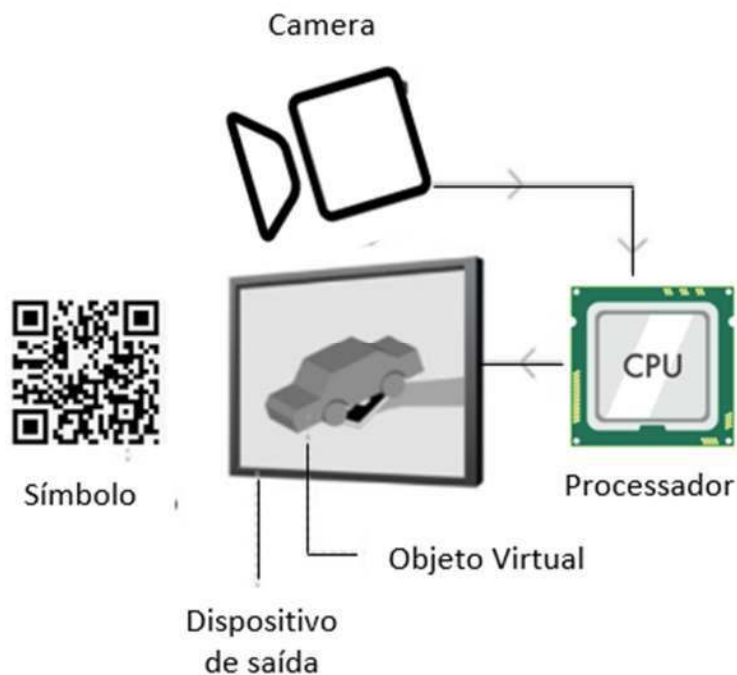


FIGURA 21 - CONCEITO BÁSICO RA

Muitos projetos pilotos indicam que a tecnologia RA pode ser considerada madura para aplicação em manufatura (PAULUS *et al.*, 2015; PALMARINI *et al.*, 2018; NOVAK *et al.*, 2013; ELIA *et al.*, 2016).

O fluxo de funcionamento de sistemas RA segue 5 passos:

- Captura da imagem;
- Processamento da imagem;
- Manipulação da interação;
- Gerenciamento de informações de simulação;
- Renderização (processo para se obter o produto de um processamento digital).

Por não utilizar ambientes virtuais complexos como a RV, os desenvolvedores de RA têm como vantagem utilizar um menor tempo de criação, e, por consequência, é exigido do dispositivo de leitura menor processamento gráfico.

Com o aumento da capacidade de processamento de dados trazido pelo avanço da tecnologia, foi possível transferir as soluções de AR dos computadores para pequenos dispositivos (ex.: *tablets*, celulares e etc.), até mesmo óculos (dispositivos conhecidos como *Head-mounted Display* – HMD), conforme mostra a Figura 22 (AZUMA *et al.*, 2001):

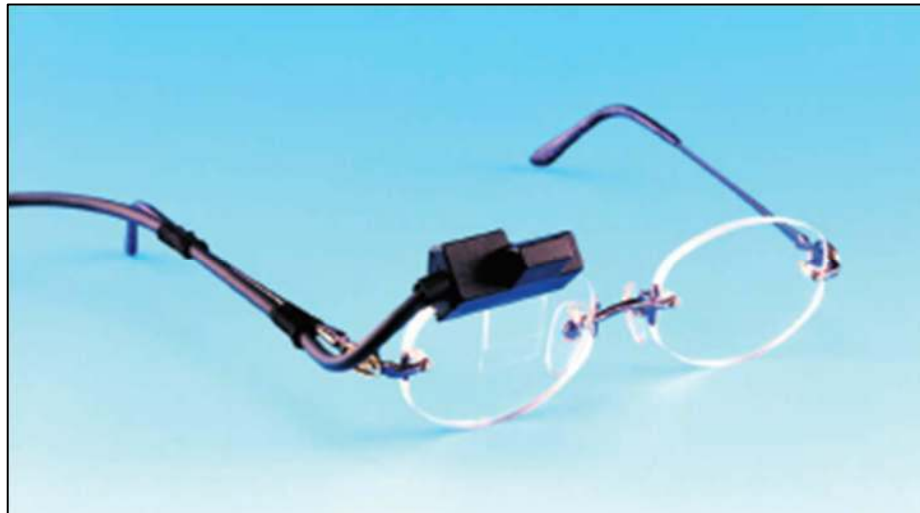


FIGURA 22 - EXEMPLO DISPOSITIVO HMD

FONTE: AZUMA ET AL., 2001

Segundo Elia *et al* (2016), as áreas da manufatura que mais utilizam sistema de AR são:

- Projeto de produto: referente a processo de conceitualização do projeto e suas interações com o ambiente de manufatura;
- Projeto, planejamento e controle de processo: referente à parte tática através projeto do processo de manufatura, e operacional através da programação de processos de usinagem.
- Manutenção do equipamento: levantamento de informações relacionadas à manutenção dos equipamentos.

Vantagens em sua utilização: Nas áreas de engenharia citadas anteriormente, por projetar informação virtual em ambientes reais, a RA pode facilitar o entendimento e execução de atividades informando sequência de execução de

atividades e trazer informações em tempo real, atividades as quais não seriam possíveis sem a intervenção humana (Li *et al.*, 2017). O Quadro 3, no final desta seção, indica algumas aplicações encontradas na literatura da utilização de RA aos processos de manufatura/design.

Desvantagens em sua utilização (DACTU *et al.*, 2015):

- O sistema de rastreamento é dependente de iluminação adequada para leitura correta do marcador;
- A posição/ângulo do marcador deve estar adequados para a ativação da RA;
- Dependendo da tecnologia utilizada, pode ser necessário utilização de uma das mãos para segurar a câmera (dispositivo não HMD);
- É mais utilizado quando se tem o objeto real em estudo, não é muito eficaz quando é necessária uma maior interação com o modelo (ESCHEN *et al.*, 2018).

Quadro 3 – Quadro resumo da utilização de RV, RA e CAD em projetos de produtos e na manufatura (V – velocidade, Q – qualidade e C – custo)

Autor	Ano	Tecnologia	Aplicado em	Benefício			Comentário
				V	Q	C	
Stark <i>et al.</i>	2010	RV e CAD	Projeto	X	X	X	RV permitiu melhor identificação de erros em estágios de desenvolvimento do projeto.
Seth <i>et al.</i>	2011	RV e CAD	Processo	X	X	X	RV permitiu prototipagem virtual (identificação de interferência, ergonomia e teste de cenários) com melhor resultado se comparado ao método CAD.
Gavish <i>et al.</i>	2013	RV e RA	Processo		X	X	Confirma que a utilização de treinamentos em RV e RA para manutenção industrial e atividade de montagem, gerou queda nos defeitos.
Gamlin <i>et al.</i>	2014	RV	Projeto	X		X	RV permitiu identificação de perdas, simulação de cenários e melhor tomada de decisão
Yap <i>et al.</i>	2014	RV	Projeto	X	X	X	Prototipagem virtual de projeto auxiliou na identificação de melhorias sem possuir a máquina física.
Berg e Vance	2016	RV	Projeto	X	X	X	Uso industrial da RV em projetos permitindo a redução no tempo de introdução de novos produtos.
Dalle-Mura <i>et al.</i>	2016	RA	Processo		X		RA permitiu a identificação de defeitos no momento em que ocorreram (<i>Poka yoke</i>)
Doshi <i>et al.</i>	2016	RA	Processo		X		RA permitiu redução nos defeitos
Freeman <i>et al.</i>	2016	RV e CAD	Projeto	X	X		Utilização RV permitiu redução no tempo total de avaliação.
Kovar <i>et al.</i>	2016	RV	Projeto	X		X	RV permitiu prototipagem virtual de para validação de projetos
Langley <i>et al.</i>	2016	RV	Processo	X	X	X	RV permitiu redução no tempo de execução e redução de defeitos
Wang <i>et al.</i>	2016	RA	Processo	X	X	X	Permitiu a montagem em menor tempo e prototipagem de layout físico/virtual
Eschen <i>et al.</i>	2017	RV e RA	Processo		X	X	RV e RA para inspeção e manutenção na indústria de aeronaves permitiu melhor identificação de defeitos.
Madathil, Greenstein	2017	RV	Projeto	X	X	X	Permitiu a validação do projeto por pessoas em outros países (menor custo com viagens)
Li <i>et al.</i>	2017	RA	Projeto	X	X	X	RA permitiu a análise de sequência de montagem, reduzindo tempo total.
Zhang, H.	2017	RV	Processo	X	X	X	Redução de tempo, redução de custos e treinamento do funcionário
Pérez <i>et al.</i>	2019	RV	Projeto	X	X		Permitiu a análise do projeto de layout e participação do operador para treinamento.
Wolfsartsberger	2019	RV e CAD	Projeto	X	X	X	RV permitiu identificação de erros no projeto, pessoas sem conhecimento de desenho técnico puderam contribuir com a avaliação do projeto.

Considerando empresas que já utilizam ambiente imersivos para validação de projeto de produtos, Berg e Vance (2016), fizeram pesquisa em 25 fábricas, pelo resultado da pesquisa o fluxo que normalmente as empresas seguem para implementar ambientes virtuais está indicado na Figura 23.

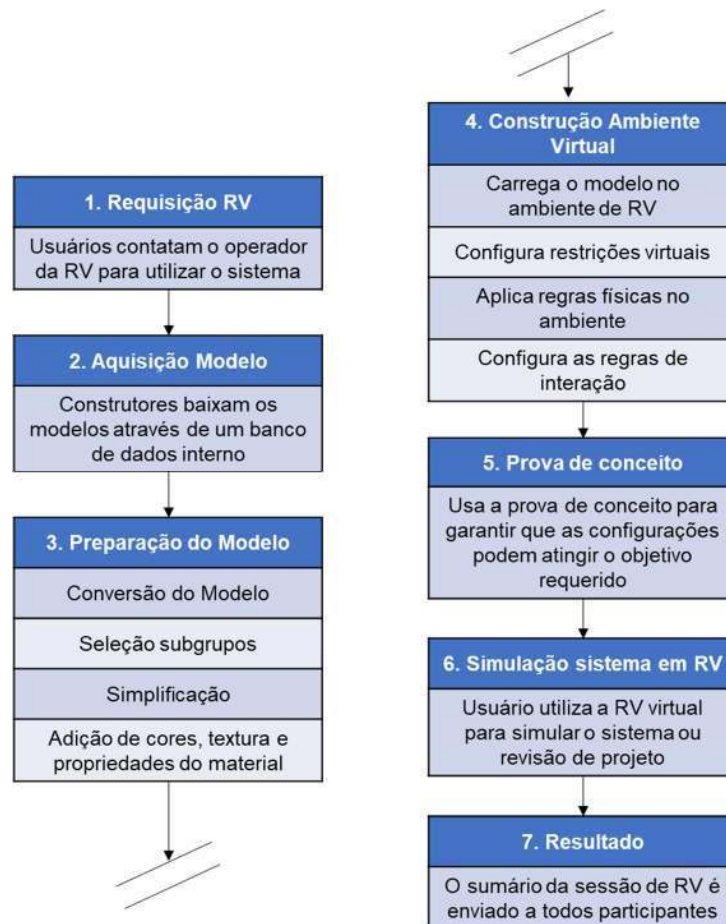


FIGURA 23 - FLUXO CRIAÇÃO AMBIENTE VIRTUAL VALIDAÇÃO DE PROJETOS (DESIGN)

FONTE: BERG, VANCE, 2016

2.3.3. SIMULAÇÃO

Após o início da chamada “era da informação”, devido ao aumento da capacidade de processamento de dados, a utilização de ambientes de simulação cresce cada vez mais (PARITALA, *et al.*, 2017).

Pode-se definir por simulação, segundo a *National Research Council* (2002), “a implementação de um modelo reflexo do mundo real”, e por modelo, uma representação lógica, física ou conceitual de um sistema real ou ideal”.

Pela definição, os ambientes virtuais criados pelas tecnologias imersivas são considerados como simulação. Mesmo não fazendo-se uso de eventos discretos nesta dissertação, o intuito deste capítulo é entender como garantir que as simulações sejam fidedignas.

Apesar da simulação ser amplamente utilizada para auxiliar na tomada de decisão em ambientes de manufatura, ainda hoje empresas aplicam somente tecnologias tradicionais como CAD (*computer-aided design*), CAM (*computer-aided manufacturing*) e CAE (*computer-aided engineering*), deixando uma grande oportunidade para introdução de novas tecnologias (Kutin *et al.*, 2018).

Modelagem sempre foi a atividade importante de qualquer sistema relacionado à engenharia. Seu objetivo nos sistemas de manufatura é possibilitar a investigação, verificação e validação dos comportamentos do sistema em um contexto definido (HARREL *et al.*, 2002).

Como resultado, o modelo de simulação, e suas reflexões, podem ser utilizados para, por exemplo, avaliar o desempenho de um sistema, avaliar alternativas de design, verificação de riscos e redução de incertezas na tomada de decisão.

Não há regras sobre como criar e implementar um sistema de simulação. No entanto, segundo Law (2007), recomenda-se a seguinte sequência:

1 - Planejar o estudo a ser realizado: definir o objetivo do estudo, limitação do escopo, definir um custo relacionado e alinhar o time envolvido.

2 - Detalhar o sistema: identificar quais são os principais componentes, assim como suas relações (fluxos, relações de dependências, etc);

3 - Construir o modelo: criação do modelo virtual considerando as características importantes para a modelagem;

4 - Rodar o experimento executando o plano de avaliação: com o sistema pronto, executar o plano de testes que se deseja avaliar;

5 - Colher os resultados: documentar os resultados encontrados;

6 - Fazer relatório: com a análise dos resultados, deve-se avaliar a significância do que foi encontrado e, a partir do mesmo, definir um plano de ação.

Apesar da sequência acima ser apresentada de forma linear, a natureza do processo é interativa, podendo ir e voltar a qualquer fase anterior.

Segundo Canedo e Richter (2014), ambientes cyber-físicos (CPS – *Cyber-physical system*) vem sendo utilizados em indústrias automotivas, aeroespaciais, energia e manufatura, sendo, dentro da indústria de automobilística, responsável por 80% das inovações através de sistemas de simulação.

Devido ao nível de complexidade dos sistemas, por conta do volume de dados a processar, é fundamental que a simulação seja confiável e robusta. Para garantir a qualidade dos modelos são utilizadas algumas ferramentas de verificação, validação e acreditação.

Validação do modelo é definida como a fundamentação que um modelo computadorizado, dentro de seu domínio de aplicabilidade, possui um intervalo de precisão satisfatório consistente com a aplicação pretendida do modelo (SCHLESINGER, 1979; GEFFRAY *et al.*, 2018).

De forma simplificada, segundo Balci (1997), a validação consiste em construir o modelo correto. Pace (2004) recomenda o seguinte questionamento “eu construí a coisa certa?”.

A verificação do modelo é definida como a garantia que o programa do modelo computadorizado, e sua implementação, estão corretos (SCHLESINGER, 1979).

A acreditação segundo Balci (1997) determina se o modelo satisfaz um critério específico de acordo com o processo em análise. Segundo o DoD (*Department*

of Defense) dos Estados Unidos acreditação é “a certificação oficial que o modelo ou simulação é aceitável para utilização em um propósito específico”.

Um modelo deve ser desenvolvido para um propósito específico (ou aplicação) e sua validação determinada com relação a este propósito. É recomendado que a precisão do modelo deva ser especificada antes do desenvolvimento do mesmo ou bem cedo dentro do processo de desenvolvimento.

Normalmente, consome-se muito tempo, e um alto custo, para determinar se o modelo está absolutamente dentro do domínio completo da aplicabilidade. Ao invés disso, testes e avaliações são conduzidas até que os resultados sejam suficientes para que o modelo possa ser considerado válido para o objetivo (SARGENT, 1998; 2009).

Em seus estudos, Balci (1997) e Liang e Wang (2018) apresentam, somando-se as contribuições, mais de 100 técnicas para VV&A, porém, a grande maioria delas é aplicável para ambientes de simulação discreta.

Sargent (2009) detalha quatro abordagens que podem ser utilizadas pelo time de desenvolvimento para verificar e validar o modelo.

A abordagem mais comum é para o time de desenvolvimento, formado por conhecimento multidisciplinar e composto de especialistas, para tomar a decisão se o modelo é válido. É uma decisão subjetiva baseada no resultado de vários testes e validações conduzidas como parte do processo de desenvolvimento do modelo.

Uma segunda abordagem, caso o time do produto seja pequeno, é o envolvimento do usuário final durante o desenvolvimento do modelo. Neste caso a validação é transferida do time de desenvolvimento para o usuário, o que auxilia na credibilidade do resultado.

Uma terceira abordagem, chamada “verificação e validação independente” (IV&V – *independent verification and validation*) utiliza de uma pessoa, ou grupo,

externo para decidir se o modelo é válido ou não. Este externo é independente dos interessados no modelo (time de desenvolvimento, patrocinador e usuário).

O método IV&V é recomendado em simulações de grande tamanho que envolvem vários times, onde a validação pode ser feita de forma faseada (validando passo a passo à medida que haja entrega parcial) ou total (somente quando a solução completa é entregue). A desvantagem desta abordagem é o custo relacionado e tempo.

A quarta abordagem para determinar a validade do modelo de matriz de pontuação (GASS, 1979; GASS, JOEL, 1987). Pontuações (ou pesos) são determinados de forma subjetiva quando conduzindo vários aspectos do processo de validação e depois combinando para determinar categoria de pontos e uma pontuação global para o modelo de simulação. O modelo só será considerado válido se a pontuação atingida na avaliação for maior que uma nota de corte, normalmente definida de forma subjetiva.

Esta quarta abordagem é muito pouco utilizada pelos seguintes fatores:

1 – A subjetividade tende a estar escondida e, portanto, parece ser objetiva;

2 – A nota de corte deve ser decidida de alguma forma (normalmente subjetiva);

3 – O modelo pode atingir a nota de corte e ainda possuir defeitos não identificados durante os testes;

4 – A pontuação pode causar excesso de confiança no modelo ou ser utilizada para comparar que um modelo é melhor que outro.

Law e Kelton (2007) propõe uma abordagem de validação e verificação para sistemas de simulação discretos, passos básicos para garantir que o modelo criado tenha validade. O fluxograma com as etapas indicadas está apresentado na Figura 24.

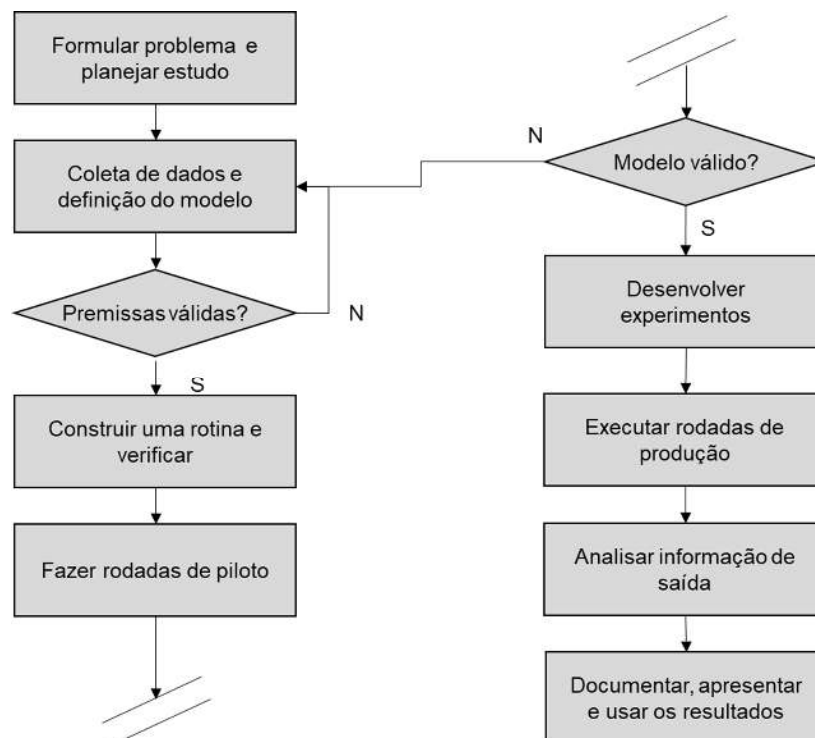


FIGURA 24 - FLUXOGRAMA DO PROJETO DE SIMULAÇÃO

FONTE: LAW, KELTON (2014).

3. MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo é dedicado à classificação da pesquisa, considerando os critérios da metodologia científica, esta dissertação pode ser definida como:

- Quanto à **natureza**: pesquisa do tipo aplicada pois busca desenvolver conhecimento para aplicar na prática (novo método);
- Quanto ao **objetivo** científico:
 - Como descritiva pois busca entender um fenômeno (retrabalhos encontrados durante processo de validação de ferramentais de soldagem utilizando CAD).
- Quanto à **abordagem**: apesar de conter dados coletados da empresa, este trabalho pode ser considerado como qualitativo.
- Quanto ao **método**: pode ser considerado como indutivo pois analisa um caso específico buscando encontrar conclusões gerais.
- Quanto a **procedimentos**:
 - Como bibliográfico pois utiliza o conhecimento científico atual como base;
 - Como documental pois utiliza fontes de informações não acadêmicas, bancos de dados e procedimentos da empresa;
 - Como estudo de caso pois faz análise profunda do objeto de estudo, sendo seguido as seguintes fases: coleta de dados, análise e interpretação das informações coletadas e redação do relatório.

As etapas seguidas nesta dissertação a serem seguidos estão indicados na Figura 25.



FIGURA 25 -MÉTODO DE PESQUISA

Para a etapa 1 de revisão bibliográfica, foram feitas pesquisas em artigos, dissertações, teses e livros, em sua maioria dos últimos 6 anos, referentes ao tema de ciclo de vida do produto, planejamento de processos, desenvolvimento de ferramentais e tecnologias de validação de produto/processos. Desta forma foi possível conhecer e aprofundar os conceitos e aplicações sobre os tópicos.

Para a etapa 2, devido a pesquisa observar os fenômenos no contexto em que se realizam, este trabalho pode ser classificado como um estudo de caso (YIN, 2001).

O estudo de caso é um método útil quando o objeto da pesquisa é amplo e complexo e não pode ser avaliado fora do contexto e tem como objetivo um trabalho empírico que busca testar uma teoria. É classificado também como analítico pois busca desenvolver novas teorias que irão confrontar teorias já existentes, proporcionando avanço do conhecimento.

Para a seleção da empresa, foi considerado o tamanho da mesma, se faz uso de ferramentais de ponteamto em seu processo produtivo de peças e a maturidade dos mesmos. Para detalhamento de seus processos foram feitas visitas para mapeamento dos processos fabris.

Portanto, como problema de pesquisa foi avaliado se a utilização de tecnologias imersivas no desenvolvimento de ferramentais de soldagem pode contribuir para a redução do retrabalho na fase de validação.

Para a etapa 3, levantamento dos processos internos, a coleta de dados utilizou duas técnicas: análise documental do sistema ISO e observação sistemática (observação das etapas do processo, os ferramentais utilizados, as dificuldades que aparecem e os resultados) através da extração das informações do sistema de gerenciamento de projetos dos ferramentais de pontejamento seguindo o seguinte protocolo de coleta de dados:

1. Extração do banco de dados contendo todas ordens de fabricação utilizando como filtro datas dentro do período de 2017 a 2019;
2. Dentro destes 2 anos, foram separados os programas de introdução de novos modelos de máquinas, que passaram neste período de tempo, pela fase de piloto e produção massiva;
3. Foram feitas leituras individuais do campo “Descrição” das ordens de fabricação para identificação se houve retrabalho ou não;

Para a etapa 4, dos 3 programas selecionados de introdução de novos produtos recentes (últimos 2 anos) para identificação do volume de não conformidades (NC), e, a partir deste levantamento, foi criado um histograma contendo os maiores responsáveis por retrabalho.

Para a etapa 5, com os fluxos de validação de ferramentais encontrados das fontes (estudo de caso e literatura), foram propostas possíveis melhorias no procedimento da empresa com a adição de etapas que contemplam a avaliação através de sistemas imersivos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para contextualização do problema de pesquisa, este capítulo será iniciado com o detalhamento da empresa do estudo de caso.

A empresa selecionada é uma multinacional de grande porte de origem americana e atua no setor de máquinas pesadas. Seu projeto de fábrica é do tipo *Single-item* onde o fabricante produz somente um produto por pedido.

A unidade fabril produz vários modelos de máquinas seguindo os seguintes processos internos:

- Processos de fabricação: soldagem, usinagem e tratamento térmico;
- Processos de pintura: grandes e pequenos componentes;
- Processos de montagem: submontagens de componentes e linha de montagem por produto;

A mesma possui um Sistema de Gestão de Qualidade próprio, atualizado em 2015 devido à ISO 9001:2015 que já estava implementado por mais de 20 anos. A empresa em questão utiliza a metodologia DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Implementar e Controlar) para propor e implementar projetos de melhoria contínua.

A empresa possui ferramentaria interna, a qual é responsável pela produção dos ferramentais de soldagem. O método corrente de introdução e validação destes ferramentais contempla a utilização de métodos tradicionais para validação em modelos em 2D (CAD) e em 3D estáticos (sem influência da gravidade nem posicionamento do operador), não se fazendo uso de tecnologias imersivas.

A partir da revisão da literatura, pode-se considerar que dentro do ciclo de vida do produto, a fase de manufatura, parte do processo de Pedido à Entrega (OTD),

é fundamental para garantia da qualidade de produto certificando que todos os requisitos de projeto sejam seguidos.

Baseado na revisão da literatura, para que os dimensionais e tolerâncias do projeto de produto sejam rigorosamente seguidos, é recomendável seguir as seguintes premissas:

- É fundamental, e estratégico, que um bom planejamento dos ferramentais ocorra para garantir a introdução rápida, e correta da primeira vez;
- Os ferramentais devem atender requisitos padrão (localização, orientação, fixar, ser a prova de erros, evitar danos físicos aos componentes e garantir área organizada) e requisitos específicos (atender tolerância, estabilidade de processo, ser barato, garantir menor tempo de processo e prevenir colisões);
- Por ser uma atividade ainda muito dependente do conhecimento, o responsável pelo planejamento do processo de fabricação, e respectivo ferramental, deve possuir conhecimentos específicos (interpretação de desenho, conhecimento de manufatura, verificação de qualidade, conhecimento sobre custo, etc);
- Ser bem executado o método de previsão de riscos FMEA, o qual auxilia na identificação de possíveis não conformidades de forma pro-ativa, e não somente quando eles ocorrem (reativa).

Referente às tecnologias para validação de ferramentais, o método (utilização de CAD) atual da empresa do estudo de caso, não conseguem prever as NC durante procedimento de concepção, permitindo apenas a identificação durante validação do processo fabril na fase de piloto do produto.

Das tecnologias encontradas na literatura, a CAD aparece como destaque para validação de projeto, sendo a fase de Análise fundamental para garantir o desenvolvimento correto.

Os principais pontos de desvantagem da utilização do CAD são:

- Pessoas que não estão familiares com desenho técnico podem não entender perfeitamente os projetos, não identificando assim possíveis falhas no modelo;
- Além de não oferecer uma simulação intuitiva completa durante a verificação do projeto, desenhos complexos podem dificultar a percepção adequada da escala do ferramental em estudo;
- O detalhe do desenvolvimento do projeto, fica restrito ao desenhista, ou seja, as informações que devem ser compartilhadas com os avaliadores durante fase de validação, podem chegar incompletas.

Portanto, considerando-se os fatores custo, velocidade e qualidade, novas tecnologias têm a oportunidade para reduzir os retrabalhos.

Paralelo a isso, devido ao aumento do poder computacional ao longo dos anos a conectividade dentre mundo real e virtual vem aumentando, surgindo tecnologias imersivas, que, para este estudo, podem ajudar a cobrir as lacunas apresentadas pelo CAD.

As duas principais tecnologias mais aplicáveis para auxiliar no problema deste projeto são a Realidade Virtual (RV) e a Realidade Aumentada (RA).

Porém, conforme indica o estudo de Eschen *et al.* (2016) na Figura 26, como o problema de pesquisa exige uma maior interação com o modelo, pois o objetivo é identificar as não conformidades (NCs) através de prototipagem virtual, a tecnologia recomendada é a utilização da RV.

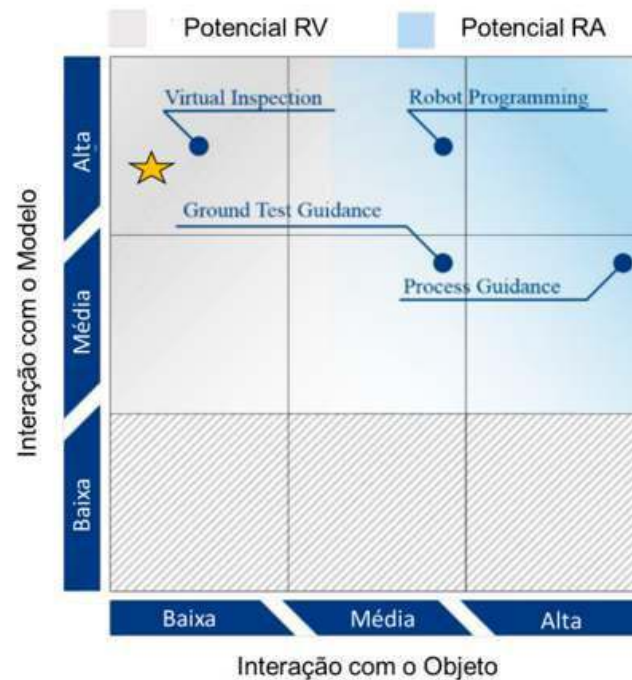


FIGURA 26 - MATRIZ PARA SELEÇÃO DE TECNOLOGIA

FONTE: ESCHEN ET AL., 2016.

A partir da implementação desta tecnologia é possível integrar vários estágios do ciclo de desenvolvimento de ferramentais de soldagem antes mesmo que seja produzido a versão real do dispositivo, conforme estudos de outros pesquisadores que aplicaram prototipagem virtual com RV ao projeto de produto (FREEMAN *et al.*, 2016; ZHANG, 2017; WOLFARTSBERGER, 2019; PEREZ *et al.*, 2019; Yap *et al.*, 2014; MADATHIL e GREENSTEIN, 2017; ESCHEN *et al.*, 2017; KOVAR *et al.*, 2016; LANGLEY *et al.*, 2016; BERG e VANCE, 2016; GAVISH *et al.*, 2013, DALLE *et al.*, 2016).

Em relação aos mapeamentos dos fluxos da empresa do estudo de caso através da avaliação dos documentos do sistema de qualidade da empresa, que regem a introdução de novos processos (onde introdução de ferramentais está contido), foi construído o fluxograma abaixo (Figura 27):

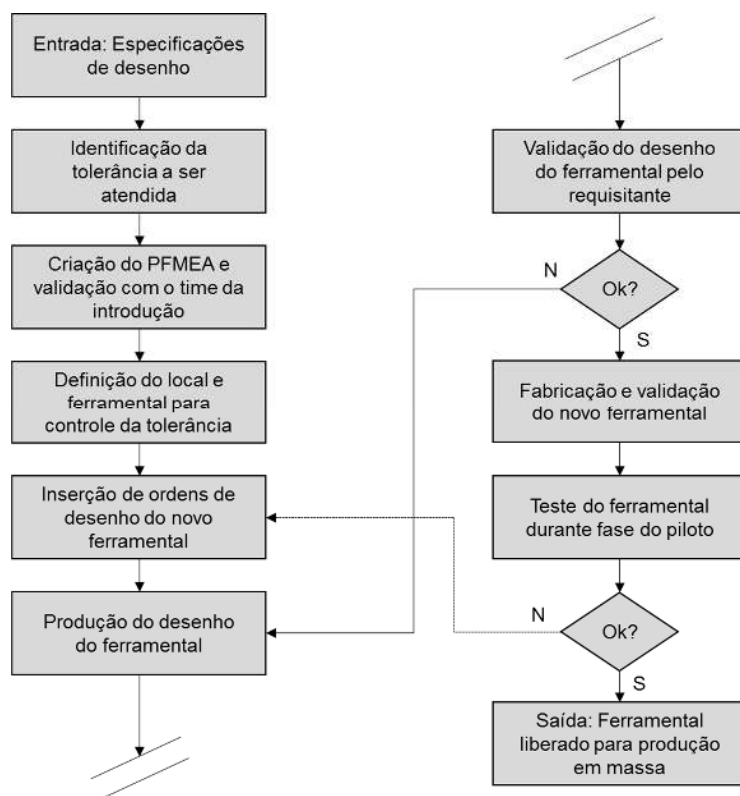


FIGURA 27 – FLUXO CORRENTE DA EMPRESA PARA INTRODUÇÃO DE NOVO PROCESSO

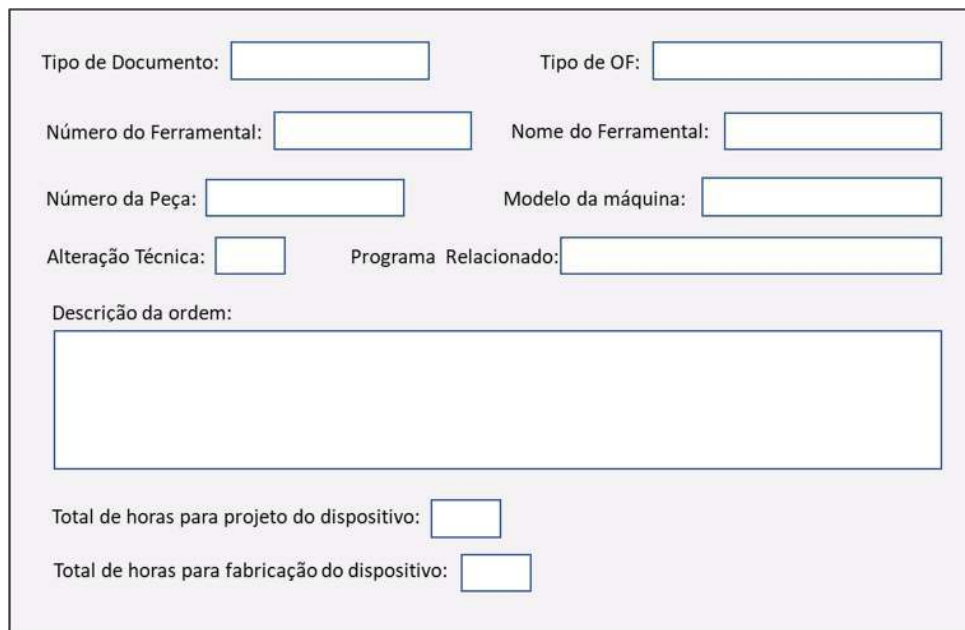
O fluxograma de validação de processos encontrado na empresa do estudo de caso (Figura 27) segue seqüência de passos similar ao encontrado na revisão bibliográfica (Figura 10).

Especificamente, no primeiro ponto de decisão (após “validação do ferramental pelo requisitante”), são utilizados para validação modelos em 2D (CAD) e em 3D estáticos (sem influência da gravidade nem posicionamento do operador), local onde as NCs não são identificadas.

O ponto de validação seguinte (antes da “Saída” na Figura 27) é a fase de produção da peça teste onde, de posse de todos os ferramentais já construídos, são fabricadas peças de amostra para certificar que todos os dimensionais requeridos no desenho do produto são atendidos pelo ferramental de ponteamto proposto.

Da execução do protocolo, chegou-se ao seguinte levantamento.

Dentro do sistema de gerenciamento de projetos de ferramentais, são utilizados como indicadores quantitativos, “horas de modelagem do ferramental em ambiente 2D e 3D” e “horas de fabricação na ferramentaria”, onde cada evento dentro deste sistema é chamado de ordem de fabricação (OF). A Figura 28 indica o formulário contido no sistema da empresa.



O formulário para inserção de ordem de fabricação ferramental contém os seguintes campos:

- Tipo de Documento:
- Tipo de OF:
- Número do Ferramental:
- Nome do Ferramental:
- Número da Peça:
- Modelo da máquina:
- Alteração Técnica:
- Programa Relacionado:
- Descrição da ordem:
- Total de horas para projeto do dispositivo:
- Total de horas para fabricação do dispositivo:

FIGURA 28 – FORMULÁRIO PARA INSERÇÃO DE ORDEM DE FABRICAÇÃO FERRAMENTAL

Os significados dos campos do software da empresa são detalhados a seguir:

- Tipo de documento: neste campo é onde são colocados se a ordem de fabricação é para uma nova peça, alteração técnica ou melhoria de processo;
- Tipo de Ordem de Fabricação (OF): informação para indicar se há necessidade de criação de um novo projeto, remanufatura de um já existente ou apenas redesenhar cotas;
- Número do ferramental: número de identificação do ferramental;
- Nome do ferramental: nome do ferramental;

-
- Número da peça: número da peça para qual o ferramental será desenvolvido;
 - Modelo da máquina: modelo da máquina (produto final) que o ferramental será desenvolvido;
 - Alteração Técnica: alteração técnica de engenharia relacionada à peça;
 - Programa relacionado: programa corporativo que esta OF está atribuída;
 - Descrição da OF: detalhes sobre o ferramental a ser desenvolvido, neste campo é o local onde faz-se a inserção dos dimensionais a serem atendidos e motivo de remanufatura caso necessário;
 - Total de horas para projeto do dispositivo: define a quantidade de horas necessárias para desenvolvimento do projeto do dispositivo em CAD;
 - Total de horas para fabricação do dispositivo: define a quantidade de horas necessárias para fabricação do projeto do dispositivo na ferramentaria.

Dos 3 programas de introdução de novos produtos selecionados, os quais totalizaram a fabricação de 122 ferramentais de soldagem.

Deste total, da leitura individual (199 OFs) do campo “Descrição da OF” identificou-se quais foram reinseridas no sistema (mais de uma OF por “Número do ferramental”). Em seguida, as não conformidades (NCs) encontradas foram consolidadas no Quadro 4. As NCs similares foram agrupadas e apresentadas na Figura 29.

Para que não haja o compartilhamento de informação confidencial (valores monetários), os resultados dos retrabalhos incorridos serão apresentados em porcentagem (%) segundo a seguinte fórmula:

$$\% \text{ do retrabalho} = \frac{\textit{Tempo adicional retrabalho}}{\textit{Tempo gasto inicial}}$$

Das informações contidas nas ordens de fabricação que utilizaram validação de ferramentais através de CAD identificou-se que, após a fase de protótipo, foram retrabalhados (considerando a média dos 3 modelos) 60% dos ferramentais. O detalhe por programa está indicado no Quadro 4:

Quadro 4 – Resumo de retrabalhos encontrados durante peça teste

Modelo	Ferramentais Totais	Ferramentais NC	Retrabalhos Ferramentais	$\% = \frac{\text{Retrabalhos}}{\text{Ferra. totais}}$
Programa 1	60	27	36	60%
Programa 2	44	26	37	77,7%
Programa 3	18	7	7	38,8%

A partir destes resultados, criou-se um histograma (Figura 29) consolidando os motivos similares das não conformidades encontrados, baseando-se na descrição da ordem de fabricação conforme citado no protocolo.

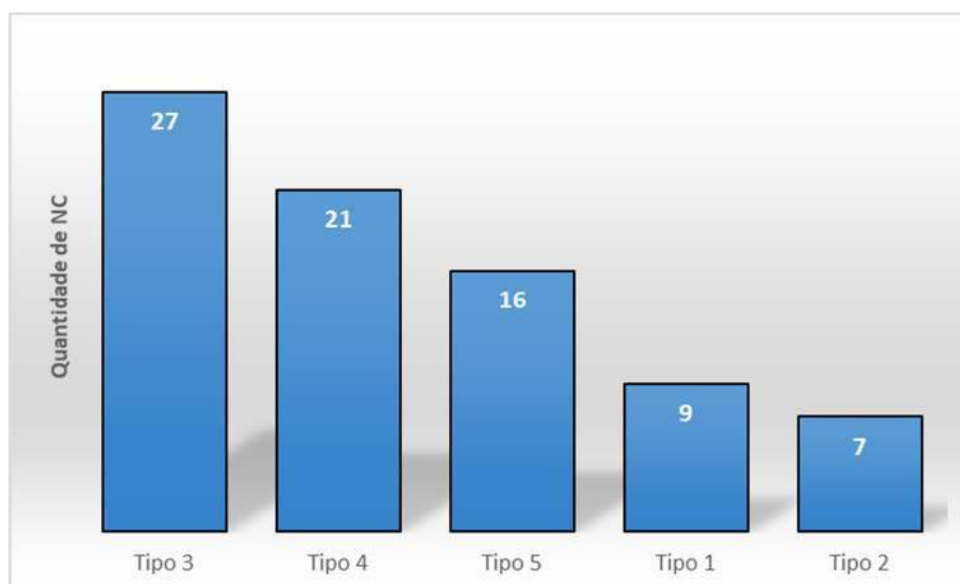


FIGURA 29 - TIPOS DE NCs ENCONTRADAS NO ESTUDO DE CASO

-
- Tipo 3: Conceito não atende necessidade de dimensional ou não contempla variação de dimensional dos componentes adjacentes;
 - Tipo 4: Conceito do ferramental incorreto;
 - Tipo 5: Alteração técnica do produto;
 - Tipo 1: Interferência (entre componente, mãos do operador e/ou entre ferramental);
 - Tipo 2: Não seguimento de padrão global;

Fazendo-se o vínculo dos tipos de NCs encontradas no estudo de caso e os benefícios da utilização de RV (Quadro 3), pode-se chegar às seguintes conclusões (atendimento ou não do objetivo do estudo):

- NC Tipo 1: A utilização de RV pode auxiliar a validação de ferramentais através da aplicação de prototipagem virtual nas etapas iniciais de desenvolvimento, as quais permitirão o engenheiro considerar testes de cenários relacionados à ergonomia, como também segurança, possibilitando verificar acessos além de interações entre o operador e o projeto e variações da altura;

- NC Tipo 2: A aplicação de RV pode facilitar a comunicação de times globais, garantindo que antes da produção do ferramental físico, os aprovadores globais possam validar o conceito do dispositivo sem estar no mesmo local;

- NC Tipo 3: utilização de RV pode auxiliar o usuário a testar o comportamento do ferramental nas fases iniciais do projeto (design), com o objetivo de detectar erros, mesmo considerando variações nas dimensões dos componentes das peças, porém há necessidade de uma atividade de “cenários que devem ser testados” os quais podem vir de “lições aprendidas” ou de ferramentas como FMEA;

- NC Tipo 4: a utilização de RV pode acelerar o entendimento do conceito implementado, e tomada de decisão correta, durante o processo de revisão de projeto;

- NC Tipo 5: há autores que citam a aplicação da RV para verificar possíveis interferências geradas pela alteração técnica, pois permite, caso o ferramental ainda não tenha sido fabricado (liberações tardias de alterações técnicas), a validação das diferenças, autocorreção e tomada de decisão. Porém, caso o ferramental já esteja em desenvolvimento avançado, a RV **não** ajudará em reduzir este tipo de NC.

Portanto, com o levantamento dos benefícios da utilização da RV, com base da literatura, e o cruzamento entre as NCs encontradas durante levantamento no estudo de caso, pode-se concluir que, com exceção da NC Tipo 5, todas poderiam ter sido detectadas em estágios de desenvolvimento do ferramental.

Como o principal objetivo é identificar não conformidades o mais cedo possível, garantindo que a parte física do ferramental seja fabricada certa da primeira vez (sem desperdícios), há necessidade de desenvolver um Método Enxuto de Projeto de Ferramentais (MEPF) que considere a utilização de tecnologias imersivas.

A Figura 30 indica o fluxo proposto criado a partir do método clássico (revisão literatura) em conjunto com os resultados encontrados.

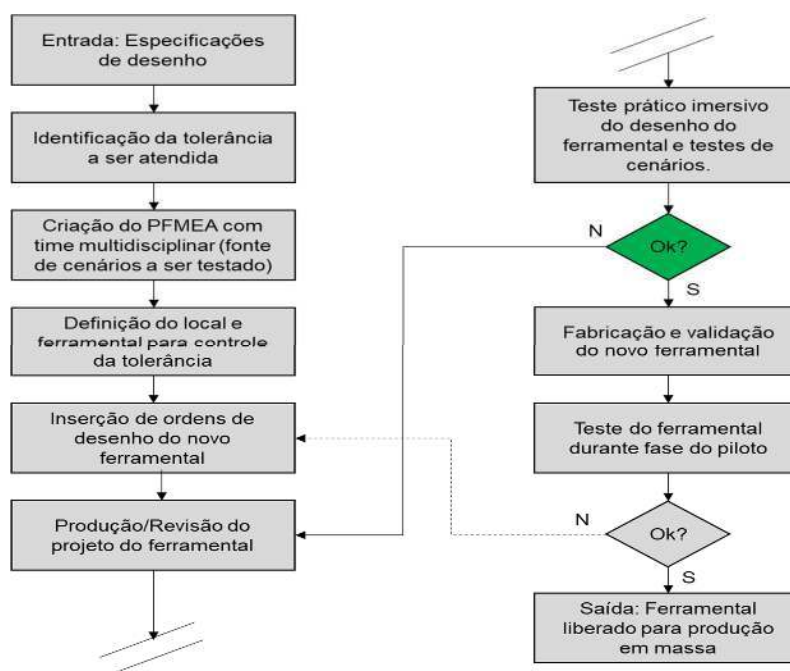


FIGURA 30 – MÉTODO MEPF PROPOSTO

De forma detalhada, é proposto pelo MEPF fazer alterações nas seguintes etapas:

- Criação do PFMEA com time multidisciplinar (fonte dos cenários a serem testados): nesta etapa será gerado um relatório (Figura 31 abaixo) contendo quais cenários devem ser avaliados pelo time multidisciplinar. Pode-se considerar as seguintes os seguintes fatores para a criação cenários a serem testados:
 - Teste de ergonomia: possibilidade de analisar os locais de atuação do operador, avaliando sua postura e evidenciando potenciais riscos ergonômicos;
 - Garantia de dimensional do componente/peça: como é possível alterar dimensões de peças dentro de ambientes virtuais, é possível a validação dos ferramentais considerando variação de dimensões diferentes das nominais dos componentes envolvidos;
 - Testes de acessibilidade: verificar se o conceito proposto do ferramental proporcionará acesso a todos pontos necessários;
 - Facilidade de comunicação: é possível validar de forma visual o que foi requisitado versus o que foi entregue, mesmo se o participante do desenvolvimento não tiver familiaridade com leitura e interpretação de desenho técnico.

CICLO DE TESTE - MEDPF					
Número do teste	Característica de desenho relacionada	Versão PFMEA	O que deve-se testar?	Resultado satisfatório?	Plano de ação

FIGURA 31 - FORMULÁRIO DO CICLO DE TESTES

- Teste prático imersivo do projeto do ferramental e implementação dos testes de cenários: de posse de todos os desenhos de ferramentais em ambientes imersivos, é possível testar os cenários identificados na etapa de criação do PFMEA, podendo, além disso, utilizar o operador atual do processo para simular em ambiente virtual a fabricação durante este ciclo de teste. Para criação do ambiente, recomenda-se a utilização do modelo apresentado na Figura 23.

5. CONCLUSÕES

Com o método proposto, é possível, utilizando da tecnologia de Realidade Virtual (RV), validar projetos de ferramentais de produção, assim como já é amplamente aplicado em projetos de produtos.

Com a implementação do método, como resultado do teste imersivo, a identificação seria de 91% (não detectando apenas alteração técnica do produto) das NCs ainda no desenvolvimento do projeto, permitindo que o responsável pelo desenho faça os ajustes necessários.

O benefício desta identificação das não conformidades já no desenvolvimento, evitando gastos futuros de retrabalho de fabricação e urgência de ajustes para atender cronograma da peça teste, ou seja, é identificado dos defeitos o quanto antes (assim como prega a filosofia enxuta).

Portanto, considerando a revisão bibliográfica e o método proposto há um grande potencial em atender o objetivo desta dissertação (melhoria no tempo e custo), pois através do mesmo será possível reduzir não conformidades tardias, encontradas apenas durante a fase piloto (ZHANG, 2017). Além disso há, o benefício adicional de utilizar o ambiente virtual para treinamento dos operadores.

A empresa que optar por desenvolver este tipo de solução, caso não possua departamento dedicado para criação de ambientes virtuais 3D, é recomendável que a mesma busque parcerias com terceiros para evitar um alto investimento inicial (BERG e VANCE, 2016).

Para validação das hipóteses iniciais (menor tempo e custo ao se utilizar tecnologias imersivas) é necessário aplicar o MEPF à introdução de um novo ferramental em um programa de introdução de novo produto desde seu início, fazendo-se em paralelo o desenvolvimento em CAD e comparando os resultados

através de teste estatísticos (Ex.: Test-t para % de retrabalhos encontradas durante validação e outros).

Devido ao alto custo do desenvolvimento do ambiente, não foi possível executar a prova de conceito.

Vale ressaltar que a tecnologia imersiva VR não é uma solução que irá substituir a tecnologia CAD, ambas devem ser utilizadas em conjunto, sendo o CAD ainda responsável pela parte de desenvolvimento do projeto do ferramental, e a tecnologia imersiva irá auxiliar na melhor interação para validação (prototipagem virtual).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO, P., NUNES, M., PAISANA, A., BRAGA, A. **The influence of time-to-market and target costing in the new product development success.** 2008. International Journal of Production Economics, 115(2), 559–568.

ANDERSEN, A., BRUNOE, T., NIELSEN, K., ROSIO, C. **Towards a generic design method for reconfigurable manufacturing systems.** 2017. Journal of Manufacturing Systems, 42, 179–195.

AIAG. **Potential Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) – Reference Manual.** AIAG, United States of America, 2008.

AIAG. **Advanced Product Quality Planning (APQP) and Control Plan – Reference Manual.** AIAG, United States of America, 2008.

Austing Rating 2019: [http://www.austin.com.br/Midia/28-02-2019%20PIB%20do%20Brasil%20fica%20em%2040%C2%BA%20lugar%20entre%2042%20pa%C3%ADses,%20mostra%20Austin%20Rating%20\(Valor%20Econ%C3%B4mico\)/8548](http://www.austin.com.br/Midia/28-02-2019%20PIB%20do%20Brasil%20fica%20em%2040%C2%BA%20lugar%20entre%2042%20pa%C3%ADses,%20mostra%20Austin%20Rating%20(Valor%20Econ%C3%B4mico)/8548) acessado em 1/6/19

AZUMA, R., BAILLOT, Y., BEHRINGER, R., FEINER, S., JUILER, S., MACLNTYRE, B. **Recent advances in augmented reality,** 2001. IEEE Computer Graphics and Applications, 21(6)

BALCI, O. **Verification validation and accreditation of simulation models.** 1997. Proceedings of the 29th Conference on Winter Simulation - WSC '97

Boston Consulting Group (BCG) <https://www.bcg.com/capabilities/operations/embracing-industry-4.0-rediscovering-growth.aspx> Acessado em 29/1/19

BEJLEGAARD, M., ELMARAGHY, W., BRUNOE, T., ANDERSEN, A., NIELSEN, K. **Methodology for reconfigurable fixture architecture design**. 2018. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology.

BELLGRAN M., SÄFSTEN K. **Production System Design and Evaluation for Increased System Robustness**. Second World Conference on POM and 15th Annual POM Conference, 2014.

BENKAMOUN, N., ELMARAGHY, W., HUYET, A. L., KOUISS, K. **Architecture Framework for Manufacturing System Design**, 2014. Procedia CIRP, 17, 88–93.

BERG, L. P., VANCE, J. M. **Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey**, 2016. Virtual Reality, 21(1), 1–17.

BONGAERTS, L. **Integration Of Scheduling And Control In Holonic Manufacturing System**, 1998.

BORTOLINI, M., GALIZIA, F. G., MORA, C. **Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend**, 2018. Journal of Manufacturing Systems, 49.

BOTTANI, E., VIGNALI, G. **Augmented reality technology in the manufacturing industry: a review of the last decade**, 2018. IISE Transactions, 1–64.

BROCAL, F., SEBASTIÁN, M. A., GONZALEZ, C. **Advanced Manufacturing Processes and Technologies**, 2019. Management of Emerging Public Health Issues and Risks, 31–64.

CANEDO, A., RICHTER, J. H. **Architectural Design Space Exploration of Cyber-physical Systems Using the Functional Modeling Compiler**. 2014. Procedia CIRP, 21, 46–51.

CHOI, S., JUNG, K., NOH, S. D. **Virtual reality applications in manufacturing industries: Past research, present findings, and future directions**, 2015. Concurrent Engineering

CHRYSSOLOURIS, G. **Manufacturing Systems - Theory and Practice**, 2nd Edition. New York Springer-Verlag; 2006

CHRYSSOLOURIS, G., MAVRIKIOS, D., AND MOURTZIS, D. **Manufacturing Systems: Skills & competencies for the Future**, Procedia CIRP, Vol. 7, pp. 17–24, 2013.

CICHOS, D., AURICH, J. C. **Support of Engineering Changes in Manufacturing Systems by Production Planning and Control Methods**, 2016. Procedia CIRP, 41, 165–170.

CICHOS, D., AURICH, J. C. **Planning and Controlling of Multiple, Parallel Engineering Changes in Manufacturing Systems**, 2015. Procedia CIRP, 33, 81–86.

DATCU, D., LUKOSCH, S., BRAZIER, F. **On the Usability and Effectiveness of Different Interaction Types in Augmented Reality**, 2015. International Journal of Human-Computer Interaction, 31(3), 193–209.

DALLE, M. M., DINI, G., FAILLI, F. **An Integrated Environment Based on Augmented Reality and Sensing Device for Manual Assembly Workstations**, 2016. 48th CIRP Conference on MANUFACTURING SYSTEMS - CIRP CMS. 340 – 345.

DANESE, P., MANFE, V., ROAMNO, P. **A Systematic Literature Review on Recent Lean Research: State-of-the-art and Future Directions**. 2017. International Journal of Management Reviews, 20(2), 579–605.

DEDEHAYIR, O., STEINERT, M. **The hype cycle model: A review and future directions**, 2016. Technological Forecasting and Social Change, 108, 28–41.

DENKENA, B., SHPITALNI, M., KOWALSKI, P., MOLCHO, G., ZIPORI, Y. **Knowledge Management in Process Planning**, 2007. CIRP Annals, 56(1), 175–180.

DOSHI, A., SMITH, R. T., THOMAS, B. H., BOURAS, C. **Use of projector based augmented reality to improve manual spot-welding precision and accuracy for automotive manufacturing**. 2016. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 89(5-8), 1279–1293.

ELIA, V., GNONI, M. G., LANZILOTTO, A. **Evaluating the application of augmented reality devices in manufacturing from a process point of view: An AHP based model**, 2016. Expert Systems with Applications, 63, 187–197.

ESCHEN, H., KOTTER, T., RODECK, R., HARNISCH, M., SCHUPPSTUHL, T. **Augmented and Virtual Reality for Inspection and Maintenance Processes in the Aviation Industry**. 2018, Procedia Manufacturing, 19, 156–163.

FORSTMANN, R., WAGNER, J., KREISKOTHER, K., KAMPKER, A., BUSCH, D. **Design for Automation: The Rapid Fixture Approach**. 2017. Procedia Manufacturing, 11, 633–640.

FREEMAN, I. J., SALMON, J. L., COBURN, J. Q. **CAD Integration in Virtual Reality Design Reviews for Improved Engineering Model Interaction**, 2016. Volume 11: Systems, Design, and Complexity.

GAMEROS, A., LOWTH, S., AXINTE, D., NAGY, A., CRAIG, O., SILLER, H. **State-of-the-art in fixture systems for the manufacture and assembly of rigid components: A review**. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2017. 123, 1–21.

GAMLIN A., BREEDON P., MEDJDOUB B. **Immersive Virtual Reality Simulation Deployment in a Lean Manufacturing Environment**. International Conference on Interactive Technologies and Games 2014.

GATNER'S HYPE CYCLE: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017/> - , 2017. Acessado em 20/5/19

GASS, S. **Decision-aiding models: Validation, assessment, and related issues for policy analysis**, 1983. *Operations Research*, 31(4):601–663.

GASS, S., JOEL, L. **Concepts of model confidence**, 1987. *Computers and Operations Research* 8.

GEFFRAY, C., GERSCHENFELD, A., KUDINOV, P., MICKUS, I., JELTSOV, M., KOOP K., POINTER, D. **Verification and validation and uncertainty quantification**, 2018.

GROOVER, M., ZIMMERS, E. **Computer-Aided Design and Manufacturing**. 5ª Edition. Dorling Kindersley, 2008.

GOH, D. H. L., LEE, C. S., RAZIKIN, K. **Interfaces for accessing location-based information on mobile devices: An empirical evaluation**, 2015. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 67(12),

HALEVI G., **The Principles of Process Planning: A Logical Approach**, Kluwer Academic Publishers, 2003.

HANDA, M., AUL, G., BAJAJ, S. **Immersive Technology – Uses, Challenges and Opportunities**, 2012.

HARREL, C. R.; MOTT, J. R. A.; BATEMAN, R. E.; BOWDEN, R. G.; GOGG, T. J. **Simulação: otimizando os sistemas**. 2 ed. São Paulo: IMAM, 2002.

HENAO, R., SARACHE, W., GOMEZ, I. **Lean Manufacturing and Sustainable Performance: Trends and Future Challenges**, 2018. *Journal of Cleaner Production*.

IVANOV, V., PAVLENKO, I., KURIC, I., KOSOV, M. **Mathematical Modeling and Numerical Simulation of Fixtures for Fork-Type Parts Manufacturing**. 2019. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing,

IVANOV, V., VASHCHENKO, S., RONG, Y. **Information support of the computer-aided fixture design system**. 2016. Proceedings of 12th International Conference , Vol. 1614, pp. 73–86

IBGE 2019: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria.html>
acessado em 28/7/19

JACOBSEN P., PEDERSEN L.F., JENSEN P.E., WITFELT C. **Philosophy Regarding the design of production systems**, 2002. Journal of Manufacturing Systems, 2/6:405-416

JIANG, K., ZHOU, X., LI, M. **Computer-aided checking fixture design system for automobile parts**. 2013. International Journal of Production Research, 51(20),

KIRAN, D. R. **Failure Modes and Effects Analysis. Total Quality Management**, 2017.

KOVAR, J., MOURALOVA, K, KSICA, F, KROUPA, J, ANDRS, O., HADAS, Z. **Virtual Reality in Context of Industry 4.0 – Proposed Projects at Brno University of Technology**, 2016. 17th International Conference on Mechatronics

KUTIN, A., DOLGOV, V., PODKIDYSHEV, A., KABANOV, A. **Simulation Modeling of Assembly Processes in Digital Manufacturing**, 2018. Procedia CIRP, 67.

LANGLEY, A., LAWSON, G., HERMAWATI, S., DCRUZ, M., APOLD, J., ARTT, F., MURA, K. **Establishing the Usability of a Virtual Training System for Assembly Operations within the Automotive Industry**. 2016. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 26(6), 667–679.

LAW, A. M. **Simulation Modeling and Analysis**. Fourth Edition. India: Mc Graw Hill Education, 2007.

LEAL, F.; PINHO, A.F.; ALMEIDA, D.A. **Análise de falhas através da aplicação do FMEA e da teoria Grey**. Revista Gestão Industrial, Ponta Grossa, PR, v.2, n.1, p.79-88, 2006.

LEE, K. **Principles of CAD/CAM/CAE Systems**. Addison Wesley Longman, 1999.

LI, Q. **Virtual Reality for Fixture Design and Assembly**, 2009. Phd thesis, University of Nottingham.

LI, W., NEE, A., ONG, S. **A State-of-the-Art Review of Augmented Reality in Engineering Analysis and Simulation**, 2017. Multimodal Technologies and Interaction, 1(3), 17.

LIANG, X., WANG, R. **Verification and validation of detonation modeling**, 2018. Defence Technology.

LIN, J. H. T. **Fear in virtual reality (VR): Fear elements, coping reactions, immediate and next-day fright responses toward a survival horror zombie virtual reality game**, 2017. Computers in Human Behavior, 72, 350–361.

LU, S. Y., SHPITALNI, M., GADH, R. **Virtual and Augmented Reality Technologies for Product Realization**, 1999. CIRP Annals, 48

LUNDGREN, M., HEDLIND, M, SIVARD, G., KJELLBERG T., **Process Design as Fundament in Efficient Process Planning** - Procedia Manufacturing, 2018.

MCKINSEY, **Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy**. 2013.

MADATHIL, K., GREENSTEIN, J. S. **An investigation of the efficacy of collaborative virtual reality systems for moderated remote usability testing**. 2017. Applied Ergonomics, 65, 501–514.

MATEU, J., LASALA, M. J., ALAMÁN, X. **Virtual Touch: A Tool for Developing Mixed Reality Educational Applications and an Example of Use for Inclusive Education**, 2014. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 30(10), 815–828.

MATSAS, E., VOSNIAKOS, G. **Design Of A Virtual Reality Training System For Human–Robot Collaboration In Manufacturing Tasks**, 2014.

MAS, F., ARISTA, R., OLIVA, M., HIEBERT, B., GILKERSON, I., RIOS, J. **A Review of PLM Impact on US and EU Aerospace Industry**. 2015. *Procedia Engineering*, 132, 1053–1060.

MILGRAM, P., KISHINO, F. **A taxonomy of mixed reality visual displays**, 1994. *IEICE Transactions on Information and Systems*.

MILLAR, C., LOCKETT, M., LADD, T. **Disruption: Technology, innovation and society**, 2018 *Technological Forecasting and Social Change*, 129, 254–260.

MOURTZIS D., DOUKAS M., BERNIDAKI, D. **Simulation in Manufacturing: Review and Challenges**. CIRP Sponsored DET Conference, 2014.

MUND K. **Creating Flow And Eliminating Waste In Lean Product Development**, 2014.

NAFISI, M., WIKTORSSON, M., ROSIO, C., GRANLUND, A. **Manufacturing Engineering Requirements in the Early Stages of New Product Development - A Case Study in Two Assembly Plants**, 2019. *Advanced Applications in Manufacturing Engineering*.

NEE, A. Y. C., ONG, S. K., **Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing**, 2013. *IFAC Proceedings*.

NEGRÃO, L. L. L., GODINHO FILHO, M., MARODIN, G. **Lean practices and their effect on performance: a literature review**, 2016. *Production Planning & Control*.

NOVAK-MARCINCIN, J., BARNA, J., JANAK, M., NOVAKOVA-MARCINCINOVA, L. **Augmented Reality Aided Manufacturing**, 2013. *Procedia Computer Science*, 25, 23–31.

OLIVEIRA, C. **Aplicação de técnicas de simulação em projetos de manufatura enxuta**. *Estudos Tecnológicos - Vol. 4, n° 3*: 204-217, 2008.

OLIVEIRA, U., PAIVA, E., ALMEIDA, D. **Metodologia integrada para mapeamento de falhas: uma proposta de utilização conjunta do mapeamento de processos com as técnicas FTA, FMEA e a análise crítica de especialistas**, 2010. *Production*, 20(1), 77–91.

ONG, S., NEE, A. **Virtual and Augmented Reality Application in Manufacturing**. 1 Edition. Springer, 2004.

PACE, D. **Modeling and Simulation Verification and Validation Challenges**, 2004.

PARITALA, P.K., MANCHIKATLA, S., YARLAGADDA, P.K.D.V. **Digital Manufacturing- Applications Past, Current, and Future Trends**, 2017. *Procedia Engineering*, 174.

PAULUS, C. J., HAOUCHINE, N., CAZIER, D., COTIN, S. **Augmented Reality during Cutting and Tearing of Deformable Objects**, 2015. *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*.

PALMARINI, R., ERKOYUNCU, J., ROY, R., TORABMOSTAEDI, H. **A systematic review of augmented reality applications in maintenance**. 2018. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 49, 215–228

PENG, G., WANG, G., LIU, W., YU, H. **A desktop virtual reality-based interactive modular fixture configuration design system**, 2010. *Computer-Aided Design*, 42(5), 432–444.

PEREZ, L., DIEZ, E., USAMENTIAGA, R., GARCIA, D. F. **Industrial robot control and operator training using virtual reality interfaces**. 2019. *Computers in Industry*, 109, 114–120.

POLYS, N. F., BOWMAN, D. A., NORTH, C. **The role of Depth and Gestalt cues in information-rich virtual environments**, 2011. *International Journal of Human-Computer Studies*, 69(1-2), 30–51.

ROVIRA, A., SLATER, M. **Reinforcement Learning as a tool to make people move to a specific location in Immersive Virtual Reality**, 2017. *International Journal of Human-Computer Studies*, 98, 89–94.

SAAKSVUORI, A., IMMONEM, A. **Product lifecycle management**, third edition. 2008

SALIMI, F., SALIMI, F. **Modeling and Simulation. A Systems Approach to Managing the Complexities of Process Industries**, 2018.

SAMSUNG 2019: <https://www.samsung.com/us/computing/hmd/windows-mixed-reality/xe800zaa-hc1us-xe800zaa-hc1us/> acessado em 15/1/19

SARGENT, R. **Verification And Validation Of Simulation Models**, 1998. *Electrical Engineering and Computer Science*. 7.

SCALLAN, P. **Process Planning**, 2002. Butterworth-Heinemann.

SCHLESINGER, S. **Terminology for model credibility**, 1979. *Simulation* 32 (3): 103-104.

SCHUELKE-LEECH, B. A. **A model for understanding the orders of magnitude of disruptive technologies**, 2018. *Technological Forecasting and Social Change*, 129, Pg. 261–274.

SETH, A., VANCE, J. M., OLIVER, J. H. **Virtual reality for assembly methods prototyping: a review**. 2010, *Virtual Reality*, 15(1), 5–20.

SHERMAN, W. R., CRAIG, A. B. **Output. Understanding Virtual Reality**, 2019.

STARK, J. **Product Lifecycle Management. Product Lifecycle Management**, 2015.

STARK, R., ISRAEL, J. H., WOHLER, T. **Towards hybrid modelling environments—Merging desktop-CAD and virtual reality-technologies.** 2010. CIRP Annals, 59(1), 179–182.

Süli, F. **New product development. Electronic Enclosures, Housings and Packages,** 2019.

TACTSUIT 2019 - <https://www.bhaptics.com/tactsuit> Acessado em 15/6/19

VESEY, J. T. **Time-to-market: Put speed in product development. Industrial Marketing Management,** 1992.

WANG, H., RONG, Y. **Case based reasoning method for computer aided welding fixture design.** 2008. Computer-Aided Design, 40(12),

WANG, X., ONG, S. K., NEE, A. Y. C. **Multi-modal augmented-reality assembly guidance based on bare-hand interface.** 2016. Advanced Engineering Informatics, 30(3), 406–421.

WOJCIECHOWSKI, R., CELLARY, W. **Evaluation of learners' attitude toward learning in ARIES augmented reality environments,** 2013. Computers & Education, 68, 570–585.

WOLFARTSBERGER, J. **Analyzing the potential of Virtual Reality for engineering design review,** 2019. Automation in Construction, 104, 27–37.

WANG, B. **The Future of Manufacturing: A New Perspective,** 2018.

WANG, X., BI, Z. **New CAD/CAM course framework in digital manufacturing.** 2018. Computer Applications in Engineering Education, 27(1)

YAP, H. J., TAHA, Z., DAWAL, S. Z., CANG, S.-W. **Virtual Reality Based Support System for Layout Planning and Programming of an Industrial Robotic Work Cell.** 2014. PLoS ONE, 9(10), e109692.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** 2ª Ed. Porto Alegre. Editora: Bookmam. 2001.

ZHANG, F., LIU, S., LIU, F., & ZHANG, H. **Stability evaluation of laser-MAG hybrid welding process**. 2019. *Optics & Laser Technology*, 116, 284–292.

ZHANG, H. **Head-mounted display-based intuitive virtual reality training system for the mining industry**. 2017. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(4), 717–722.

ZHAO, M. Y., ONG, S. K., NEE, A. Y. C. **An Augmented Reality-Assisted Therapeutic Healthcare Exercise System Based on Bare-Hand Interaction**, 2016. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 32(9)

7. APÊNDICE

Quadro 5 - Pontuação de Ocorrência do PFMEA

Probabilidade de falha	Critério: Ocorrência da causa - PFMEA (Incidentes por itens/veículos)	Rank
Muito alta	≥ 100 em mil ≥ 1 em 10	10
Alta	50 em mil 1 em 20	9
	20 em mil 1 em 50	8
	10 em mil 1 em 100	7
Moderada	2 em mil 1 em 500	6
	0,5 em mil 1 em 2.000	5
	0,1 em mil 1 em 10.000	4
Baixa	0,01 em mil 1 em 100.000	3
	$\leq 0,001$ em mil 1 em 1.000.000	2

Muito baixa	Falha é eliminada através de controle preventivo.	1
-------------	---	---

Fonte: Manual FMEA AIAG (2008)

Quadro 6 - Pontuação de Severidade do PFMEA

Rank	Efeito	Critério: Severidade do Efeito no processo (efeito na manufatura e montagem)
10	Falha em atender aos requisitos de segurança e/ou regulamentar	Pode colocar em perigo o operador (montagem ou máquina) sem aviso.
9		Pode colocar em perigo o operador (montagem ou máquina) com aviso.
8	Interrupção maior	100% dos produtos poder ser sucateados. Parada de linha ou de embarque.
7	Interrupção significativa	Uma porção da produção pode ser sucateada. Desvio do processo primário incluindo a redução da velocidade na linha ou adicional de mão de obra.
6	Interrupção Moderada	100% da produção podem ser retrabalhadas for a da linha e serem aceitas.
5		Uma porção da produção pode ser retrabalhada for a da linha e ser aceita.
4		100% da produção pode ser retrabalhada na estação antes de seu processamento.

3		Uma porção da produção pode ser retabalhada na estação antes de seu processamento.
2	Interrupção menor	Pequeno inconveniente no processo, operação ou no operador.
1	Sem efeito	Sem efeito percebido.

Fonte: Manual FMEA AIAG (2008)

Quadro 7 - Pontuação da Detecção do PFMEA

Oportunidade de detecção	Critério: probabilidade de detecção pelo controle de processo	Índice	Probabilidade de detecção
Sem oportunidade de detecção	Não há controle de processo, não se pode detectar ou não é analisado	10	Quase impossível
Não passível de detecção em qualquer estágio	Modo de falha e/ou erro (causa) não é facilmente detectado (ex.: auditorias aleatórias)	9	Muito remota
Detecção do problema após o processamento	A detecção do modo de falha após o processamento pelo operador através de meios visuais, táteis ou auditivos.	8	Remota

Detecção do problema na fonte	A detecção do modo de falha na estação pelo operador através de meios visuais, táteis ou auditivos ou após o processamento através do uso de dispositivo (passa-não-passa, chave de verificação de toque manual etc)	7	Muito baixa
Detecção do problema após o processamento	A detecção do modo de falha após o processamento pelo operador através do uso de dispositivos de medição por variáveis ou na estação através do uso de dispositivos (passa-não-passa, chave de verificação de toque manual etc.)	6	Baixa
Detecção do problema na fonte	A detecção do modo de falha ou erro (Causa) na estação pelo operador através do uso de dispositivos de medição por variáveis ou por controles automáticos na estação que detectará a peça não conforme e notifica o operador (luz, buzina etc.). O dispositivo é executado no setup e na verificação da primeira peça (somente para causas de setup).	5	Moderada
Detecção do problema após o processamento	A detecção do modo de falha após o processamento pelos controles automáticos que detectarão a peça não conforme, bloqueando a peça	4	Moderadamente alta

	automaticamente na estação, para prevenir o processamento posterior.		
Detecção do problema na fonte	A detecção do modo de falha na estação pelos controles automáticos que detectarão a peça não conforme, bloqueando a peça automaticamente na estação, para prevenir o processamento posterior.	3	Alta
Detecção do Erro e/ou Prevenção do Problema	A detecção do erro (causa) na estação por controles automáticos que detectarão o erro e prevenirão que peças discrepantes sejam feitas.	2	Muito alta
Detecção não aplicável, prevenção do erro	Prevenção do erro (causa) como o resultado de projetos de fixadores, máquina ou peça. As peças discrepantes não podem ser feitas por causa de itens de "A prova de erro", feito através de projetos do produto ou processo.	1	Quase certo

Fonte: Manual FMEA AIAG (2008)

FMEA - ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS																		
FMEA Nº		PÁGINA:																
FMEA Nº		ETAPA:																
PROCESSO/PROCESSO		APROVAÇÃO DO CLIENTE:																
CLIENTE/PROJETO:		DATA 1ª EMISSÃO																
RESPONSÁVEL PROJETO/MANUFATURA:		EQUIPE:																
MODOS DE FALHA POTENCIAL		EQUIPE:																
ITEM/NOME/FUNÇÃO DO PROJETO/PROCESSO	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO (S) DA FALHA EM POTENCIAL	SEVERIDADE	CAUSA (S) POTENCIAL DA FALHA	OCORRÊNCIA	CONTROLE ATUAL DE PREVENÇÃO	CONTROLE ATUAL DE DETEÇÃO	RISCO (RPN)	DETEÇÃO	RISCO (RPN)	AÇÃO PREVENTIVA RECOMENDADA	NOME DO RESPONSÁVEL E PRAZO	AÇÃO TOMADA	SEVERIDADE	OCORRÊNCIA	DETEÇÃO	RISCO (RPN)	

FIGURA 32 - FORMULÁRIO PFMEA
 FONTE: MANUAL FMEA AIAG (2008)