

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Vítor Baesso Gabriel de Oliveira**

**A Utilização de Métodos Computacionais na Otimização de Processos de  
Corte e Usinagem - Uma Revisão**

Juiz de Fora

2019

Vítor Baesso Gabriel de Oliveira

**A Utilização de Métodos Computacionais na Otimização de Processos de  
Corte e Usinagem - Uma Revisão**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof Dr Carlos Renato Pagotto

Juiz de Fora

2019

Vítor Baesso Gabriel de Oliveira

**A Utilização de Métodos Computacionais na Otimização de Processos de  
Corte e Usinagem - Uma Revisão**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Faculdade de Engenharia da Universidade  
Federal de Juiz de Fora, como requisito par-  
cial para a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Oliveira, Vítor Baesso Gabriel de .

A Utilização de Métodos Computacionais na Otimização de Processos de Corte e Usinagem / Vítor Baesso Gabriel de Oliveira.

-- 2019.

70 f.

Orientador: Carlos Renato Pagotto

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2019.

1. Usinagem. 2. Métodos Computacionais. 3. Otimização. 4. Indústria 4.0. I. Pagotto, Carlos Renato , orient. II. Título.

Aprovada em 06 de Novembro de 2017.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof Dr Carlos Renato Pagotto - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Engenheiro Mecânico Marco Aurélio Muller  
Universidade Federal de Juiz de Fora

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter a saúde e a força necessária para ir atrás de meus objetivos e me iluminar durante todo este tempo.

Aos meus pais, Karla e Ricardo, meus exemplos diários de determinação por todo suporte e motivação. Ao meu irmão, Estêvão, por todo apoio.

Aos meus amigos da Engenharia, agradeço por toda amizade e irmandade durante toda esta trajetória e por compartilhar todos os momentos durante este ciclo, o fazendo menos penoso e mais feliz.

Agradeço também aos mestres que tive, por todo ensinamento repassado. Em especial, agradeço ao meu orientador Carlos Renato Pagotto por toda paciência, ajuda e profissionalismo na elaboração deste trabalho.

Todos vocês tiveram papel importante na minha graduação e crescimento pessoal. Serei eternamente grato por todos os momentos compartilhados. Obrigado!

## RESUMO

A Usinagem é um processo de extrema importância na indústria e depende de diversos fatores em sua aplicação. Com o avanço tecnológico e surgimento da Indústria 4.0, o mercado tem se tornado cada vez mais competitivo, de forma que os processos de produção precisam ser pensados, com foco em alto nível de entrega e produtividade. Ao utilizar métodos tradicionais de usinagem, que não visam à otimização, a aplicação do processo torna-se empírica, visto que o processo depende de diversos parâmetros, o que dificulta a previsibilidade dos resultados. A tecnologia surge, portanto, como uma forma de atuar nesse problema, otimizando o processo de usinagem, economizando recursos financeiros, elevando a produtividade e a qualidade dos produtos. Dessa forma, ela é capaz de inserir as organizações no novo mercado trazido pela Indústria 4.0. Esse trabalho, visa trazer diferentes métodos computacionais que são aplicados junto ao processo de Usinagem, com o intuito de otimizar o processo produtivo relacionado à Usinagem mecânica.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Usinagem; Métodos Computacionais; Otimização;

## ABSTRACT

Machining is an extremely important process in the industry and depends on several factors in its application. With the technological advancement and the emergence of Industry 4.0, the market has become increasingly competitive, so that production processes need to be thought out, focusing on high level of delivery and productivity. By using traditional machining methods that do not aim at optimization, the application of the process becomes empirical, since the process depends on several parameters, which hinders the predictability of the results. Therefore, technology emerges as a way to act on this problem, optimizing the machining process, saving financial resources, increasing productivity and product quality. Thus, it can insert the organizations in the new market brought by Industry 4.0. This work aims to bring different computational methods that are applied to the machining process, in order to optimize the production process related to mechanical machining.

Key-words: Industry 4.0; Machining; Computational methods; Optimization;



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Pilares para indústria 4.0. . . . .	18
Figura 2 – Neuron Model. . . . .	21
Figura 3 – Supervised learning procedure of a typical feedforward network . . . .	21
Figura 4 – (a) Condição 1, $v_c = 150$ m/min, $f = 0,07$ mm/rev, $b = 0,2$ mm, WC recoberto com TiN em AISI 4340 . . . . .	23
Figura 5 – (b) Condição 2, $v_c = 150$ m/min, $f = 0,17$ mm/rev, $b = 0,2$ mm, WC recoberto com TiN em AISI 4340. . . . .	24
Figura 6 – (c) Condição 3, $v_c = 200$ m/min, $f = 0,07$ mm/rev, $b = 0,2$ mm, WC recoberto com TiN . . . . .	24
Figura 7 – (d) Condição 4, $v_c = 200$ m/min, $f = 0,17$ mm/rev, $b = 0,2$ mm, WC recoberto com TiN em AISI 4340. . . . .	25
Figura 8 – ANN Structure . . . . .	27
Figura 9 – Experimental Setup . . . . .	27
Figura 10 – Experimental scheme . . . . .	30
Figura 11 – The effect of table feed rate on $R_a$ for different depth of cuts ( mm) at 500 rpm in (a) and 1000 rpm in (b) . . . . .	32
Figura 12 – Atividades A21,A22: Servidores da arquitetura. . . . .	41
Figura 13 – Arquitetura proposta para o sistema . . . . .	43
Figura 14 – Cliente Web - Interface gráfica de monitoramento e teleoperação . . .	43
Figura 15 – Arquitetura, métodos de projeto e holarquias representando os níveis de controle . . . . .	44
Figura 16 – Método de modelagem de sistema de controle reconfigurável usando rede de Petri e UML . . . . .	45
Figura 17 – Sistema de manufatura em Netlogo . . . . .	46
Figura 18 – Change in surface roughness with the inspection direction in face milling	47
Figura 19 – The applied general theoretical cutting tool model . . . . .	47
Figura 20 – Theoretical surface with three different inserts . . . . .	48
Figura 21 – The applied milling tool . . . . .	49
Figura 22 – Theoretical and measuared profiles for $f_1 = 0,175$ mm . . . . .	50
Figura 23 – Theoretical and measuared profiles for $f_1 = 0,35$ mm . . . . .	50
Figura 24 – Theoretical and measuared profiles for $R_a$ parameter . . . . .	51
Figura 25 – Theoretical and measuared profiles for $R_z$ parameter . . . . .	51
Figura 26 – Sistema proposto para análise digital da delaminação em materiais compósitos laminados. . . . .	52
Figura 27 – Sistema de aquisição de imagens . . . . .	53
Figura 28 – Objeto de estoque de um exemplo de aplicação . . . . .	55
Figura 29 – Itens demandados de um exemplo de aplicação . . . . .	55
Figura 30 – Soluções de exemplo de aplicação . . . . .	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para a modelagem. [11] . . . . .	22
Tabela 2 – Parâmetros de Corte . . . . .	31
Tabela 3 – Os resultados dos experimentos e $S/N$ valor dos índices . . . . .	31
Tabela 4 – Os parâmetros de corte e seus níveis utilizados no experimento de design fatorial . . . . .	32
Tabela 5 – O efeito da taxa de crescimento da tabela em Ra para dois valores de profundidade de corte, de 1.0 e 0,25 mm, para duas velocidades de rotação do eixo, de 500 e 1000 rpm . . . . .	34
Tabela 6 – Configurações de parâmetros para teste de confirmação e resultado . .	34
Tabela 7 – Matriz ortogonal $l27(3^{13})$ de Taguchi . . . . .	35
Tabela 8 – Otimização de resposta para os parâmetros de dureza da superfície . .	37
Tabela 9 – Comparação dos Métodos Computacionais aplicados à Usinagem. . . .	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANN	Rede Neural Artificial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Projeto assistido por computador (computer aided design)
CAQSD	Computer Aided Quick-Stop Device
CNC	Comando Numérico Computadorizado
IA	Inteligência Artificial
GA	Algoritmos Genéticos
MEF	Método dos Elementos Finito
RBF	Radial Function Based
RNA	Rede Neural Artificial
RSM	Response Superficial Method

## SUMÁRIO

	<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES . . . . .</b>	<b>8</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>13</b>
1.1	Breve revisão histórica . . . . .	13
1.2	O processo de Usinagem: Visão tradicional . . . . .	14
1.3	Cenário de mudança da Indústria: A Indústria 4.0 . . . . .	16
1.3.1	A base da Indústria 4.0 . . . . .	17
1.4	Motivação e Objetivos . . . . .	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>	<b>20</b>
2.1	Métodos computacionais na otimização do Processo de Usinagem . . . . .	20
2.1.1	O surgimento da IA aplicada à Usinagem . . . . .	20
2.1.2	Elementos finitos (FEM) aplicado à Usinagem . . . . .	22
2.1.3	A utilização de Redes Neurais aplicada à Usinagem . . . . .	25
2.1.4	A utilização do método Taguchi na Usinagem . . . . .	29
2.1.5	Método dos mínimos quadrados aplicado à Usinagem . . . . .	31
2.1.5.1	Sistema de Interferência Neuro-difusa (ANFIS) . . . . .	33
2.1.5.2	Método de Superfície de Resposta (RSM) e ANOVA . . . . .	34
2.1.6	Utilização de lógica fuzzy no Processo de Usinagem . . . . .	38
2.1.6.1	Lógica Fuzzy . . . . .	39
2.1.7	Métodos de Usinagem inovadores . . . . .	40
2.1.7.1	Método de utilização da modelagem IDEF0 . . . . .	40
2.1.7.2	Método utilizando a técnica de Redes de Petri . . . . .	44
2.1.7.3	Método de Previsão da Rugosidade Superficial em Peças Usinadas . . . . .	45
2.1.7.4	Modelo para o valor teórico da superfície . . . . .	46
2.1.7.5	Experiência de corte . . . . .	49
2.1.7.6	Sistema de Pré-Ajustagem de Ferramenta . . . . .	52
2.1.7.7	Modelo de Misturas de Gaussianas . . . . .	53
2.1.7.8	Modelo de Otimização no processo de corte unidimensional de barras de aço . . . . .	54
2.1.7.9	Análise da Zona de Metal Morto por métodos computacionais . . . . .	56
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES . . . . .</b>	<b>58</b>
4.1	Método FEM . . . . .	58
4.2	Método de Redes neurais . . . . .	58

4.3	Método Taguchi . . . . .	59
4.4	Método de Regressão linear por mínimos quadrados . . . . .	59
4.5	Método ANFIS . . . . .	60
4.6	Método ANOVA e RSM . . . . .	60
4.7	Conclusões Lógica Fuzzy . . . . .	61
4.8	Métodos Inovadores . . . . .	61
4.8.1	Modelagem IDEF0 . . . . .	61
4.8.2	Redes de Petri . . . . .	62
4.8.3	Modelo de Previsão da Rugosidade Superficial em Peças Usinadas . . . . .	62
4.8.4	Método de Análise Digital de dano na furação de materiais compósitos laminados . . . . .	62
4.8.5	Sistema de Pré-ajustagem de ferramenta . . . . .	63
4.8.6	Modelo de Misturas de Gaussianas . . . . .	63
4.8.7	Modelo de Otimização no processo de corte unidimensional de barras de aço . . . . .	63
4.8.8	Análise da Zona de Metal Morto por métodos computacionais . . . . .	64
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>66</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>67</b>
	<b>ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE . . . . .</b>	<b>71</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Breve revisão histórica

Antes da era industrial, a atividade produtiva era artesanal e manual, com escasso emprego de máquinas simples. Dependendo da escala, grupos de artesãos podiam se organizar e dividir algumas etapas do processo. Entretanto, na maior parte das vezes um mesmo artesão cuidava de todo o processo, desde a obtenção da matéria-prima até à comercialização do produto.

Esses trabalhos eram realizados em oficinas, nas casas dos próprios artesãos. Em relação ao processo de usinagem, este era ainda pouco desenvolvido e lento.

Com a Revolução Industrial, o processo de fabricação de produtos aumentou de velocidade. Surgiram nesse período os primeiros tornos mecânicos e fresadoras, equipamentos que melhoraram o processo de usinagem [21].

A Primeira Revolução Industrial provocou o desenvolvimento acelerado da indústria e impulsionou o crescimento das cidades. Porém, o anseio de crescimento e de criação de novas formas de produção continuou transformando as atividades artesanais em industriais.

A partir da década de 1870, começou a Segunda Revolução Industrial, dando continuidade às transformações anteriores.

Dentre os avanços desta época, pode-se destacar a energia elétrica, o motor à explosão, o aprimoramento de meios de comunicação com o surgimento do telégrafo e da metalurgia. Essas técnicas deram ainda mais flexibilidade e escala para as indústrias.

Em relação ao processo de usinagem, destaca-se a melhoria dos equipamentos que surgiram na etapa anterior, surgindo as extrusoras, as trefiladoras, as laminadoras, as serras mecânicas e as furadeiras.

A etapa conhecida por Revolução Tecnológica, também conhecida como 3ª Revolução Industrial, iniciou-se após a segunda metade do século XX e teve como principal característica a evolução da informática.

Além da informática, o desenvolvimento tecnológico da indústria, principalmente da automobilística, robótica, de biotecnologia, indústria espacial, genética, entre outros campos, tiveram grande relevância a partir deste período.

No final da década de 1970, surgiram os primeiros equipamentos programados por Comando numérico computadorizado (CNC). Estes equipamentos possibilitam um processo de fabricação por computadores, a fim de automatizar máquinas e ferramentas em diversas etapas de produção.

O processo de usinagem CNC começa tipicamente com um programa de computador,

para que se possa especificar cada peça com a utilização do software Computer Aided Design (CAD). O CAD cria as especificações para cada um dos componentes, ou uma parte ou produto manufaturado. Este projeto é então transformado em uma série de valores numéricos para que uma máquina CNC possa utilizar as informações, mover e operar uma variedade de ferramentas.

O surgimento do CNC trouxe um importante impacto no processo de usinagem, elevando a produtividade da indústria de forma exponencial.

Toda essa análise histórica mostra o quanto o mundo mudou nos últimos três séculos, principalmente.

No cenário brasileiro, essas mudanças têm ocorrido de forma mais lenta. Grande parte das indústrias, com exceção das de médio e grande porte, ainda utilizam métodos arcaicos de usinagem, o que prejudica a competitividade frente ao novo mercado produtivo e tecnológico.

## 1.2 O processo de Usinagem: Visão tradicional

Para entender melhor o princípio associado ao processo de Usinagem, é trazido uma descrição do livro [27], inserido a seguir.

O princípio usado em toda máquina-ferramenta para obter a superfície desejada é providenciar um movimento relativo apropriado entre a peça e a ferramenta, escolhida adequadamente.

Primeiro, é importante entender tudo o que influencia na usinagem de uma peça ou equipamento. Assim, para o estudo da usinagem, é necessário a definição das grandezas físicas no processo de corte.

Diversos são os fatores que influenciam na definição dos parâmetros e do processo, entre eles:

- Propriedades finais desejadas.
- Tamanho, forma e complexidade do componente.
- Tolerâncias e acabamento superficial exigidos.
- Processo subsequente envolvido.
- Projeto e custo de ferramentas; efeito do material na vida da ferramenta ou matriz.
- Sucata gerada e seu valor.
- Disponibilidade do equipamento e experiências operacionais.
- Lead time necessário para iniciar a produção.

- Número de partes requeridas e taxa de produção desejada.
- Custo total do processamento.

Além disso, para que o processo seja aplicado, alguns parâmetros devem ser definidos, muitos dos quais são conhecidos como parâmetros de corte.

Parâmetros de corte são grandezas numéricas que representam valores de deslocamento da ferramenta ou da peça, adequados ao tipo de trabalho a ser executado, ao material a ser usinado e ao material da ferramenta. Os parâmetros ajudam a obter uma perfeita usinagem por meio da utilização racional dos recursos oferecidos por determinada máquina-ferramenta.

Para uma operação de usinagem, o operador considera principalmente os parâmetros:

- Velocidade de corte;
- Avanço.

Além desses, há outros parâmetros mais complexos tecnicamente e usados em nível de projeto:

- Profundidade de corte.
- Área de corte.
- Pressão específica de corte.
- Força de corte
- Potência de corte

A determinação desses fatores depende de muitos outros requisitos e influências, tais como, o tipo de operação, o material a ser usinado; o tipo de máquina-ferramenta; a geometria e o material da ferramenta de corte. Além disso, os parâmetros se inter-relacionam de tal forma que, para determinar um, geralmente, é necessário conhecer os outros.

Considerando a aplicação da usinagem de uma peça específica, observa-se que diversos parâmetros podem influenciar na usinagem dessa peça. Sendo assim, ao utilizar métodos tradicionais, que não visam a otimização, a aplicação do processo torna-se empírica. Assim, para aquele caso específico, os parâmetros exatos de corte e projeto, a organização, o layout dos equipamentos e a logística da produção não são definidos de forma perfeita. A forma de definição não utiliza métodos que levam em consideração todos os dados, fatores e requisitos específicos do cenário.

A tecnologia surge, portanto, como uma forma de atuar nesse problema, otimizando o processo de usinagem, economizando recursos financeiros, elevando a produtividade e



a qualidade dos produtos. Dessa forma, as organizações no novo mercado trazido pela Indústria 4.0.

### 1.3 Cenário de mudança da Indústria: A Indústria 4.0

O termo Indústria 4.0 surgiu em 2012, na Alemanha [16],[17],[18] e [19]. O governo federal alemão lançou o termo como um projeto futuro, inserido no planejamento do plano de desenvolvimento tecnológico “Hightech Strategy 2020”, lançado em 2010.

Esta iniciativa visava examinar o elevado potencial econômico e de inovação causadas pelo impacto das tecnologias de informação e de comunicação na indústria. O termo indústria 4.0 resulta de variados momentos históricos de revoluções industriais.

A seguir, estão os artigos selecionados para apresentasr as discussões centrais sobre a indústria 4.0 na atualidade:

- Descreve as características da indústria 4.0 podem ser classificadas a partir da consideração de três tipos de integração: 1) integração horizontal a partir das redes de valor, 2) integração vertical e sistemas de manufaturas conectados, e 3) integração de engenharia ponta a ponta através da cadeia de valor [16];
- Apresenta uma análise crítica dos principais desafios e oportunidades que surgem com o advento da 4ª Revolução Industrial. Através de uma revisão da literatura, o trabalho descreve os componentes da indústria 4.0 e a combinação entre tecnologias avançadas e internet para criar novas oportunidades [17];
- Aborda a visão das mudanças dentro das organizações. De acordo com o autor, cada vez mais as organizações abordam pontos relacionados à inovação e a gestão do conhecimento, possibilitando a potencialização do capital humano. Com a implantação da indústria 4.0 fica cada vez mais claro que as empresas que não se adequarem a um novo modelo de negócio estarão fadadas ao encerramento de suas atividades [18];
- Por fim, este último artigo aborda uma visão sobre os desafios do presente e do futuro para as relações de consumo. Este, portanto, traz uma visão focada nas pessoas e na economia colaborativa. De acordo com o autor, os computadores e todas as suas variações de dispositivos conectados à web promovem mudanças tanto no modo de estudar e de trabalhar quanto no modo de consumir e no ambiente de lazer, provocando uma invasão irreversível do virtual sobre o real no modo de viver do ser humano. Neste artigo, há uma visão crítica sobre as mudanças de comportamento nas pessoas, a partir do advento da Indústria 4.0 [19].

Como visto, as três primeiras revoluções foram, respectivamente, fruto da mecanização, eletricidade e tecnologia da informação. E, atualmente, a quarta revolução industrial está se iniciando devido à inserção da Internet no âmbito da manufatura que desenvolve os sistemas físicos cibernéticos.

No ambiente de manufatura, os sistemas supracitados englobam máquinas inteligentes, sistemas de estoque e instalações industriais capazes de realizar a comunicação e o controle autônomo. Essas mudanças permitem a eclosão de fábricas inteligentes, onde se pode realizar o processamento de ordens individuais de clientes, prover um sistema de produção adaptável a variações, e garantir a transparência para a melhoria na tomada de decisões, como tratado pelos autores Anis Assad Neto, Gustavo Bernardi Pereira, Fabiano Oscar Drozda e Adriana de Paula Lacerda Santos, no artigo [19].

### 1.3.1 A base da Indústria 4.0

Dois pontos são de grande importância para que uma empresa desenvolva um modelo 4.0 industrial: o conhecimento de dados da organização e a gestão da inovação [20].

No primeiro caso, conclui-se que um dos fatores importantes para se obter o domínio da indústria 4.0 é adquirir, reter, aprimorar e utilizar o conhecimento. As organizações em redes aumentam as capacidades disponíveis sem a necessidade de novos investimentos, potencializando suas ações e seus processos produtivos.

A estratégia competitiva de uma empresa e a estratégia de gestão do conhecimento baseiam-se intensivamente no uso das tecnologias de informação e de comunicação, o que permite inúmeros ganhos de produtividade e de satisfação de seus usuários.

Dessa forma, nota-se que o objetivo da gestão do conhecimento deve ser o de movimentar a organização para o conhecimento e este possibilitar mudanças inovadoras capazes de diferenciar a organização de seus concorrentes. Para isso, todo um processo deve ser implantado, desenvolvido e mantido.

Acredita-se que 80% da gestão do conhecimento nas empresas está relacionada ao conhecimento gerado e compartilhado pelas pessoas, e os outros 20% estão relacionados à inovação e tecnologias, muitas vezes trazidas de fora das empresas.

Em relação à gestão de inovação nas organizações, a inovação ocorre do propósito das organizações em lidarem com novas oportunidades e ameaças, o que gera a necessidade de criarem continuamente produtos e serviços [20].

A gestão da inovação e a indústria 4.0 são componentes irreversíveis para que uma organização possa sobreviver. Sendo assim, a atualização profissional torna-se essencial, aumentando cada vez mais a importância do capital humano nas empresas, potencializando também o conhecimento adquirido e desenvolvido com as suas experiências.

A figura 1 a seguir demonstra os conceitos chaves da Indústria 4.0.



Figura 1 – Pilares para indústria 4.0.

Fonte: baseado em Hermann et al (2016). [18]

#### 1.4 Motivação e Objetivos

O avanço tecnológico ocorrido nos últimos anos tem trazido diversas transformações em todo o mundo. As informações mais que dobram a cada dois anos, empregos que existem hoje não existiam há dez anos e o mercado tem mudado constantemente.

Analisando o cenário brasileiro, percebe-se que o avanço do país, voltado à inovação, desenvolvimento e cultura, não tem acompanhado, em grande parte, as mudanças tecnológicas ocorridas.

Ao se analisar as mudanças que estão ocorrendo em nível industrial, é importante trazer insumos de Schwab (2016). De acordo com esse autor, são quatro as principais alterações esperadas na Indústria em geral:

- 1) Alterações nas expectativas dos clientes;
- 2) Produtos mais inteligentes e mais produtivos;
- 3) Novas formas de colaboração e parcerias;

4) A transformação do modelo operacional e conversão em modelo digital.

Coelho (2016) afirma que do ponto de vista industrial, houve uma evolução da produção em massa para uma customização em massa [20].

A customização em massa é definida como produção de bens ou serviços que atendem desejos específicos e individuais à custos reduzidos, muito próximos dos custos de produção em massa sem customização. Isso só é possível com uma grande agilidade e flexibilidade da empresa e dos métodos produtivos.

Esta mudança de paradigma tem forçado as organizações a repensar o seu modelo operacional, de forma a se tornarem mais rápidas, ágeis e adaptadas ao mundo em constante mudança. Mundo esse que traz um mercado muito mais competitivo e com um grupo consumidor cada vez mais exigentes.

Para que as mudanças na indústria ocorram de forma paralela às mudanças do mundo, diversas transformações no processo produtivo precisaram ocorrer. Dentre elas, uma importante etapa do processo é exatamente a Usinagem.

O princípio da Usinagem se baseia na remoção de material que ocorre através da interferência entre ferramenta e peça, sendo a ferramenta constituída de um material de dureza e resistência superior à do material da peça. Existem diversos processos de usinagem, entre eles torneamento, fresamento, aplainamento, furação, serramento, dentre outros.

Além de ser um processo que se iniciou no início do desenvolvimento das habilidades humanas, possui hoje uma enorme aplicação na produção de materiais mecânicos, peças, equipamentos e outros produtos.

Com a mudança tecnológica, diversos processos novos de usinagem têm surgido, muitos dos quais permitem inserir o processo de produção mecânica no que Schwab chamou de 4ª Revolução Industrial.

Considerando a problemática trazida acima, o objetivo do trabalho é trazer uma visão aprofundada sobre os diversos métodos computacionais que têm sido utilizados na otimização de processos de corte. Além disso, irá comparar as vantagens de aplicação desses métodos, considerando os custos e recursos utilizados na aplicação.

Esta análise será feita a partir de estudos em diversos artigos coletados que trabalham diferentes tipos de processo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Métodos computacionais na otimização do Processo de Usinagem

O presente tópico visa trazer uma análise da utilização da tecnologia, Inteligência artificial (IA) e métodos computacionais nos processos de usinagem, mostrando as vantagens dos métodos e a evolução ocorrida com o tempo.

Percebe-se que o início da utilização desses métodos iniciou a partir de meados do ano 2000, evoluindo até os dias atuais.

#### 2.1.1 O surgimento da IA aplicada à Usinagem

Bernardos e Vosniakos, (2003) avaliam e caracterizam os métodos e tecnologias que estavam sendo desenvolvidas para a previsão da rugosidade superficial, tornando o processo de fabricação mais produtivo e competitivo [8].

A rugosidade superficial é uma medida das variações do relevo que pode ser dada de uma superfície. Manter a rugosidade dentro de uma determinada faixa é extremamente desafiador quando se fala de Usinagem.

Considerando esse ponto, algumas metodologias e experimentos, surgem como uma alternativa para solucionar esse cenário. Entre os tratados pelos autores P.G. Benardos, G.-C. Vosniakos, (2003), a IA é trazida como principal solução [8].

Para que os métodos evoluam e seja possível otimizar os processos, surge e aplica-se o conceito de IA. A IA é implementada em problemas de engenharia através do desenvolvimento da Rede Neural Artificial (RNA), Algoritmos Genéticos (AG), lógica nebulosa e sistemas especializados. Em problemas de previsão de rugosidade da superfície, trabalho publicado, é baseado principalmente em RNAs e AGs.

O processamento da informação ocorre em vários elementos chamados neurônios. Os sinais são transmitidos entre os neurônios através de conexões. Cada link de conexão tem um peso associado que multiplica o sinal transmitido.

As duas principais características de uma RNA são: (i) padrão de organização dos neurônios, nomeadamente arquitetura a interpretação da rede, que geralmente dita que tipos de problemas podem ser tratados (Figura 2); (ii) o método de determinar os pesos das conexões, usando um algoritmo de treinamento que generaliza a relação da entrada com exemplos de vetores de saída (treinamento supervisionado) ou inferências (Figura 3).

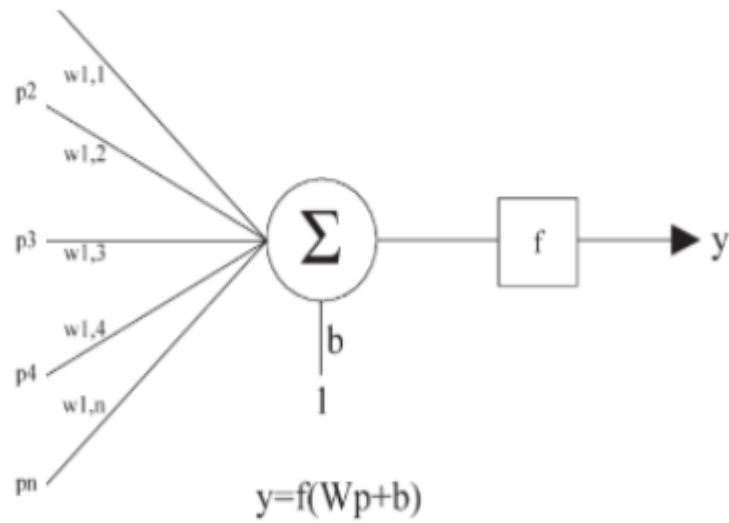


Figura 2 – Neuron Model.

[8]

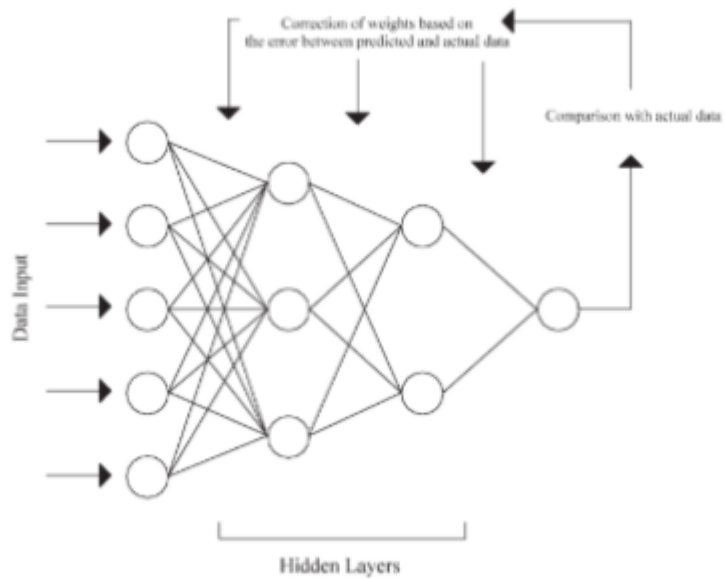


Figura 3 – Supervised learning procedure of a typical feedforward network

[8]

Na figura 3 podemos ver como ocorre a atualização dos pesos para que a estrutura tente chegar o mais próximo do resultado requerido.

Basicamente, a utilização da IA aplicada à Usinagem permite identificar padrões em cada aplicação do processo, de forma que o sistema aprenda com esses padrões e possa prever como otimizar o processo de usinagem no processo produtivo, melhorando a rugosidade, a qualidade da peça e a eficiência produtiva.

### 2.1.2 Elementos finitos (FEM) aplicado à Usinagem

Hui (2011) traz a utilização do método de elementos finitos aplicado à usinagem. Posteriormente será visto que esse método está ultrapassado, considerando outros métodos mais efetivos, porém, considerando o ponto de vista de recursos financeiros e de tempo, é um método de bom custo benefício [11].

O Método dos Elementos Finitos (MEF) (Finite Element Method - FEM) é um procedimento numérico para determinar soluções aproximadas de problemas de valores sobre o contorno de equações diferenciais. O MEF subdivide o domínio de um problema em partes menores, denominadas elementos finitos.

Esse autor ainda aborda o tema de uma simulação, utilizando o método de elementos finitos para a formação do cavaco tendo como objetivo de análise a observação da distribuição da temperatura, as deformações e as forças de corte [11].

A partir desse trabalho, é possível explicar a metodologia utilizada nesse método, descrita a seguir:

1) A primeira etapa do processo corresponde à definição de parâmetros como geometria da peça e da ferramenta, propriedades dos materiais da peça e da ferramenta, condições de corte, entre outros aspectos, conforme pode se ver nos exemplos da Tabela 1:

$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/rev)	$a_p$ (mm)	Peça (AISI)	Substrato	Cobertura
150	0,07	0,2	4340	WC	TiN
150	0,17	0,2	4340	WC	TiN
200	0,07	0,2	4340	WC	TiN
200	0,17	0,2	4340	WC	TiN

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para a modelagem. [11]

2) Define-se o modelo correspondente à peça e ao material dela, para que o modelo matemático seja definido.

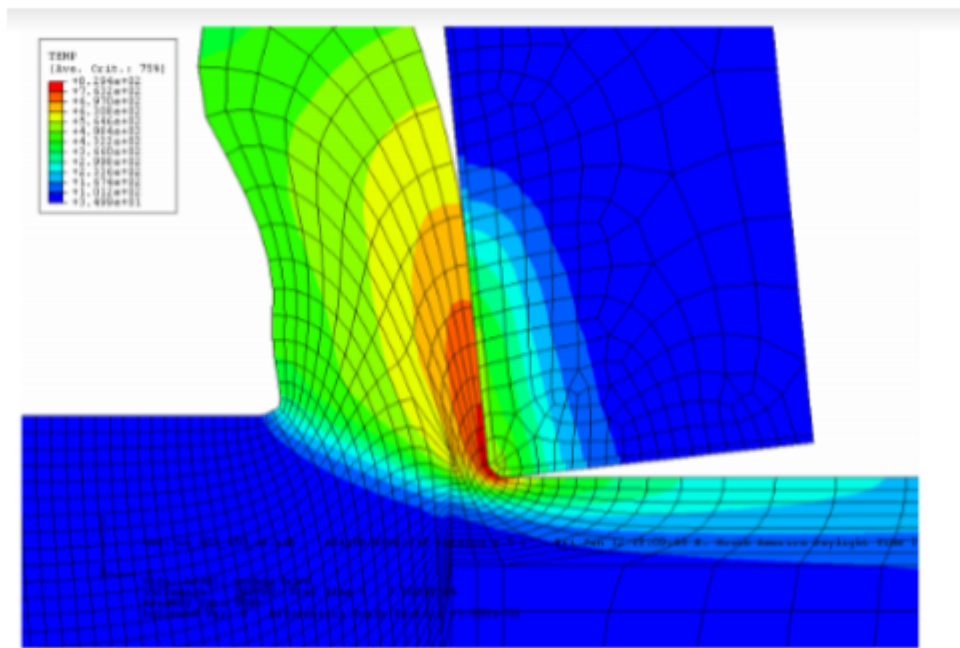
Utilizou-se um modelo matemático baseado na curva de Johnson-Cook, conforme a seguinte equação:

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\epsilon}^n) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right]$$

Onde  $\bar{\sigma}$  é a tensão equivalente;  $\bar{\epsilon}$  é a deformação plástica equivalente é a taxa de deformação plástica;  $\dot{\bar{\epsilon}}$  é a taxa de deformação referente;  $T$  é a temperatura ambiente;  $T_{melt}$  é a temperatura de fusão;  $T_{room}$  é a fusão de cisalhamento equivalente.  $B$  é módulo de encruamento;  $n$  é a expoente do trabalho a frio;  $C$  é coeficiente da dependência da taxa de deformação (MPa);  $m$  é coeficiente térmico.

3) Realiza-se os experimentos, inserindo os dados obtidos na equação, plotando-a em um Software (ABAQUS/Explicit).

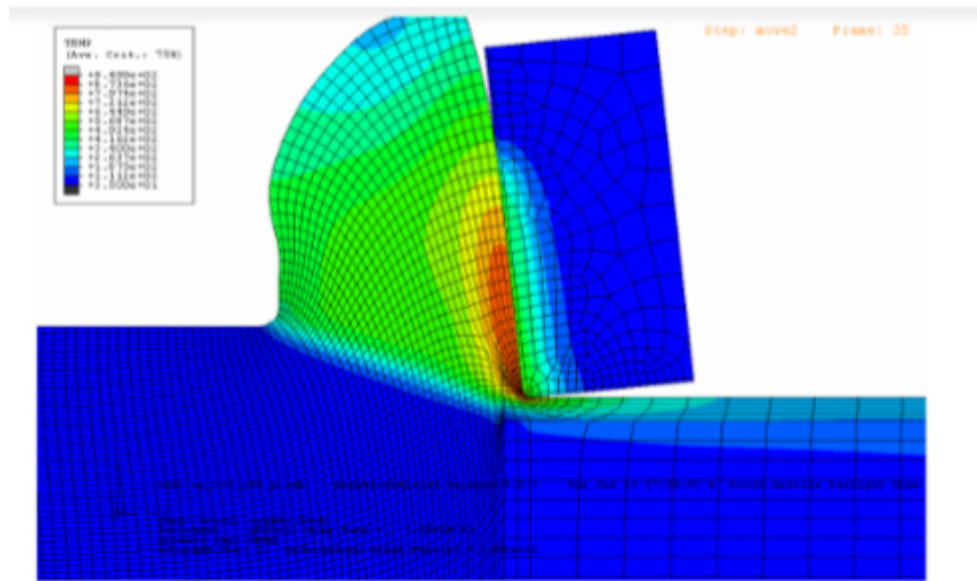
4) A partir disso, obtém-se os resultados, como mostrado nos exemplos a seguir:



(a) Condição 1,  $v_c = 150$  m/min,  $f = 0,07$  mm/rev,  $b = 0,2$  mm, WC recoberto com TiN em AISI 4340.

Figura 4 – (a) Condição 1,  $v_c = 150$  m/min,  $f = 0,07$  mm/rev,  $b = 0,2$  mm, WC recoberto com TiN em AISI 4340

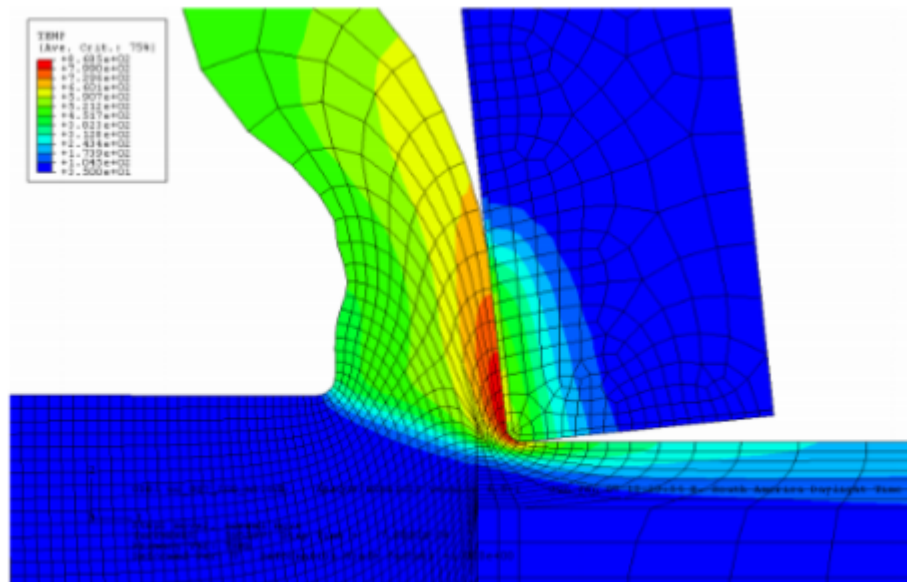




(b) Condição 2,  $v_c = 150$  m/min,  $f = 0,17$  mm/rev,  $b = 0,2$  mm, WC recoberto com TiN em AISI 4340.

Figura 5 – (b) Condição 2,  $v_c = 150$  m/min,  $f = 0,17$  mm/rev,  $b = 0,2$  mm, WC recoberto com TiN em AISI 4340.

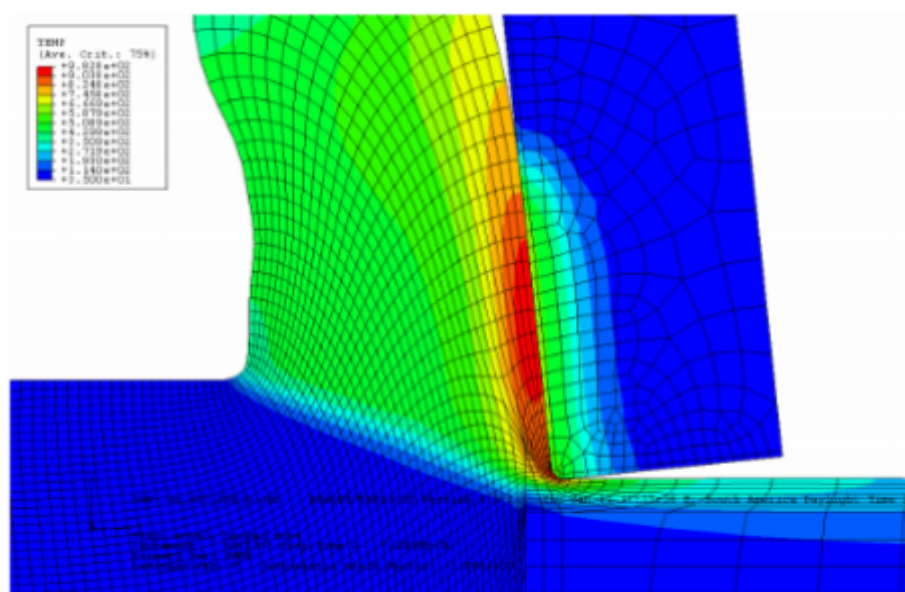
[11]



(c) Condição 3,  $v_c = 200$  m/min,  $f = 0,07$  mm/rev,  $b = 0,2$  mm, WC recoberto com TiN

Figura 6 – (c) Condição 3,  $v_c = 200$  m/min,  $f = 0,07$  mm/rev,  $b = 0,2$  mm, WC recoberto com TiN

[11]



(d) Condição 4,  $v_c = 200$  m/min,  $f = 0,17$  mm/rev,  $b = 0,2$  mm, WC recoberto com TiN em AISI 4340.

Figura 7 – (d) Condição 4,  $v_c = 200$  m/min,  $f = 0,17$  mm/rev,  $b = 0,2$  mm, WC recoberto com TiN em AISI 4340.

[11]

Priyadarshini et al (2012) também dissertam sobre a utilização do método de Elementos Finitos, mas aplicado à análise de dois fatores críticos durante corte ortogonal do aço AISI 4340, a caracterização da tensão de escoamento do material de trabalho e a fricção nas condições de contorno na interface ferramenta-peça. Este artigo enfoca o desenvolvimento de um modelo 2D de processo de formação de cavacos baseado em condições de corte ortogonais. O módulo do software de elementos finitos ABAQUS / Explicit versão 6.7 foi empregado para executar o estudo do processo de formação de cavacos [6].

### 2.1.3 A utilização de Redes Neurais aplicada à Usinagem

A utilização de Redes Neurais aplicado à Usinagem surge em 2002, porém, a partir de 2010 esse método vem sendo mais difundido e aplicado.

Por meio de experimentos utilizou-se de redes neurais artificiais e modelos de regressão para modelar a rugosidade no torneamento [1].

As redes neurais utilizam algoritmos que permitem que elas reconheçam padrões escondidos e correlações em dados brutos, agrupando-os e classificando-os, e, com o tempo, possibilitam que o sistema aprenda e melhore, continuamente.

Por meio desse trabalho é possível definir como esse método é construído, o que é

descrito a seguir:

1) Para que a rede funcione, é preciso que haja um mínimo de dados experimentais e que esses dados sejam modelados matematicamente. Dessa forma, utilizam-se os dados obtidos em experimentos de corte para obter insumos, utilizando esse método.

A velocidade de corte ( $V$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $d$ ) são considerados parâmetros do processo. As camadas de entrada da rede neural consistem em três neurônios.

Utiliza-se algumas equações inseridas nos algoritmos que permitem que a rede funcione baseada nos modelos matemáticos utilizados. Algumas são relacionadas a seguir:

A rugosidade média da superfície é definida com base na norma ISO 4287, que é a média aritmética dos desvios do perfil de rugosidade da linha central ao longo da medição. Onde  $\lambda$  é o comprimento da amostra e  $r$  é a coordenada do perfil curva. A relação entre a rugosidade da superfície e as variáveis de usinagem pode ser definida como: onde  $R_a$  é a rugosidade da superfície,  $V$ ,  $f$ ,  $d$  e  $r$  são velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e raio do nariz da ferramenta.

Essas equações mostram que a rugosidade aumenta com a taxa de avanço, mas um maior raio de ponta da ferramenta reduz a rugosidade superficial de uma peça torneada. Estes modelos, porém, não levam em consideração fatores que podem afetar no processo, como aderência de cavacos e vibração da ferramenta. É a partir disso que surge a segunda etapa.

2) A rede neural funciona quando é alimentada por diversos dados e dessa forma pode obter insumos que não são definidos matematicamente, como anteriormente definido. Os dados são comparados com a situação teórica, de forma que um modelo real é criado.

3) A inserção de novos parâmetros, considerando que a rede já está completa, permite a saída da resposta, no caso a rugosidade, baseado no aprendizado que a própria rede teve (Figura 8).

No experimento trazido por esses autores, foram feitas dez corridas iniciais para se obter uma boa solução, ou seja, para forçar a rede a aprender com os erros [1].

O setup utilizado nos experimentos permite uma melhor visualização do experimento:

Pontes et al (2010) também utilizam este método. O estudo apresenta uma DOE abordagem baseada no projeto de RNAs da arquitetura da função de base radial (RBF) aplicado à previsão de rugosidade da superfície no torneamento de aço temperado AISI 52100 (Figura 9) [24].

O DOE é empregado para selecionar níveis de fatores que beneficiam habilidades de previsão de rede.

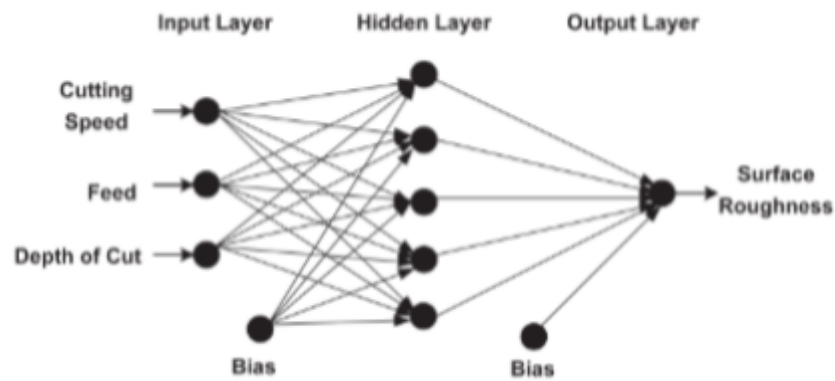


Figura 8 – ANN Structure

[1]

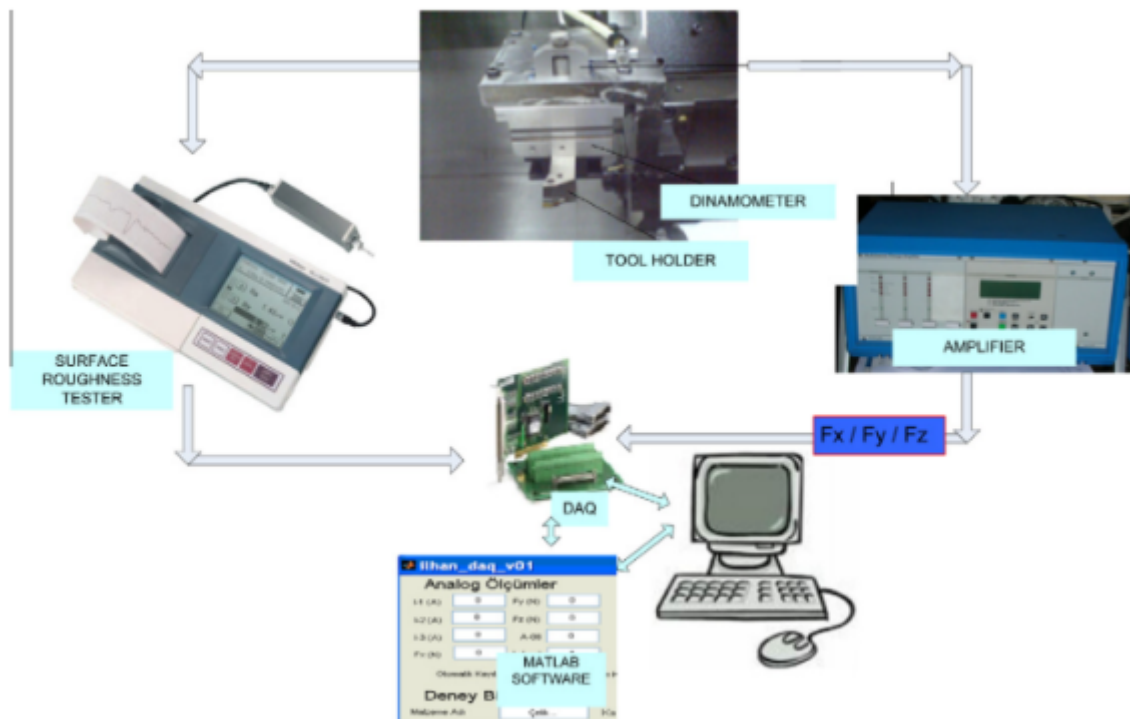


Figura 9 – Experimental Setup

[24]

Na comparação com trabalhos anteriores, os autores são inovadores nos seguintes pontos:

- O uso da técnica fatorial completa para o desenho da RBF na predição da rugosidade da superfície, considerando um banco de dados grande;
- O estudo da importância relativa dos fatores de design no desempenho da rede;
- A avaliação da precisão alcançável em superfícies previsão de rugosidade para

torneamento de aço AISI 52100 para quantidades distintas de exemplos disponíveis para o treinamento redes;

- A investigação da existência e significado de interações entre fatores de design na rede desempenho.

O procedimento experimental consistiu nas seguintes etapas:

- Operações de corte destinadas a criar um banco de dados para treinar e selecionar as RNAs;

- Geração de conjuntos de dados de treinamento e teste;

- Experimentos de simulação, planejados de acordo com o DOE técnicas, destinadas a identificar as melhores topologias de rede;

- Experiências confirmativas destinadas a validar as topologias de rede identificadas durante experimentos planejados [24].

Além disso, observa-se a utilização do método por Redes Neurais aplicados não só à avaliação da rugosidade da peça, como também na avaliação do desgaste da própria ferramenta. Sick (2001), por exemplo, tem como foco mostrar as principais pesquisas na área relacionadas a área de monitoramento de ferramenta de corte, utilizando redes neurais [25].

Este artigo foca na determinação do desgaste das ferramentas, a mais difícil das três tarefas. A importância do monitoramento do desgaste da ferramenta está implícita em suas vantagens econômicas.

Com uma estimativa precisa do desgaste da ferramenta, pode até ser possível ajustar a ferramenta posição para atender às especificações geométricas e controlar a taxa de desgaste da ferramenta para garantir uma certa qualidade de superfície da peça de trabalho (ou seja, rugosidade).

As abordagens científicas de hoje na área de monitoramento de desgaste da ferramenta geralmente medem vários parâmetros do processo indiretamente correlacionados com a ferramenta desgaste (como força, emissão acústica, sinais de vibração). Esses sinais são medidos on-line, ou seja, durante um processo de corte.

Como conclusão das investigações descrito na (ref.) 28, pode-se afirmar que a experiência com modelos de desgaste neural é muito pobre. É uma questão de conhecimento comum que os parâmetros do processo são influenciados por condições de corte. Contudo, informações específicas do processo não são usadas em cerca de 40% das publicações. Em 45% das publicações utilizam-se condições de corte como recursos adicionais de entrada, ou seja, como entradas de uma rede neural no nível do modelo de desgaste.

Outro artigo que traz o tema de Otimização de Processos de Usinagem utilizando

o método de redes neurais, é de Silva et al (2017). O trabalho tem como foco a utilização de um modelo de rede neural artificial (ANN) para prever a rugosidade de superfícies mecânicas e a força de corte em um processo de torneamento CNC, com a velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, e raio de ruído da ferramenta [29].

O artigo, que é de 2015, utiliza o modelo de propagação reversa de rede neural artificial seguindo o método Bayesian Regulation, baseado na otimização Levenberg-Marquardt. Tal método é uma técnica de otimização que conecta os parâmetros de entrada e saída com neurônios. O número de neurônios e camadas são fatores chave para o uso eficiente da rede.

Observa-se que neste trabalho foi possível prever a rugosidade de superfícies e as forças de corte no processo de torneamento CNC através da utilização de redes neurais com quatro fatores de entrada. A confiabilidade da rede foi testada e observada através do erro percentual entre os dados obtidos experimentalmente e através do método.

Com isso, pode-se perceber que tal método é confiável, possuindo um coeficiente de correlação satisfatório  $R = 0,9757$  e maior do que quando comparado com outros métodos de análise como regressões lineares e quadráticas.

#### 2.1.4 A utilização do método Taguchi na Usinagem

Para embasar a discussão sobre esse método, foi analisado o artigo de Asiltürk e Akkus, (2011) [2]. Este tem como objetivo a utilização do método de Taguchi para minimizar a rugosidade superficial no processo de usinagem de torneamento. O experimento foi conduzido utilizando um torno CNC, no aço AISI 4140.

O estudo se baseia na utilização do método Taguchi para determinar quais os parâmetros que têm maior influência na rugosidade superficial produzida no processo de torneamento com CNC. Os testes foram realizados com o aço AISI 4140 com ferramenta de corte de metal duro. Cada experimento foi repetido três vezes e cada teste usou uma nova pastilha para que as leituras da superfície fossem precisas.

Para experimentos como torneamento onde há muitas variáveis que afetam o resultado final são necessários muitos experimentos para poder concluir qual das variáveis que possui maior influência no resultado. O método de Taguchi tem por característica um número de experimentos necessários menor e uma confiabilidade alta para as conclusões.

A análise estatística sinal/ruído proposta pelo método de Taguchi e análise de variáveis (ANOVA) foram utilizadas para determinar os efeitos da velocidade de corte, taxa de avanço e profundidade.

Metodologia utilizada pelos autores:

O aço utilizado foi o AISI 4140, com dimensões de 110x600 milímetros. A peça

passou por tratamento térmico de têmpera e revelimento para diminuir tensões residuais. Os experimentos foram realizados com um torno CNC Mori Seiki NL 2500 com condições de corte a seco. O suporte de ferramenta usado foi o modelo MWLNR 2525M-0.8W com pastilhas revestidas com e (WNMA 080408). A rugosidade da superfície foi medida usando o dispositivo portátil Mitutoyo SJ-301P com comprimento de amostragem de 2,5 cm.

A figura mostra o arranjo feito para o experimento (Figura 10).

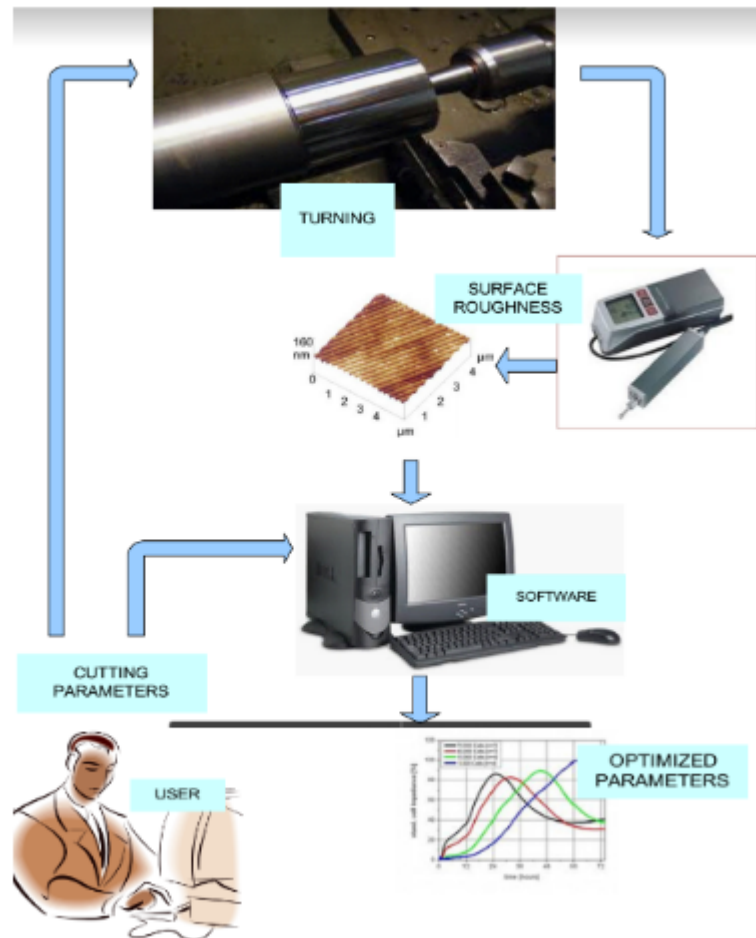


Figura 10 – Experimental scheme

[2]

A Tabela 1 expressa os parâmetros utilizados:

Com o método de Taguchi é possível diminuir o tempo de experimento, porque há um menor número de combinações de variáveis possíveis a se verificar. A relação sinal ruído funciona como um valor mensurável e compara o nível de sinal desejado com o ruído presente neste resultado.

A Tabela 2 representa os resultados:

**Table 1**  
Cutting parameters.

Symbol	Cutting parameters	Level 1	Level 2	Level 3
A	Cutting speed (m/min)	90	120	150
B	Feed rate (mm/rev)	0.18	0.27	0.36
C	Depth of cut (mm)	0.2	0.4	0.6

Tabela 2 – Parâmetros de Corte

[2]

**Table 2**  
The results of experiments and  $S/N$  ratios values.

Experimental number	A	B	C	Ra	Rz	Ra for $S/N$ ratios	Rz for $S/N$ ratios
1	1	1	1	1.6	8.79	-4.23	-18.88
2	1	2	2	1.79	14.22	-3.37	-23.058
3	1	3	2	4.22	19.87	-12.48	-25.964
4	2	1	2	1.21	8.62	-2.32	-18.75
5	2	2	2	2.47	11.72	-7.87	-21.379
6	2	3	1	3.78	15.94	-10.79	-24.05
7	3	1	3	1.17	8.66	-3.37	-18.76
8	3	2	1	2.21	9.25	-6.99	-19.323
9	3	3	2	2.51	12.12	-7.76	-21.67

Tabela 3 – Os resultados dos experimentos e  $S/N$  valor dos índices

[2]

### 2.1.5 Método dos mínimos quadrados aplicado à Usinagem

Um modelo de regressão quadrática de segunda ordem é desenvolvido usando o método dos mínimos quadrados e utilizando-se dos resultados da técnica de projeto fatorial completo para aproximar a relação da rugosidade superficial e os parâmetros do processo de fresamento de face do aço de alta resistência [5].

Para isso, um modelo de regressão quadrática foi criado para encontrar a influência que os parâmetros de corte possuem na rugosidade final Ra e Rt.

A metodologia descrita a partir do método é inserida a seguir, bem como as conclusões acerca de seus benefícios e desvantagens.

1) Realiza-se a remoção do material, realizando-se três leituras para cada operação de remoção de material.

Como exemplo, é inserida uma Tabela 4 que mostra os parâmetros utilizados no método fatorial do artigo.

2) Utiliza-se o planejamento fatorial completo para construir o experimento com três variáveis independentes (fatores) e quatro níveis para cada um. No artigo, a análise de variância (ANOVA) foi realizada para testar a significância dos fatores e sua interação com um nível de confiança de 95%.

3) Utiliza-se o método dos mínimos quadrados para construir modelos de regressão múltipla de segunda ordem.



Designation	Process parameter	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
A	Spindle speed (rpm)	500	750	1000	1250
B	Depth of cut (mm)	0.25	0.50	0.75	1.00
C	Feed rate (mm/min)	50	75	100	125

Tabela 4 – Os parâmetros de corte e seus níveis utilizados no experimento de design fatorial [5]

A utilização desse método e a observação preliminar dessas curvas indica que os valores de rugosidade da superfície ( $R_a$ ) aumentam com aumento da taxa de avanço da mesa para ambas as velocidades de rotação (Figura 11).

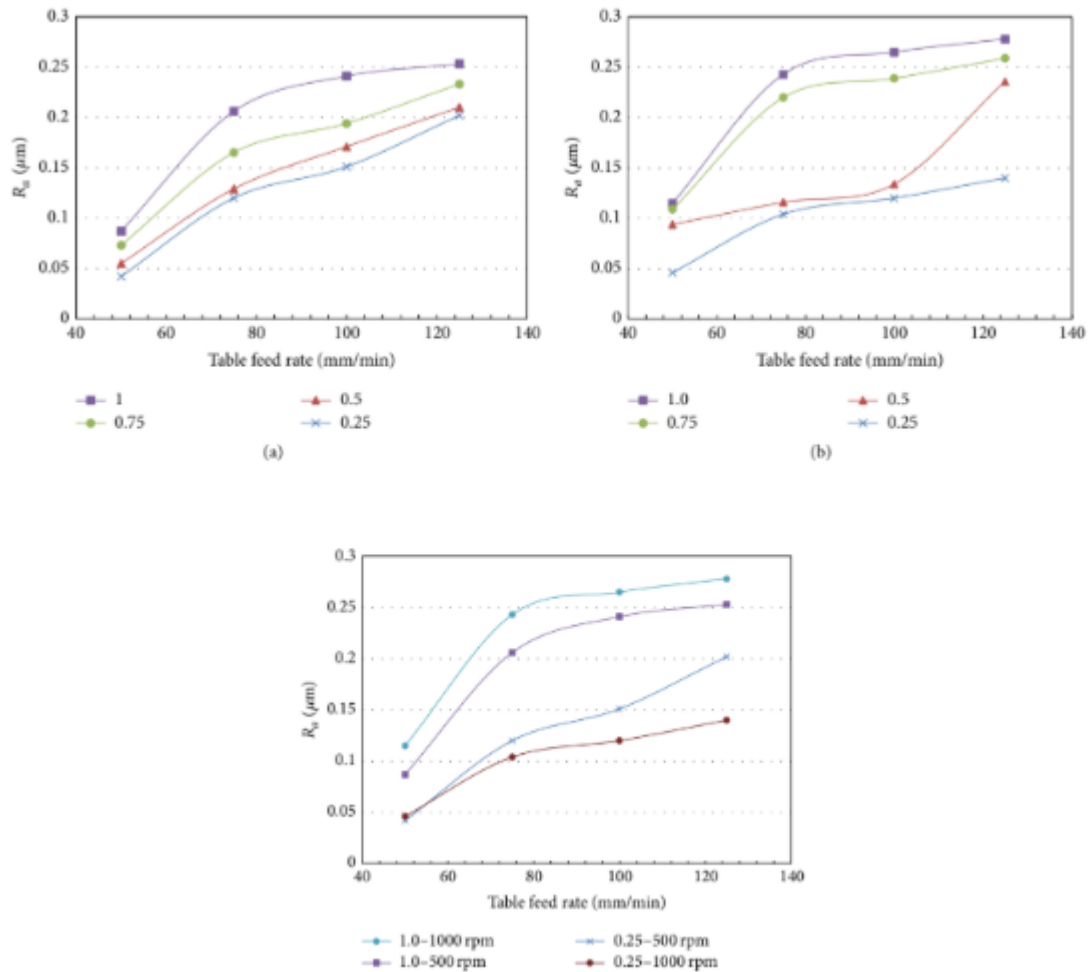


Figura 11 – The effect of table feed rate on  $R_a$  for different depth of cuts ( mm) at 500 rpm in (a) and 1000 rpm in (b)

[5]

No artigo também foi possível estimar os fatores influenciadores na rugosidade superficial, assim, determinando um modelo para estimar  $R_a$ , por meio da utilização do método de avaliação de resultado ANOVA.

No artigo de Horvath e Drégelyi-Kiss (2015), o mesmo método é abordado. Neste, investiga-se sobre o torneamento fino de dois tipos de alumínio com ferramentas de diamante com aspectos diferentes e com características de ponta e arestas, para reduzir a rugosidade superficial, visto que é uma das principais características da peça final, que influencia diretamente no uso da peça e vida útil [3].

No artigo foi encontrado como principal parâmetro que afeta a rugosidade superficial a velocidade de corte e a alimentação, resultados diferentes dos encontrados nos artigos “Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method” e “Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method”, onde a taxa de alimentação foi o principal fator.

#### 2.1.5.1 Sistema de Interferência Neuro-difusa (ANFIS)

Para que seja possível explicar esse método, foi realizado o estudo de Dambatta et al (2019) . Esse trabalho tem como objetivo fornecer uma análise experimental do processo de retificação durante a usinagem de alumínio Al6061-T6, fornecer os efeitos dos parâmetros de entrada, profundidade de corte, pressão do ar e taxa de alimentação nas forças de moagem e na qualidade da rugosidade superficial com modelagem de predição adaptativa do sistema de inferência neuro-difusa, ANFIS [9].

Utilizou-se as técnicas de IA para que o processo fosse altamente preciso e adaptável na previsão da usinagem. Além disso, devido à capacidade de aprendizado e adaptação de ANFIS, confirmou-se que supera a previsibilidade dos modelos de regressão, RNA e lógica fuzzy.

Nesta pesquisa, uma investigação experimental foi realizada para encontrar a relação entre a nanolubrição MQL parâmetros (ou seja, pressão do ar e concentração percentual de nanopartículas) e os parâmetros do processo de moagem (ou seja, profundidade de taxa de corte e alimentação).

O processo de design do experimento Taguchi é uma ferramenta importante que diminui significativamente a dificuldade do trabalho experimental reduzindo as execuções experimentais.

A modelagem ANFIS representa uma relação mapeada entre parâmetros de entrada e parâmetros de saída através de um processo de aprendizado híbrido para obter uma distribuição ideal de funções de associação definidas.

O modelo ANFIS neste trabalho foi construído sobre o Software MATLAB R2015a. O sistema consiste em cinco camadas diferentes de neurônios. Os fatores e os níveis do desenho experimental de Taguchi foram usados para treinar o sistema de interface fuzzy (FIS) do tipo Sugeno usando os resultados obtidos a partir dos experimentos de moagem,

tendo os resultados, como exemplo, comparados na Tabela 5 a seguir:

S/n	Parameters				Measured			ANFIS predicted		
	A	B	C	D	F <sub>N</sub>	F <sub>T</sub>	Ra ( $\mu\text{m}$ )	F <sub>N</sub>	F <sub>T</sub>	Ra ( $\mu\text{m}$ )
1	0	7	10	4.90	6.38	4.9	0.611	6.44	4.83	0.609
2	2	10	15	7.36	8.96	6.86	0.622	9.02	7.1	0.631
3	4	8	23	4.90	4.85	5.1	0.714	4.72	5.2	0.701
4	6	11	23	9.70	8.08	5.2	0.600	8.12	4.59	0.606
5	0	6	10	7.36	5.98	4.1	0.542	6.29	4.05	0.555
6	2	3	18	9.70	3.36	2.70	0.472	3.24	2.72	0.478
7	4	9	15	2.45	6.88	5.31	0.533	7.04	5.2	0.525
8	6	3	10	4.90	3.23	2.92	0.424	3.07	2.79	0.416

Tabela 5 – O efeito da taxa de crescimento da tabela em Ra para dois valores de profundidade de corte, de 1.0 e 0,25 mm, para duas velocidades de rotação do eixo, de 500 e 1000 rpm

[9]

#### 2.1.5.2 Método de Superfície de Resposta (RSM) e ANOVA

Para embasar a discussão acerca deste tema, foi analisado o trabalho de Hessainia et al (2013) [10]. Este, visa a obtenção de um modelo quadrático de RSM associado à análise de variância (ANOVA) para prever resultados de rugosidade superficial tendo como valores de entrada parâmetros do processo de fabricação como taxa de alimentação, velocidade e profundidade de corte.

O método teve como objetivo encontrar uma correlação entre rugosidade da superfície, vibrações na ferramenta de corte e parâmetros de corte. Os parâmetros de corte mencionados são velocidade de corte, taxa de avanço e profundidade de corte.

Foram especificados três níveis para os fatores, que serão usados nos experimentos, como descrito na Tabela 6:

Attribution of the levels to the factors.

Level	Cutting speed, Vc (m/min)	Feed rate, f (mm/rev)	Depth of cut, ap (mm)
1 (Low)	90	0.08	0.15
2 (Medium)	120	0.12	0.30
3 (High)	180	0.16	0.45

Tabela 6 – Configurações de parâmetros para teste de confirmação e resultado

[10]

Os experimentos serão feitos de acordo com as combinações entre os parâmetros, tendo, portanto, 27 experimentos, como mostrado na tabela 7

Orthogonal array  $L_{27}(3^{13})$  of Taguchi.

$L_{27}(3^{13})$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Tabela 7 – Matriz ortogonal  $L_{27}(3^{13})$  de Taguchi

[9]

Para aplicar os métodos definidos, serão necessários um total de 6 etapas. São elas:

- (1) definir as variáveis de entrada independentes e a saída desejada
- (2) adotar um plano de projeto experimental
- (3) realizar análise de regressão com o modelo quadrático de RSM
- (4) realizar uma análise estatística de variância (ANOVA) das variáveis de entrada independentes para encontrar parâmetros que afetam a resposta mais significativa
- (5) determinar a situação do modelo RSM e decidir se este modelo precisa ou não de variáveis de triagem
- (6) otimizar e realizar experimentos de confirmação com a verificação da rugosidade prevista da superfície

Observa-se que para o processo de usinagem, o ANOVA pode ser útil para determinar a influência de determinados parâmetros de entrada a partir de uma série de resultados experimentais por meio de projeto de experimentos (DOEs) e, por outro lado, pode ser usado para interpretar dados experimentais.

Uma ANOVA dos dados com a rugosidade da superfície ( $R_a$ ) e ( $R_t$ ) com o objetivo

de quantificar a influência da velocidade de corte ( $V_c$ ), da taxa de avanço ( $f$ ), profundidade de corte ( $ap$ ) e sinais de vibração ( $V_y$ ) e ( $V_z$ ) na variação total dos resultados, foi criada com um nível de confiança de 95%.

A regressão linear foi criada de acordo com Huang e Chen, mostrada como:

Para  $R_a$ :

$$\begin{aligned}
 R_a = & 0.0967 - 6.67 \times 10^{-3}V_c + 14.41f - 2.83 \\
 & \times 10^{-1}ap + 8.5 \times 10^{-3}V_y - 8.3 \times 10^{-2}V_z + 2.4 \\
 & \times 10^{-5}V_c^2 - 31.39f^2 - 2.1 \times 10^{-1}ap^2 - 6.94 \\
 & \times 10^{-2}V_y^2 - 3.11 \times 10^{-3}V_z^2 - 1.86 \times 10^{-2}V_c \cdot f \\
 & - 1.07 \times 10^{-4}V_c \cdot ap - 5.82 \times 10^{-4}V_c \cdot V_y \\
 & + 5.92 \times 10^{-4}V_c \cdot V_z + 3.46 \times 10^{-2}f \cdot ap - 2.96 \\
 & \times 10^{-1}f \cdot V_y - 5.85 \times 10^{-1}f \cdot V_z + 4.98 \\
 & \times 10^{-2}ap \cdot V_y + 1.59 \times 10^{-1}ap \cdot V_z + 1.03 \\
 & \times 10^{-1}V_y \cdot V_z
 \end{aligned}$$

Para  $R_t$ :

$$\begin{aligned}
 R_t = & 9.133 + 0.74 \times 10^{-2}V_c + 15.38f + 1.58ap + 7.51V_y \\
 & - 12.16V_z - 1.1 \times 10^{-4}V_c^2 - 164.28f^2 - 26.22ap^2 \\
 & - 5.14V_y^2 + 2.30V_z^2 + 1.70 \times 10^{-2}V_c \cdot f + 4.01 \\
 & \times 10^{-2}V_c \cdot ap - 1.75 \times 10^{-2}V_c \cdot V_y + 1.2 \times 10^{-2}V_c \cdot V_z \\
 & + 23.13f \cdot ap - 6.57f \cdot V_y + 20.54f \cdot V_z + 2.10ap \cdot V_y \\
 & + 3.06ap \cdot V_z + 1.08 \times 10^{-1}V_y \cdot V_z
 \end{aligned}$$

Os modelos foram reduzidos, tirando termos insignificantes:

$$\begin{aligned}
 R_a = & 0.0967 - 6.67 \times 10^{-3}V_c + 14.41f + 2.4 \\
 & \times 10^{-5}V_c^2 - 31.39f^2 - 1.86 \times 10^{-2}V_c \cdot f \\
 \\
 R_t = & 9.133 + 15.38f - 26.22ap^2 - 5.14V_y^2
 \end{aligned}$$

Com essas equações, é possível determinar valores para a rugosidade superficial de acordo com os parâmetros.

Para minimizar os valores de rugosidade propostos como foco, foi proposto uma otimização de acordo com a fórmula:

$$DF = (\prod_{i=1}^n d_i^{w_i})^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}}$$

$$F(x) = -DF$$

, em que  $d_i$  é a conveniência definida para a  $i$ -ésima saída direcionada e  $w_i$  é a ponderação de  $d_i$ .

Os resultados da otimização, como exemplo, são mostrados na Tabela 8:

Response optimization for the surface roughness parameters.

Parameters	Goal	Optimum combination					Lower	Target	Upper	Predicted response
		Vc (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)	Vy (m/s <sup>2</sup> )	Vz (m/s <sup>2</sup> )				
Rr (µm)	Minimum	180	0.08	0.15	0.999	0.862	0.30	0.30	0.78	0.21
Rz (µm)	Minimum	180	0.08	0.15	0.999	0.862	2.83	2.83	4.03	2.40
Desirability = 1										
Composite desirability = 1										

Tabela 8 – Otimização de resposta para os parâmetros de dureza da superfície

[10]

O artigo de Machado et al (2015) também trabalha com a utilização do método ANOVA. Neste caso, analisa-se a usinabilidade de materiais diferentes, variando parâmetros de corte para o torneamento a seco, tendo como parâmetro de qualidade a rugosidade superficial, obtida em três parâmetros, Ra, Rq e Rz [7].

Os resultados desse artigo se assemelham muito com o trabalho de Masmiahi et al (2016) que também utilizam o método ANOVA e RSM, visando a criação de um modelo matemático para previsão de tensão residual, força de corte e rugosidade superficial. A abordagem deste trabalho, porém, é de identificar o status de tensão residual na usinagem de metais, o que é muito importante, especialmente considerando o estresse residual por tração, que pode contribuir para que a falha por fadiga se inicie e promova a propagação de trincas nos componentes usinados [14].

O método de utilização do ANOVA e RSM em conjunto também é abordado no artigo de Meddour et al (2015). Este tem como foco a modelagem de um modelo para previsão e otimização de usinagem, torneamento rígido, utilizando o método de superfície de resposta e análise de gráficos de variância ANOVA. Este método requer o uso de pastilhas que oferecem alta resistência ao desgaste e um produto químico em alta temperatura [15].

A previsão de rugosidade da superfície e forças de corte está se tornando importante também na área de torneamento pesado, como mostrado por meio deste trabalho.

Além disso, é possível observar a utilização de diversos métodos com o intuito de otimizar o processo de análise e performance dos métodos computacionais. No artigo de Kumar e Chauhan (2015) isso é percebido. Esse artigo tem como objetivo principal, a investigação do efeito dos parâmetros de corte, taxa de avanço, velocidade e ângulo para a rugosidade superficial nos compósitos de cerâmica dura Al 7075 (10% em peso de SiC) e Al composto híbrido 7075 (7% em peso de SiC e 3% em peso de grafite) [12].

Para isso, os modelos RNA e o RSM foram utilizados para analisar os efeitos dos parâmetros de processo selecionados.

O modelo encontrado contou com um grau de correlação alto, conseguindo encontrar os parâmetros com maior efeito no resultado.

Como é possível observar, há uma grande aplicação na utilização do método RSM como modelo de otimização dos processos de usinagem. Outro exemplo dessa diversidade é apresentada no artigo de Masmiati et al (2016). Nesse artigo, analisa-se o Efeito do lubrificante e do modo de moagem durante a fresagem final do aço carbono médio S50C, a partir do método RSM [26].

Foi adotado neste trabalho, um modo de lubrificação mais ecológico, MQL, lubrificação quase seca. Pesquisas sobre este modo mostram bons desempenhos de lubrificação com melhorias na qualidade da superfície, assim como na vida útil da ferramenta.

Para o experimento foram adotados parâmetros numéricos, velocidade do fuso, velocidade de avanço e profundidade de corte e dois fatores categóricos, modo de fresagem e modo de lubrificação, otimizado usando a metodologia da superfície de resposta (RSM), técnica para obter tensão residual mínima, força de corte e rugosidade da superfície.

O método RSM foi utilizado para determinar os efeitos dos parâmetros acima na fresagem final, analisando os resultados a um polinômio de segunda ordem com margem de erro inferior a 5%.

De acordo com o autor, a comparação mostrou uma boa concordância entre os valores previstos e experimentais para tensão residual, força de corte e rugosidade da superfície, utilizando-se este método.

### 2.1.6 Utilização de lógica fuzzy no Processo de Usinagem

Para embasar esse modelo no presente trabalho, foi analisado o artigo de Barzani et al (2015) que trata da implementação do método de lógica fuzzy para prever o desempenho de usinagem da liga Al-Si-Cu-Fe tratado com diferentes aditivos, incluindo estrôncio, bismuto e antimônio para melhorar a rugosidade superficial [13].

Comparado a outros métodos de IA, estes métodos são mais fáceis e não requerem um grande investimento em recursos de software e hardware. Para o processo de tornea-

mento, resultados podem ser obtidos através da realização de apenas alguns experimentos.

Foi utilizado a implementação de lógica fuzzy, que é um tipo de inteligência artificial para prever como se dará o comportamento da liga Al-Si-Cu-Fe na presença de diferentes aditivos.

Em aplicações de engenharia, a lógica difusa utiliza essa transição contínua de associação de subconjunto para alterar problemas numéricos em territórios linguísticos difusos.

### 2.1.6.1 Lógica Fuzzy

A lógica difusa é uma conversão contínua de condições verdadeiras para falsas, em oposição à transição verdadeira-falsa separada visto na lógica binária. As possibilidades apresentadas na lógica difusa fornecem uma medida da capacidade potencial de um subconjunto de pertencem a outro subconjunto.

A base continha um grupo de declarações IF-THEN para trinta e seis regras com três entradas, taxa de avanço (A), velocidade de corte (B) e peça (C) com uma saída (rugosidade da superfície (D)).

Neste estudo, foram utilizadas funções de associação gaussiana e triangular para os parâmetros de entrada (taxa de avanço, velocidade de corte e diferentes peças) e o parâmetro de saída de (rugosidade da superfície de usinagem, respectivamente). A função de associação difusa gaussiana geralmente caracteriza termos linguísticos vagos, como ilustrado por:

$$\lambda A^n(X) = \exp\left(-\frac{(C_n - x)^2}{2\sigma_n^2}\right)$$

A função de associação triangular para saída foi definida usando três parâmetros:

$$f(x; a, b, c) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq a. \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x. \end{array} \right\}$$

Para investigar a precisão do modelo, foram feitos 12 testes experimentais para que os resultados de rugosidade fossem comparados. Os erros foram calculados medindo a diferença entre o principal valor medido e o valor previsto.

A porcentagem de erros individuais foi obtida dividindo-se o valor absoluto diferença do previsto pelo valor da medida.



$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{|H_m - H_p|}{H_m}\right) \times 100\%$$

### 2.1.7 Métodos de Usinagem inovadores

Além dos métodos citados anteriormente, diversos métodos e inovações tem sido criados quando se fala de Usinagem e Indústria 4.0. É importante entender que a usinagem é uma área extremamente ampla e que, dependendo da produção da empresa, os métodos já existentes não se encaixam em uma situação específica.

O estudo desse tópico visa trazer alguns métodos criados para tal fim. O primeiro, trazido no artigo De Oliveira e Álvares (2018), trabalha um projeto que tem como requisito funcional fundamental (FR0) a proposta de uma ferramenta para monitoramento e operação remota de máquinas-ferramenta CNC, com elementos técnicos e conceituais aderentes à Indústria 4.0 [22].

#### 2.1.7.1 Método de utilização da modelagem IDEF0

Esses autores trazem uma abordagem da implementação dos conceitos da Indústria 4.0 nos processos de fabricação, como o monitoramento e controle no chão-de-fábrica através da internet [22].

Percebe-se um enfoque na nova revolução industrial, a internet das coisas, visto que os maquinários das fábricas terão sistemas que permitirão que o responsável acompanhe todas as atividades e processos da produção mesmo não estando no ambiente da fábrica.

A proposta do trabalho trata de um sistema cliente-servidor que envolve diferentes módulos conectáveis através da internet, sendo classificado como um sistema complexo. Utilizou-se a modelagem Integration Definition language for function modeling (IDEF0) que fornece uma visão geral dos múltiplos níveis de detalhamento das atividades que compõem o framework, enfatizando as principais entradas, saídas, os recursos utilizados (mecanismos) e regras (controles) do framework.

O IDEF0 dá um aspecto mais genérico, sendo referência geral para novos projetos, tendo como uma de suas funções posicionar o projeto no contexto dos sistemas para a Indústria 4.0, através da inclusão de recursos como: internet, computação na nuvem, bancos de dados (na nuvem), imagens de vídeo do chão-de-fábrica em tempo real.

A Figura 12 a seguir mostra a estrutura e as comunicações dos servidores do framework. Na arquitetura proposta, o monitoramento é realizado pelo serviço designado como Monitoramento/Supervisão (A21), que tem como insumos principais dados e comandos que formam basicamente requisições web. As saídas dessa atividade envolvem dados de supervisão e informações relacionadas ao status da máquina e do processo. A

atividade A22, servidor WebCam, que provê serviços streaming de vídeo e áudio, é parte dos recursos de tele operação.

Por sua vez, o servidor WebCNC (A23) está diretamente vinculado ao CNC da máquina-ferramenta. Este serviço concentra os algoritmos que fornecem os comandos associados a funções de DNC que são executadas no controlador da máquina.

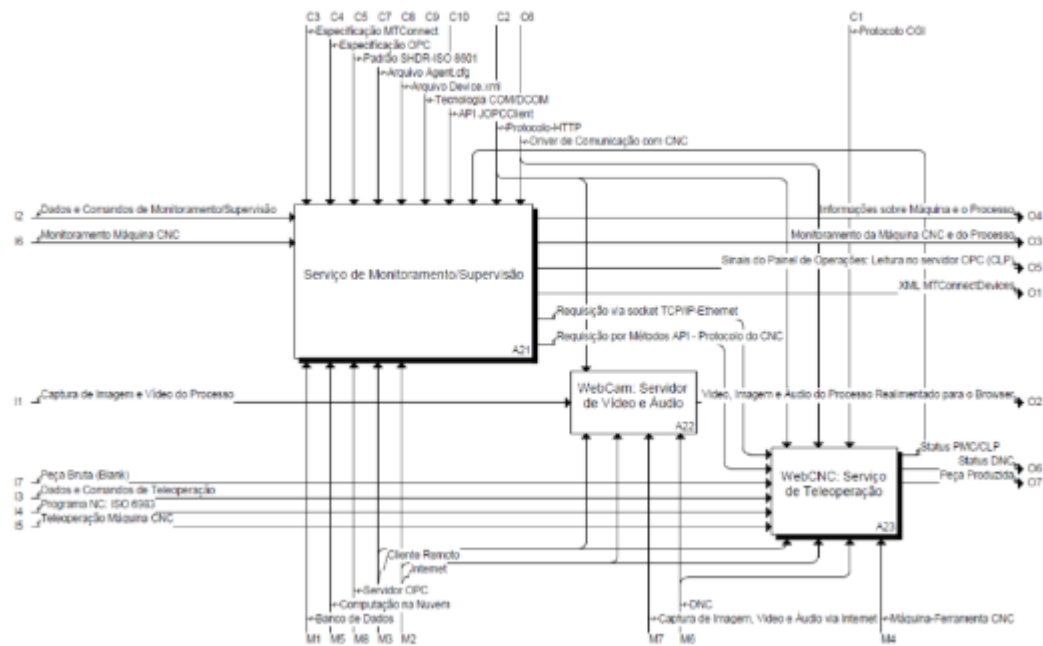


Figura 12 – Atividades A21,A22: Servidores da arquitetura.

Fonte: De Oliveira e Álvares (2018, p. 11)

A definição do modelo funcional permitiu identificar os fluxos de informações entre as funções e atividades do framework, pela identificação dos parâmetros de entrada, saídas, dos mecanismos (recursos) e dos controles (regras) (Quadro 1).

Quadro 1: Mapeamento do primeiro nível, FRs em DPx

**Quadro 1: Mapeamento de primeiro nível, FRx em DPx**

x	FRx	DPx
1	Monitorar o processo de fabricação remotamente	Funções para monitorar o processo através da Web
2	Interatividade com o controlador da máquina	Funções para configuração e comando da máquina via Internet
3	Interface intuitiva com o operador remoto	Interface gráfica estruturada
4	Manter dados sobre o processo de fabricação em banco de dados	Módulo de software vinculado a BD para armazenar dados do processo

Identificando os serviços que compõe a arquitetura do sistema gerado:

- Módulo do servidor de streaming de vídeo (WebCam - Graco/UnB), que não foi programado no âmbito desse trabalho, mas foi selecionado para implementação.

- Parte do Servidor de Monitoramento, que emprega o padrão MTConnect. Na matriz é representado pelo grupo de módulos (M1.7 - M1.25) que formam a principal classe do software Adaptador (FocasGateway), que tem a função de fazer a comunicação do adaptador com o CNC da máquina através da API desenvolvida pelo fabricante CNC.

- Compõe servidor de OPCWeb e é constituído por módulos de leitura (C1) e escrita (C2) em parâmetros de CLP da máquina-ferramenta. - Parte do serviço de comando remoto que utiliza protocolo DNC do controlador da máquina para o envio de comandos remotamente ao CNC.

- Módulos que caracterizam o Cliente Web para monitoramento e tele operação.

- Classe com função de middleware para a persistência em banco de dados de informações capturadas durante o monitoramento/supervisão do processo.

- Funções para vincular o servidor de streaming de vídeo à interface Web cliente.

- Módulos para a comunicação entre Adaptador do CNC e o Cliente MTConnect (função do Agente MTConnect). - Módulos que vinculam os serviços de streaming de dados MTConnect aos métodos para salvar dados de parâmetros de status da máquina em banco de dados.

- Módulos que fazem parte do servidor OPCWeb com função de middleware para associar funções de leitura no servidor (CLP da máquina) ao cliente Web.

- Módulos que vinculam os serviços de supervisão OPC aos métodos para salvar o status de parâmetros de CLP da máquina em banco de dados.

- Módulos que fazem parte do servidor OPCWeb com função de middleware para associar funções de escrita no servidor (CLP da máquina) ao cliente Web.

- Módulos representando os programas para o envio de comandos DNC para o controlador da máquina através de mecanismos de acesso da Internet (CGI).

Assim é possível definir a sequência de execução do projeto (Figura 13).

As funções disponibilizadas com a arquitetura de implementação representam o mapeamento virtual de recursos importantes da máquina-ferramenta. A máquina-ferramenta CNC pode ser monitorada e sofrer atuação via internet. Apenas uma infraestrutura de internet robusta com uma largura de banda que garanta elevadas taxas de transmissão e recepção de dados permitirá a realização do potencial da aplicação em operar em tempo real (Figura 14).

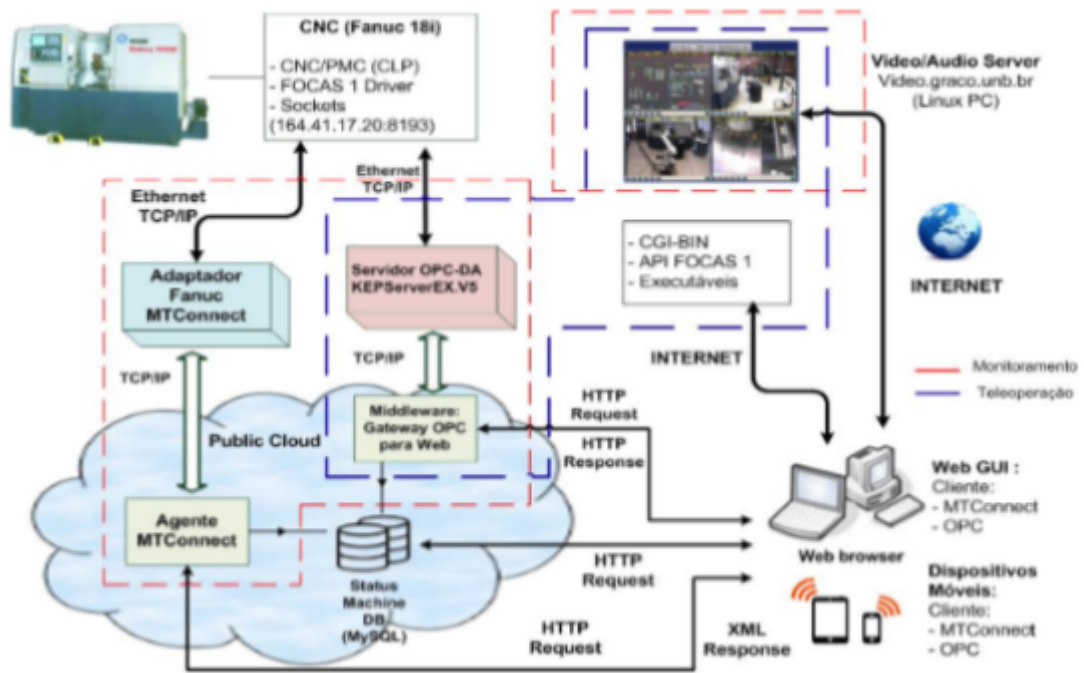


Figura 13 – Arquitetura proposta para o sistema

[22]

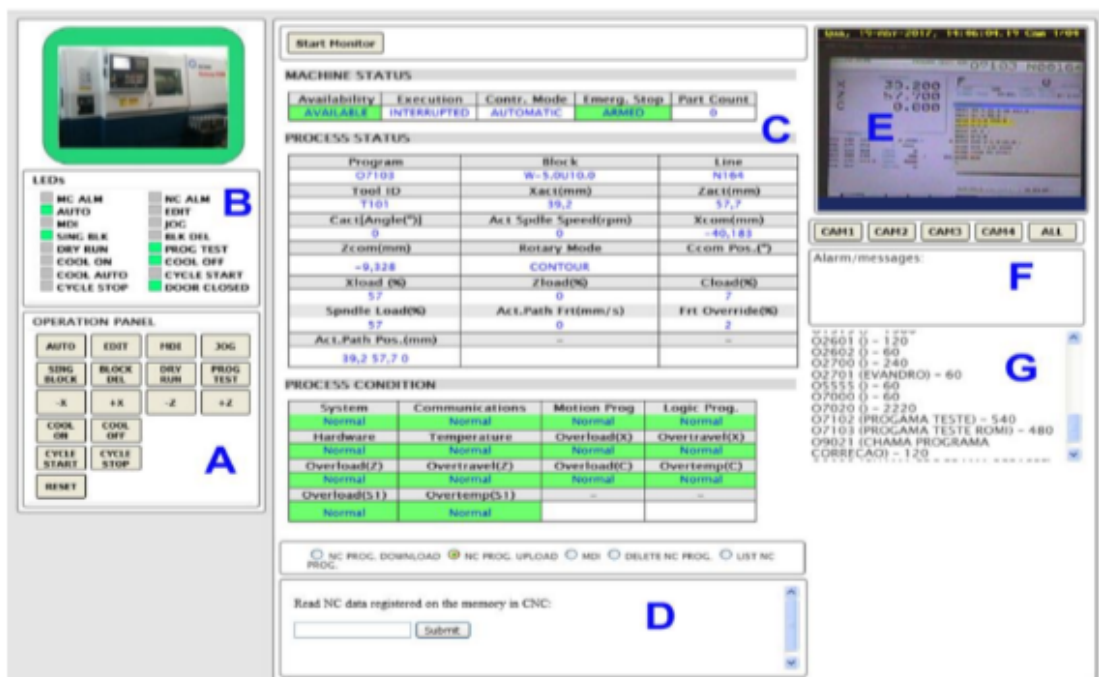


Figura 14 – Cliente Web - Interface gráfica de monitoramento e teleoperação

[22]

### 2.1.7.2 Método utilizando a técnica de Redes de Petri

Como já falado, a quarta revolução industrial, é chamada de indústria 4.0, em que novas tecnologias devem ser empregadas para integrar máquinas e humanos em cadeias de valor, compondo uma rede de entidades (plantas industriais) localizadas em posições geograficamente distribuídas (dispersas), e que devem fornecer serviços e produtos de forma autônoma.

Assim, os novos sistemas de controle devem permitir esta flexibilidade de reconfiguração (da Silva et al., 2014). O método para a concepção e análise dos sistemas de controle deve explorar as relações de colaboração entre as partes envolvidas através de mecanismos que permitam tanto atender novas demandas de produtos como resolver situações de ocorrência de falha.

No artigo de Silva et al (2015) é trazido um sistema de controle que pode ser abordado a partir de sistema de eventos discretos usando a técnica de Redes de Petri (RdP) de David na Alla, (2010), permitindo a modelagem de mecanismos de tratamento de falhas, sistemas colaborativos e modulares [23].

A arquitetura do sistema proposto pode ser vista na figura abaixo, assim como os níveis de controle (Figura 15).



Figura 15 – Arquitetura, métodos de projeto e holarquias representando os níveis de controle [23]

O método proposto está representado na Figura 16 a seguir, sendo dividido em cinco fases para tratar a complexidade do sistema de controle.

No esquema apresentado, elementos da UML, PFS, HMAS e SOA são relacionados. Por exemplo:

(i) cada uma das fases é representada por um elemento do tipo “pacote” da UML e suas subfases são representadas por um elemento “atividade” do PFS;

(ii) na fase modelagem conceitual tem-se que a execução é feita pelo fator (elemento de projeto de SOA) analista de requisitos, o artefato (SOA) usado é a lista de requerimentos e os artefatos gerados são diagramas de uso de caso UML;

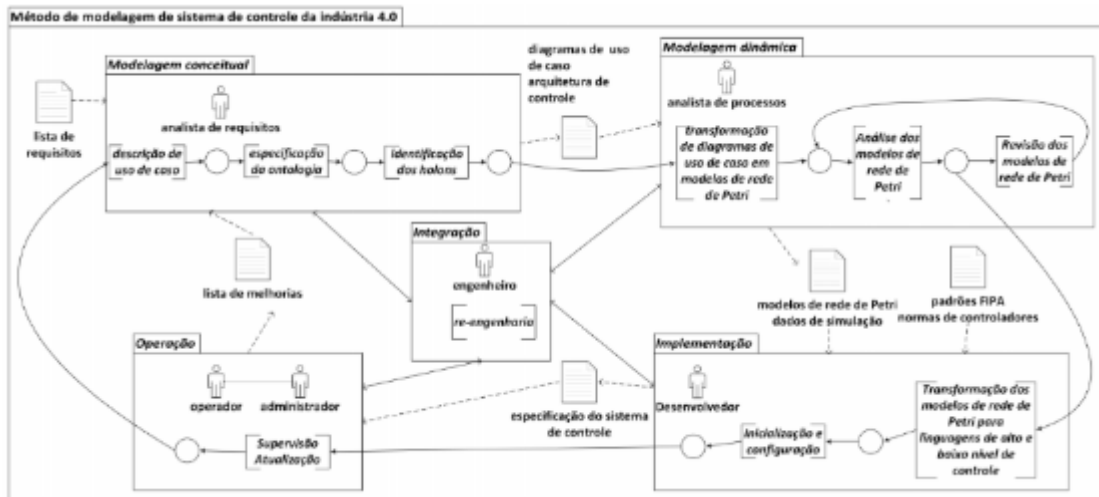


Figura 16 – Método de modelagem de sistema de controle reconfigurável usando rede de Petri e UML

[23]

(iii) o conceito de HMAS está encapsulado no detalhamento das fases. A fase de integração do método proposto é para gerenciamento e retroalimentação de melhorias nas outras fases.

O método considera outros mecanismos para a decisão e tratamento de falha, mecanismos que detectam e tomam decisões, que não são apresentados neste trabalho, eles permitem a parada e inicialização dos holons, de acordo com a necessidade.

A validação do desempenho geral do sistema é feita usando Netlogo, utilizado para desenvolvimento e implementação de sistema baseado em agentes (Figura 17).

### 2.1.7.3 Método de Previsão da Rugosidade Superficial em Peças Usinadas

O artigo de Felhő et al (2015) tem como objetivo determinar um método e um procedimento de modelagem para que seja possível a realização da previsão da rugosidade superficial em peças usinadas [4].

Visando a determinação preditiva da rugosidade superficial, característica essa de extrema importância para peças usinadas, foram descritas uma visão geral das técnicas de modelagem aplicada e fornecida por Bernardos e Vosniakos onde quatro grupos são distinguidos.

- 1) Modelo analítico
- 2) Métodos experimentais
- 3) Modelos utilizando métodos de projeto de experimentos (DOE)
- 4) Procedimentos baseados em inteligência artificial.

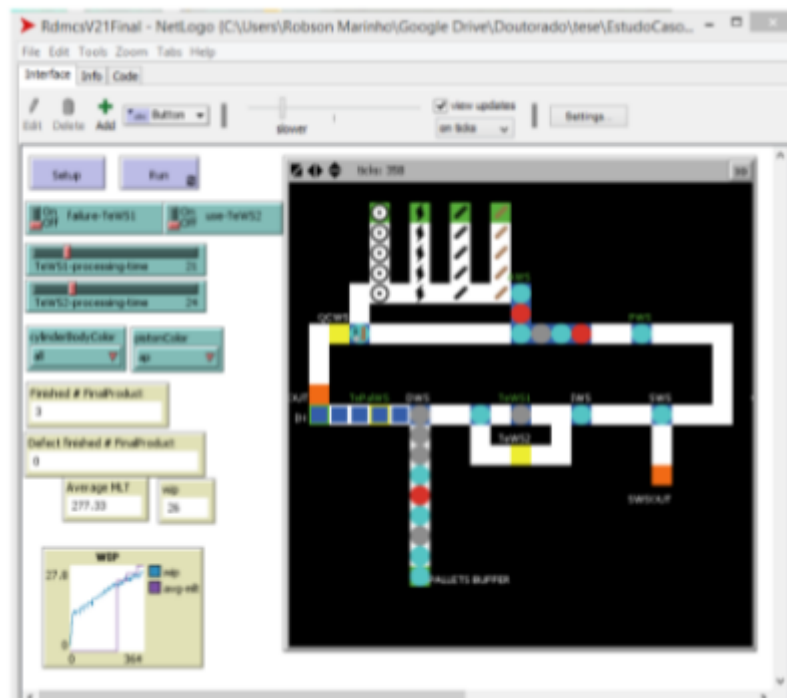


Figura 17 – Sistema de manufatura em Netlogo

[23]

Os métodos são arranjados em três grupos

- 1) Modelagem pura
- 2) Abordagens baseadas em sinais
- 3) Abordagens baseadas em inteligência artificial

O modo de usinagem utilizado para investigação no trabalho foi a fresagem de face, modelado como a Figura 18:

#### 2.1.7.4 Modelo para o valor teórico da superfície

A figura 19 mostra a representação do modelo matemático definido em coordenadas x-y.

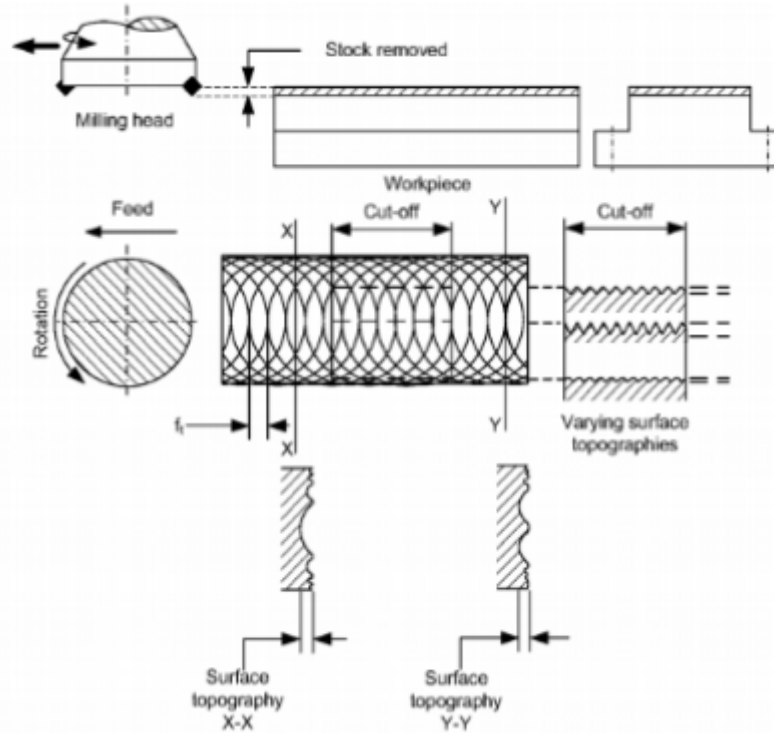


Figura 18 – Change in surface roughness with the inspection direction in face milling

[4]

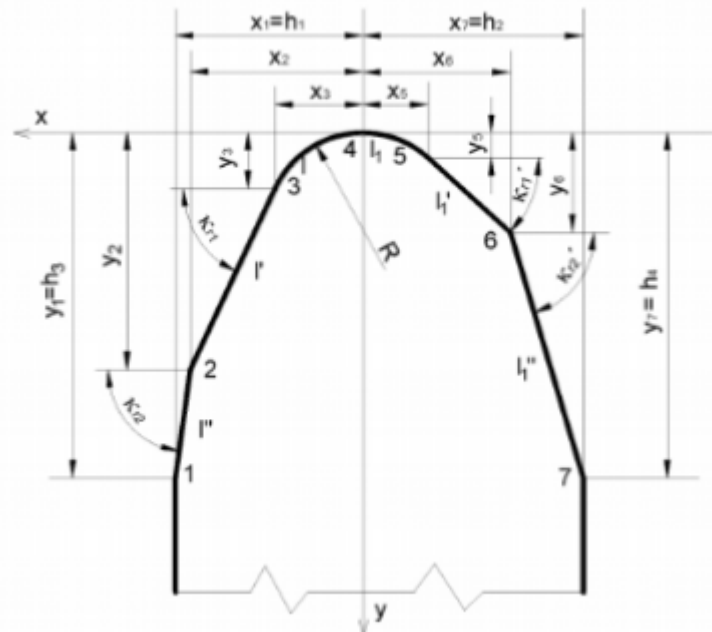


Figura 19 – The applied general theoretical cutting tool model

[4]

A fim de se criar uma superfície que se aproxime da superfície criada na peça no modelo real, foi modelada a superfície com três inserções diferentes (Figura 20):



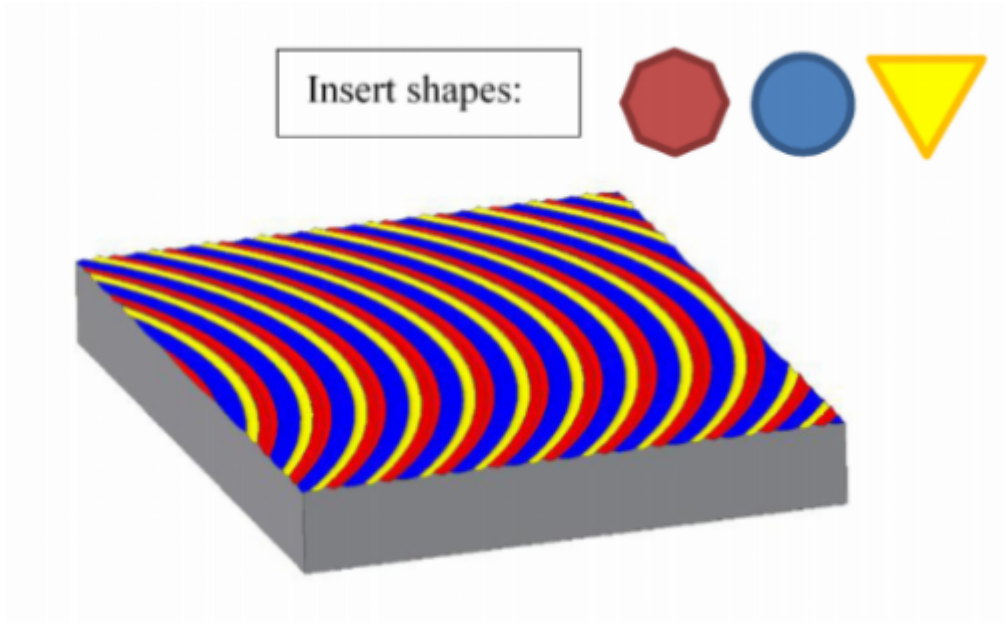
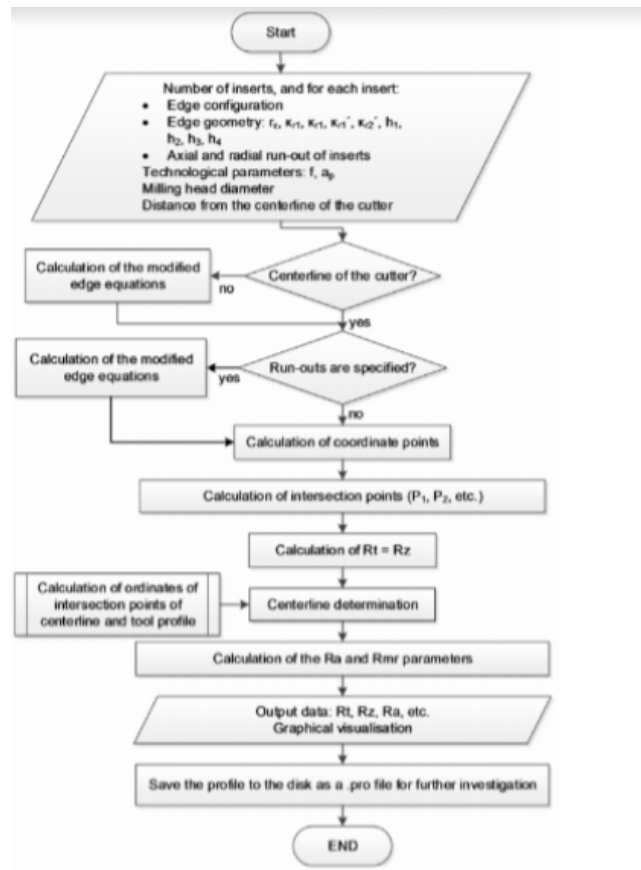


Figura 20 – Theoretical surface with three different inserts

[4]

Com os modelos de ferramenta e superfície, foi criado um software para calcular a rugosidade teórica na fresagem de faces em direções arbitrárias seguindo fluxograma mostrado no diagrama a seguir.



### 2.1.7.5 Experiência de corte

Para que os modelos teóricos tenham validade, é preciso testar os resultados comparando com os obtidos de forma prática.

O material utilizado nos experimentos foi a liga 42CrMo4 na condição temperada com dureza de 320 HB. As dimensões foram de 50x50x100 mm e 50x100 mm de área usinada.

As ações desenvolvidas para se obter os modelos e realização dos experimentos, seguiu o fluxograma para coordenar os procedimentos de desenvolvimento do software.

A ferramenta de corte utilizada tem suas características principais mostradas na Figura 21:

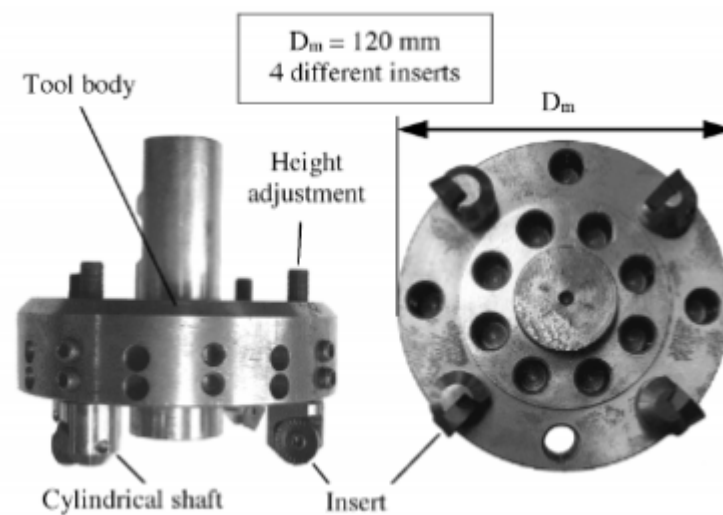


Figura 21 – The applied milling tool

[4]

As figuras 22-23 mostram os resultados obtidos no método teórico de acordo com o software desenvolvido e os dados experimentais.

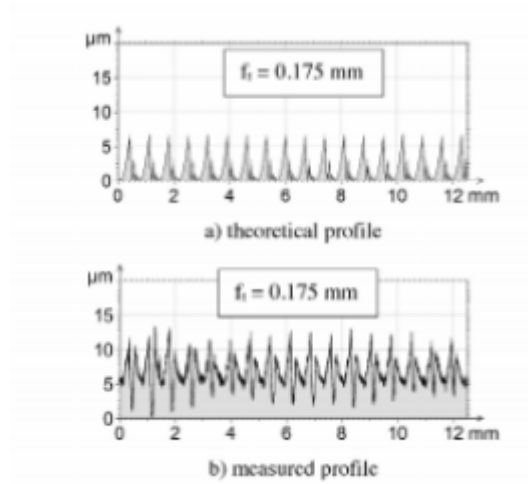


Figura 22 – Theoretical and measured profiles for  $f_1 = 0,175 \text{ mm}$

[4]

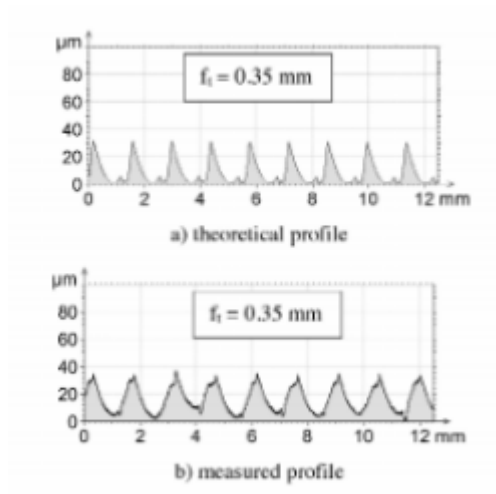


Figura 23 – Theoretical and measured profiles for  $f_1 = 0,35 \text{ mm}$

[4]

Os valores podem ser comparados nas Figuras 24-25 com a superposição dos gráficos:

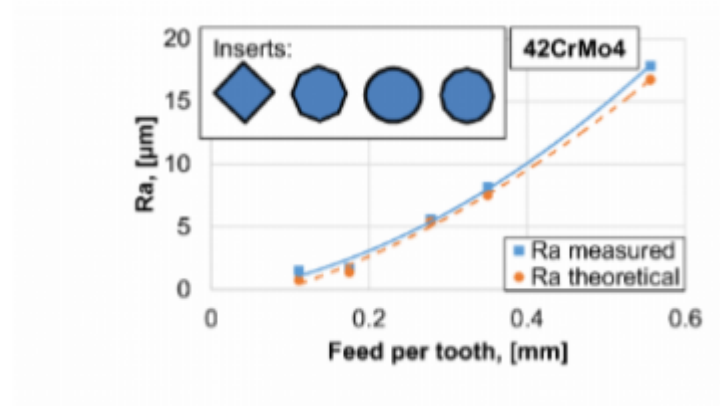


Figura 24 – Theoretical and measured profiles for Ra parameter

[4]

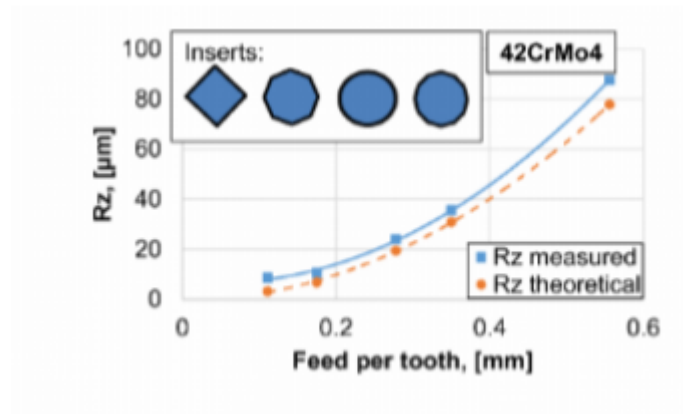


Figura 25 – Theoretical and measured profiles for Rz parameter

[4]

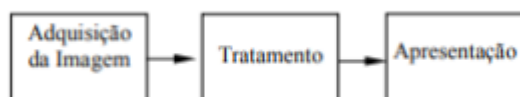
Pode-se ver pela comparação dos gráficos acima que há alto grau de similaridade, mas pode comprovado pelo método de regressão no cálculo do Método de Análise Digital de dano na furação de materiais compósitos laminados.

O artigo De Carvalho e Corrêa (2018) aborda um outro método criado para o caso específico, que mostra, em comparação aos anteriores, um grande evolução nos últimos dez anos, quando se fala do tema deste trabalho [30].

Este tem como objetivo a apresentação de uma metodologia de análise de imagens digitais para a determinação do fator de delaminação e propõe um novo parâmetro que permita uma melhor caracterização do dano ocorrido em furações de compósitos reforçados com fibras.

Na indústria aeronáutica, a delaminação durante a furação é responsável por 60% de rejeição de peças, de acordo com os autores. O impacto econômico é significativo devido ao custo de processos anteriores. A delaminação prejudica a vida útil do material, suas propriedades mecânicas, ou seja, é considerado o defeito mais significativo.

Atualmente, diversas áreas tem utilizado procedimentos de reconhecimento de padrões e análise de imagens. Todo sistema de processamento de imagem digital pode ser representado por um diagrama contendo os três principais blocos, como mostra no diagrama abaixo.



No presente trabalho, a análise digital de imagens é usada com o intuito de caracterizar a extensão da área delaminada na furação de materiais compósitos laminados, tanto na entrada como na saída da broca. Posteriormente, essas imagens serão tratadas de forma a permitir caracterizar o nível de dano (Delaminação) com auxílio de programas computacionais. A Figura 26 apresenta a arquitetura básica inicial para a montagem experimental realizada.



Figura 26 – Sistema proposto para análise digital da delaminação em materiais compósitos laminados.

[28]

#### 2.1.7.6 Sistema de Pré-Ajustagem de Ferramenta

O artigo de Ozturk e Altan (2012) tem como objetivo o desenvolvimento de pré-ajustagem de um sistema para medição de ferramentas utilizadas em um centro de usinagem CNC, utilizando técnicas de processamento de imagens [32].

O setup é a atividade de preparação da estação de trabalho para a execução de um determinado lote de peças, porém existem vários aspectos relacionados a esta atividade no processo de usinagem, como o ajuste de ferramentas, o qual também é composto por diversos fatores.

Uma das técnicas que pode ser utilizada para a redução do tempo de setup em máquinas é o uso de presetters para otimizar a operação de pré-ajustagem de ferramentas.

Nos sistemas de preset, além do aumento da produtividade, ocorre uma melhoria na qualidade dimensional das peças usinadas. A exatidão das máquinas CNC será menos influenciada quando utilizamos sistemas para auxiliar o preset das ferramentas, contribuindo, assim, para uma melhora quantitativa e qualitativa do processo de usinagem.

O sistema proposto consiste em quatro elementos: um sistema de aquisição de imagens, um código desenvolvido no software MatLab para o processamento das imagens, uma peça de referência e um computador.

O sistema de aquisição de imagens é composto por uma câmera fotográfica e um smartphone. A câmera utilizada é o modelo NX3000 da Samsung. Embora seja de uso amador, algumas características da câmera utilizada favoreceram o desenvolvimento do sistema proposto, como: acionamento remoto, display articulado, profundidade de campo e distância focal compatíveis com a aplicação. Como ilustrado na Figura 27, a câmera é acoplada no eixo da máquina, de forma semelhante a uma ferramenta.



Figura 27 – Sistema de aquisição de imagens

[32]

#### 2.1.7.7 Modelo de Misturas de Gaussianas

O artigo de Dib e Jasinevicius (2011) aborda um novo modelo para otimização e monitoramento da rugosidade. O trabalho visa avaliar a emissão de sinais acústicos durante o processo de torneamento do aço 52100 endurecido e identificar os parâmetros do sinal capazes de representar a rugosidade da peça, através de um novo método de monitoramento Modelos de Misturas de Gaussianas (GMM). Para correlacionar a rugosidade com o som, técnicas de processamento de sinais digitais foram utilizadas para a extração dos parâmetros como perfil de energia e coeficientes mel-cepstrais (MFCC) [34].

O modelo mostra que cada cluster formado pelas características do sinal é identificado e modelado por uma função densidade de probabilidade.

$$p(\vec{x} | \lambda) = \sum_{i=1}^M \omega_i p_i(\vec{x})$$

O objetivo da estimação dos parâmetros de máxima verossimilhança é encontrar o modelo de parâmetros que maximiza a verossimilhança do GMM.

$$p(X | \lambda) = \prod_{t=1}^T p(\vec{x}_t | \lambda)$$

Pelo fato desta expressão ser uma função não linear do parâmetro lambda, a maximização direta não pode ser aplicada. É necessário utilizar um algoritmo de iteração Expectatio- Maximization (EM) o qual ajusta os parâmetros do GMM a cada iteração, aumentando a verossimilhança do modelo.

Logo, a probabilidade após a atualização dos parâmetros fica:

$$p(i | \vec{x}_t, \lambda) = \frac{w_i p_i(\vec{x}_t)}{\sum_{k=1}^M w_k p_k(\vec{x}_t)}$$

#### 2.1.7.8 Modelo de Otimização no processo de corte unidimensional de barras de aço

O artigo de Frigiére (2013) aborda sobre um modelo de otimização do processo de corte de barras de aço. Este trabalho foi feito em uma empresa (AçoX) que vende barras de aço de acordo com as necessidades do cliente [36].

Dependendo da maneira de como é feito o corte das barras, o tamanho que sobra poderá, ou não, ser usada no futuro. Caso não possa ser usada, essa sobra é dada como perda de material. O volume dessas perdas é gigantesco e representa um alto custo para a empresa em questão. Tentando minimizar o desperdício de material resultante da falta de planejamento do processo de corte, serão analisados modelos de otimização que vão ao encontro da realidade da empresa, podendo ser aplicados em outros setores com problemas semelhantes.

Um processo comum na indústria de tecidos, madeira, aço e vidro, é o processo de corte. Geralmente esse processo gera sobras de tamanhos que não são suficientes para atender a dimensão de nenhum item demandado. Esse problema se intensifica quando o volume dessas perdas é grande e, apesar de já ser um problema conhecido, nem sempre a implementação de soluções sofisticadas são adotadas nas empresas. O estudo é feito na empresa AçoX.

A presente empresa não possui um método objetivo para fazer a escolha do item de estoque a ser utilizado para o corte. Tal escolha é feita por responsáveis do setor e têm como base a sua experiência para justificar a escolha. Este trabalho visa aplicar

um método de programação e otimização para o corte dessas barras de acordo com as especificações dos clientes, minimizando as perdas resultantes do processo (Figuras 28, 29 e 30).

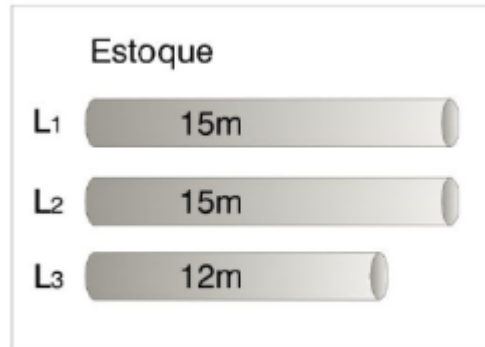


Figura 28 – Objeto de estoque de um exemplo de aplicação

[36]

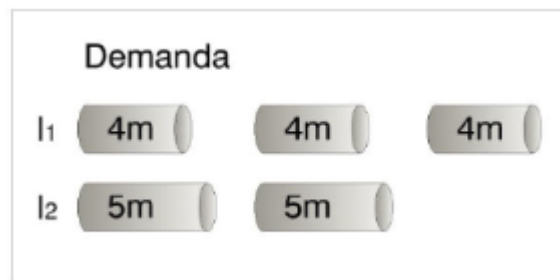


Figura 29 – Itens demandados de um exemplo de aplicação

[36]

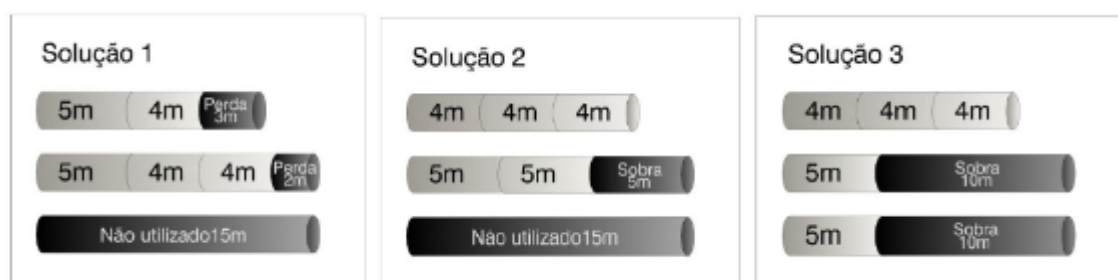


Figura 30 – Soluções de exemplo de aplicação

[36]

O modelo foi aplicado seguindo os seguintes quesitos:

- Toda demanda deve ser atendida
- Os objetos do estoque devem possuir medidas inteiras, em milímetros



- Qualquer item demandado deve ter o comprimento menor ou igual a pelo menos um objeto do estoque
- A diferença entre o estoque inicial e o final deve ser igual à soma das demandas com as perdas.
- Se a demanda for maior que o estoque, solução infactível.

#### 2.1.7.9 Análise da Zona de Metal Morto por métodos computacionais

O artigo de Ramezani e Afsari (2015) aborda sobre a formação da zona de metal morto, que desempenha um papel importante na usinagem. Nas ferramentas de corte é possível observar uma região de metal morto na face angulada da ferramenta. Em usinagens de ultraprecisão ou micro- usinagem, onde as profundidades de corte são inferiores ao raio da aresta da ferramenta, todas essas aplicações mostram a importância de entendermos como funciona o mecanismo de corte de ferramentas de aresta radial [37].

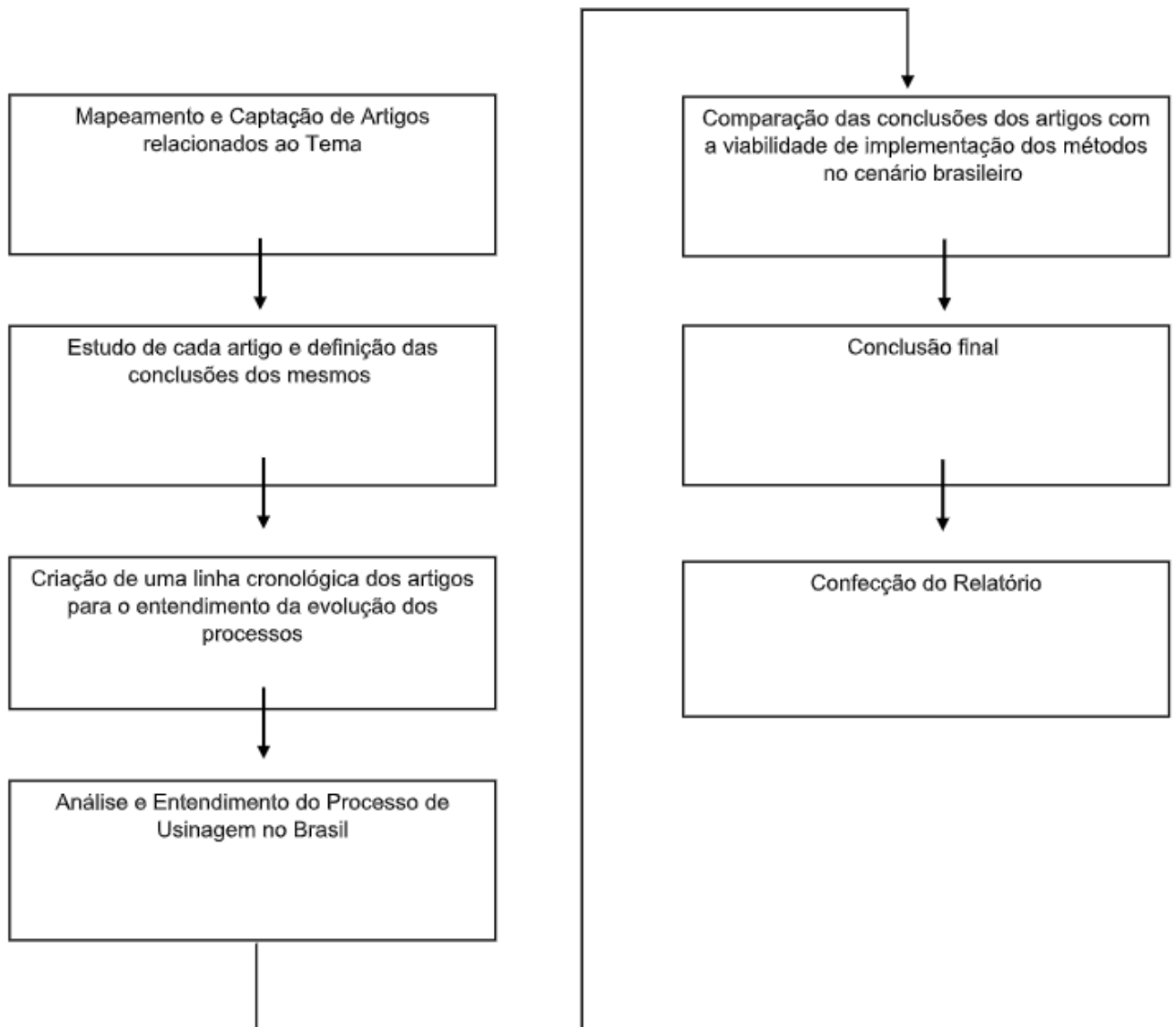
Para estudar essa zona de metal morto, é fundamental um dispositivo que recolha imediatamente a ferramenta de corte. Tal dispositivo é chamado de quick stop device (QSD).

Outro instrumento importante é o Computer Aided Quick-Stop Device (CAQSD): É um instrumento de pesquisa desenvolvido para coletar amostras de cavaco na usinagem. É necessário congelar a ação de corte para preservar o estado do cavaco. Ao compararmos o CAQSD com um QSD convencional, nos mostrou que o CAQSD possui maior durabilidade, segurança e um tempo de resposta inferior ao QSD.

Foi observado experimentalmente que a espessura da raiz do cavaco não cortado e o raio da aresta de corte possuem um efeito significativo na força de corte. No início do processo de corte, a zona de estagnação começou a se formar e o seu tamanho se estabilizou na medida que o corte começou a ficar estável. Uma pequena região de metal morto foi vista na frente da face angulada da ferramenta.

### 3 METODOLOGIA

Para construir esse trabalho, foi preciso uma análise profunda sobre os temas e artigos. Dessa forma, uma metodologia foi utilizada para que a assertividade na dissertação fosse possível. Essa metodologia é descrita a seguir:



## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 Método FEM

Os modelos obtidos por Elementos Finitos trazem o benefício de economizar tempo e recursos de materiais quando comparado à experimentos reais, se sobressaindo neste quesito em relação a outros métodos usados para se criar previsões em projetos de engenharia como criar equações de regressão onde se utilizam métodos fatoriais para realizar experimentações.

Mesmo tendo uma diferença razoável entre os valores de forças de corte dos resultados ensaiados e os de simulação pelo trabalho de Hui (2007) [11], espera-se que utilizando três dimensões no modelo de formação de cavaco possa ter melhor precisão com relação a força de corte.

No artigo de Masmiasi et al (2016), as temperaturas de corte para todos os sete modelos de atrito considerados são inferiores às experimentais. Uma explicação plausível poderia ser a dificuldade de atribuir o efeito da dureza nos modelos de tensão de fluxo que incluem adequadamente o efeito do tratamento térmico sobre o material de trabalho na simulação. Isso requer a incorporação do tipo certo de material modelos e seus valores constantes de material correspondentes [26]. Devido a incapacidade de incluir todas as características da peça real no modelo a ser simulado, diferenças significativas foram observadas nos valores de forças de corte e geometria de cavacos. O desvio no valor da força de corte foi considerado alto, na ordem de 68%. A geometria do chip e a frequência de segmentação diferiram em 63% e 50%, respectivamente.

Tal resultado indica que a seleção adequada das constantes do material incorpora o efeito da dureza do material da peça de trabalho sobre o comportamento da tensão de fluxo do material de trabalho.

O efeito da modelagem de materiais e modelagem de fricção individualmente na simulação do processo de formação de cavacos, deve ser dada ênfase à combinação dos modelos de atrito com material adequado, modelos, valores constantes do material, dependendo da dureza do material de trabalho, em vez de considerar apenas os modelos de atrito ou modelos de materiais para superar as inadequações.

### 4.2 Método de Redes neurais

Em relação ao trabalho de Pontes et al (2010) [24], o uso da metodologia DOE provou ser uma ferramenta eficiente para o projeto de redes neurais da arquitetura RBF para superfície previsão de rugosidade no torneamento do aço temperado AISI 52100.

A metodologia tornou possível identificar redes que apresentam alto grau de precisão

e redução na variabilidade da tarefa proposta. Os resultados obtidos mostram que a RBF RNAs treinadas com apenas 36 exemplos podem apresentar média absoluta com erros iguais a 0,388%. Esse fato sugere que as redes RBF projetadas com o uso da metodologia DOE pode ser uma ferramenta eficaz, alternativa eficiente e acessível para previsão de rugosidade da superfície em rotação.

Efeitos de interação entre níveis de fatores envolvidos foram apontados como significativos para o desempenho de redes RBF. Em cada um dos experimentos pelo menos um efeito de interação foi apontado como significativo.

Em alguns casos, os efeitos de interação foram mais significativos para o desempenho da rede do que os efeitos individuais dos fatores. Isso significa que não apenas os parâmetros simples de configuração devem ser considerados ao projetar redes para prever a rugosidade da superfície, mas também a quantidade e a natureza da interação entre eles.

Analisando-se o artigo de Sick (2001), observa-se que modelo de processo físico evita o problema aberto de encontrar uma relação analítica precisa entre as condições de corte e os parâmetros do processo. Ele pode ser usado para normalizar os sinais de força medidos, eliminando a influência da alteração das condições de corte [25].

O modelo neural se concentra na tarefa de encontrar uma relação entre sinais de força normalizados e desgaste. Redes neurais com pequeno número de entradas e pesos podem ser usados, evitando o problema de sobreajuste, mesmo que seja considerado um grande número de condições.

#### 4.3 Método Taguchi

O método Taguchi conseguiu reduzir o número de experimentos de 27 experimentos, fatorial total, para somente 9, diminuindo assim o tempo e investimento gasto no estudo de otimização de processo, tornando viável a aplicação deste para o meio industrial, visto a baixa complexidade e menor tempo de análise, garantindo um resultado com grau de confiabilidade de 95%.

#### 4.4 Método de Regressão linear por mínimos quadrados

A análise de regressão por meio de um fatorial completo foi conduzida para relacionar a rugosidade superficial e os parâmetros presentes na fresagem.

O artigo de Abbas et al (2016) mostrou um bom resultado quanto à influência dos parâmetros de corte e um modelo de regressão para tal, mas foram necessários 64 experimentos para que fosse avaliado [5]. Observa-se que os experimentos desta natureza são custosos e demandam muito tempo para a realização. O trabalho poderia ter sido otimizado utilizando o método de Taguchi que reduz consideravelmente o número de

experimentos e conseqüentemente o tempo de realização de experimentos. Esta conclusão também se aplica ao artigo de Horváth e Drégelyi-Kiss (2015) [3].

Portanto, o método possui resultados relevantes, mas de difícil aplicabilidade na prática por ter baixa otimização experimental.

#### 4.5 Método ANFIS

O modelo aborda dois métodos usados para previsões de usinabilidade e rugosidade superficial comumente utilizados, método de Taguchi e implementação de inteligência artificial.

O trabalho “Predicting surface roughness in machining: a review” cita em suas conclusões que não havia até o momento trabalhos em que combinasse diferentes métodos para a predição e modelagem de trabalhos de engenharia, mas este presente artigo usou o método Taguchi para “treinar” a inteligência artificial, obtendo resultados expressivos de similaridade de resultados comparando resultados calculados e mensurados.

Observa-se, portanto, que é um método bastante efetivo quando o método Taguchi é utilizado em associação. Porém, sua utilização sem este não possibilitaria a redução de experimentos, como foi feito.

#### 4.6 Método ANOVA e RSM

A análise da ANOVA mostrou uma maior influência no resultado para a taxa de avanço e velocidade de corte, tendo a profundidade de corte a menor influência dentre os parâmetros analisados.

O modelo quadrático de RMS com coeficientes de correlação 99,9% e 96,4% para os modelos Ra e Rt respectivamente, apresentam forte correlação com a variável ditada.

O modelo obteve bom resultado quanto à previsão do resultado, mostrando ser eficaz para tal, podendo ter aplicabilidade prática para otimização no processo de torneamento.

O trabalho de Hessainia et al (2013) teve como material o torno universal, ainda presente na grande maioria de empresas brasileiras característico por ter um tempo de trabalho maior comparado com torno CNC, assim o experimento poderia ter um número menor de experimentações, utilizando de métodos que não trabalhem com fatorial completo, como Taguchi, mas que ainda sim mantenha uma boa correlação entre o valor calculado pela regressão e o valor mensurado [10].

O número de testes reais tem um gasto de material e tempo que influencia diretamente na produtividade de uma empresa, assim tendo um ponto negativo para aplicação prática deste método [10], [7], [14] e [15].

O artigo de Machado et al (2015) demonstrou que o cálculo das rugosidades, segundo um modelo estatístico, representou com fidelidade o comportamento dos experimentos (grau de correlação próximo de 1). O trabalho confirmou também (tanto estatística quanto experimentalmente) a maior influência do  $f$  (avanço) em relação a  $V_c$  (velocidade de corte) na resposta acabamento superficial [7].

Entretanto, os resultados poderiam ser extrapolados após um pequeno número de experimentos, assim como no artigo de Hessainia et al (2013). Adicionalmente, pode-se recomendar a adequação da metodologia proposta para outros testes de usinabilidade, visto que o método calcula o grau de correlação dos experimentos.

O artigo de Machado et al (2015) utilizou de dez experimentos inicialmente, obtendo alto grau de similaridade em relação aos valores calculados com os modelos e os valores medidos. Assim mostra uma aplicabilidade do método para outros materiais sem grande dificuldade de implementação para que se obtenha a melhor condição de usinabilidade.

Em relação à utilização de métodos distintos para um mesmo experimento, observa-se pelo artigo de Kumar e Chauhan (2015) [12], que o método de inteligência artificial para comparar os resultados do modelo de regressão mostrou eficácia nos resultados. Porém, criar modelos de inteligência artificial é custoso em termos de tempo, programação e custo computacional.

#### 4.7 Conclusões Lógica Fuzzy

A implementação da lógica fuzzy para prever resultados de rugosidade se mostrou um método eficaz comprovado pelas taxas de erro. Seus benefícios para problemas de engenharia incluem fácil implementação técnica e baixo investimento em software e hardware. O tempo de teste é fácil, não havendo a necessidade de longos períodos de aprendizagem como redes neurais e necessitando de poucos testes experimentais apenas para comprovação do método.

#### 4.8 Métodos Inovadores

##### 4.8.1 Modelagem IDEF0

Como visto, o projeto ainda está em fases iniciais, assim como a indústria 4.0, onde sua implementação é restrita por diversos fatores como por exemplo um sistema com altas taxas de transferência de dados e alta capacidade para processamento para que as atividades sejam realizadas em tempo real.

Porém, o projeto funcionou como o esperado com mais de um cliente tentando se conectar ao software e conseguiu como resposta o streaming com dados de fabricação proveniente do CNC Fanuc 18i-Ta, utilizado.

#### 4.8.2 Redes de Petri

A proposta desenvolvida acima, possui características importantes da implementação para um sistema de controle da indústria 4.0:

- Todos os holons são autônomos para tomarem decisões;
- A visão combinada de orientação a produtos, processos e componentes é integrada com modelos baseados na técnica de RdP;
- O desenvolvimento e a implementação são facilitados pela adoção de ferramentas de HMAS e IOPT.
- A reconfiguração é considerada tanto para situações de falhas como para novas demandas e a conexão dos modelos pode ser revista baseada na funcionalidade de cada holon.

#### 4.8.3 Modelo de Previsão da Rugosidade Superficial em Peças Usinadas

Neste artigo foi desenvolvido um novo método para prever a rugosidade superficial resultante de um procedimento de fresa. O software criado para tal fim cumpre bem o objetivo e os resultados de comparações mostram que há boa similaridade entre valores teóricos e experimentais.

Mas há uma limitação para o método, pois se baseia na criação de um software, tendo em vista o atual cenário industrial brasileiro, o método é inviável para a grande maioria que se usa métodos de usinagem.

#### 4.8.4 Método de Análise Digital de dano na furação de materiais compósitos laminados

Com o presente trabalho, podemos perceber que existe um aumento do dano na medida em que os parâmetros de corte são aumentados, sendo isso mais claro com o aumento do avanço.

Por outro lado, nota-se que em testes nos quais o fator de delaminação é similar ao de outro teste (em virtude de possuírem o mesmo comprimento máximo de dano), a imagem revela que a maior área delaminada deverá provocar uma vida útil mais curta para a união, em função da maior avaria apresentada.

Desta forma, pode-se assegurar que a utilização do fator de delaminação ou da área delaminada (quando avaliamos isoladamente) não representa de forma adequada a extensão do dano induzido no material pelo processo de usinagem.

Desta forma, torna-se mais adequado o uso de um fator de dano que leve em consideração não só o tamanho da delaminação ( $D_{max}$ ) como também a área delaminada. Este tipo de fator de delaminação híbrido irá permitir uma melhor caracterização do nível de dano na furação.

Com isso, podemos perceber que o método de aquisição, tratamento e análise de imagens também se torna de grande importância na avaliação da influência dos parâmetros de usinagem no resultado final da peça.

#### 4.8.5 Sistema de Pré-ajustagem de ferramenta

Com a utilização de métodos como o desenvolvido nesse trabalho, é possível obter um aumento do tempo em que a máquina está disponível para usinar, e além disso, o erro na operação de configuração das ferramentas também é diminuído.

Uma melhoria na repetibilidade quando em comparação com o preset manual também pode ser notada. Em relação a ergonomia, o sistema é vantajoso pois não há necessidade do operador debruçar-se no interior da máquina, o que evita o desconforto.

#### 4.8.6 Modelo de Misturas de Gaussianas

Para garantir a viabilidade do método, seria necessário obter uma comprovação estatística de que primeiramente, o sinal acústico poderia ser utilizado como fonte de informações sobre o fenômeno físico, no caso a rugosidade resultante do processo, e que o modelamento estatístico proposto fosse capaz de identificar estas informações.

A utilização do microfone como meio de captura de sinais para monitoramento mostrou-se eficiente comparando-se o custo do mesmo em relação aos sensores de emissão acústica (acelerômetros), considerando-se os resultados obtidos. Com os resultados obtidos é possível concluir que o modelo proposto consegue identificar diferentes níveis de rugosidade do processo analisando o som emitido durante a usinagem.

Portanto, o modelo pode ser utilizado como um método de monitoramento indireto. Outro resultado importante é a consolidação do MFCC como parâmetro para o monitoramento de processos de torneamento duro, a partir do sinal acústico.

#### 4.8.7 Modelo de Otimização no processo de corte unidimensional de barras de aço

Normalmente as empresas tem dificuldade em enxergar esse problema (do corte das barras) e adotam como método a experiência dos seus funcionários. A otimização do processo de corte reduz custos de matéria-prima perdida, melhora a qualidade do estoque e reduz tempo da tarefa de escolher o material.

Com a modelagem pronta, foram simulados dois cenários para verificar o comportamento dos dados frente a diferentes parâmetros para três tipos de aço. Por fim, foi escolhido um único período para a realização da expansão do modelo para as principais dimensões dos cinco principais tipos de aço vendidos pela empresa, os quais representam 75% das vendas. Esses resultados foram comparados com os dados reais da AçoX e, no total, a redução de perda foi significativa e igual a 76,1%.



#### 4.8.8 Análise da Zona de Metal Morto por métodos computacionais

O artigo descreve o desenvolvimento de um novo CAQSD para pesquisas de cortes de metal na usinagem. Os resultados mostraram que o CAQSD apresenta um desempenho superior ao QSD convencional. A operação do dispositivo é muito simples e descobriu-se que o CAQSD apresenta desempenho confiável.

A presente invenção resolve as desvantagens do QSD convencional. Foi demonstrado através de experimentos que o raio da ponta da ferramenta de corte afeta a usinagem e a zona de metal morto.

Para trazer uma visão mais próxima dos métodos mais comuns, uma tabela é construída e inserida a seguir, com o intuito de facilitar a absorção e visualização de cada método (Tabela 9).

<b>Métodos de otimização em usinagem</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Custo de implementação</b>	<b>Cenário ao qual se aplica</b>
<b>Método de Superfície de Resposta</b>	Metodologia robusta resistente aos impactos de condições não ideais.	Necessário um número grande de ensaios para a realização.	Fácil implementação.	Quando o pesquisador não conhece a relação exata entre os fatores.
<b>(DOE) Taguchi</b>	Número reduzido de amostras para teste (menor desperdício de material).	Como tem-se menor número de testes, consequentemente e tem-se menor confiabilidade dos resultados.	Fácil implementação, pois o método tem matrizes ortogonais pré-definidas e software de processamento leve.	Saber os principais influenciadores no resultado. Ter uma combinação ótima para a resposta desejada.
<b>(IA) Rede Neural</b>	Qualidade superior comparada a técnicas estatísticas; Auto-aprendizado (não necessita de especialistas para tomar decisões)	Treinamento demorado (podem durar horas ou até dias); Volume grande de dados (a rede usa dados históricos para as decisões);	O hardware high-tech: para treinamento de processamento rápido sendo necessárias placas especiais e coprocessador aritmético.	Técnica para prever resultados com alta precisão, mas exige alto custo de implementação.
<b>(IA) Fuzzy</b>	Capacidade de lidar com incertezas e com raciocínio aproximado; Procura representar conhecimento humano de forma mais realista.	Incapacidade de aprendizagem; Requer testes extensivos para a validação e verificação;	O custo e dificuldade de implementação é menor quando comparado ao método de Redes Neurais, sem necessidade de hardware com valor elevado.	Em situações onde a imprecisão dos dados e a incerteza do conhecimento são parte do problema.
<b>Elementos Finitos</b>	Não precisa de testes experimentais para a definição do método (somente para validação).	Implementação complexa. Dificuldade de implementar corretamente os dados reais como por exemplo coeficientes de atrito, resultando em erros no modelo.	Implementação complexa. Necessidade de hardware para o processamento com maior capacidade.	Quando se deseja obter o comportamento e valores esperados na resposta final sem ter que desprender custo experimental.
<b>Mínimos Quadrados</b>	Fácil implementação não necessitando de alto custo computacional.	O método pode super ajustar a curva com componentes que podem ser irrelevantes, não sendo capaz de detectar os parâmetros relevantes para um dado problema.	Fácil implementação.	Utilizado para determinar a influência dos parâmetros pré-determinados, possibilitando otimização do processo com níveis ótimos para resultados esperados.

Tabela 9 – Comparação dos Métodos Computacionais aplicados à Usinagem.

(tabela foi feita pelo próprio autor do TCC)

## 5 CONCLUSÕES

Durante esse trabalho, diversos métodos computacionais, com aplicações distintas foram trazidos e uma conclusão sobre cada método foi exposta. Através da análise desses artigos, é possível concluir que, em relação aos métodos inovadores, a viabilidade de construção desses métodos depende do resultado de melhoria gerado em cada caso e do retorno de investimento que essa aplicação trará na indústria. Observa-se que, de forma geral, os métodos inovadores necessitam de um investimento alto, tanto do recurso tempo, como do recurso financeiro.

Como já trazido anteriormente, a utilização de métodos computacionais na Usinagem é extremamente interessante e está passando por grande evolução. Entretanto, a utilização de tais métodos ainda se torna complicada, principalmente considerando o cenário brasileiro. Grande parte das indústrias brasileiras utilizam métodos que datam da 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> revolução industrial. Logo, a aplicabilidade desses métodos se torna mais útil em indústrias de grande porte, que detém alta capacidade de recursos. Como sugestão de um próximo trabalho, pode-se avaliar de forma mais profundade a utilização e aplicação desses métodos no cenário brasileiro, avaliando os custos e o retorno de aplicação de tais métodos em pequenas e médias indústrias.

## REFERÊNCIAS

- [1] ASILTÜRK, I; ÇUNKAŞ, M. Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method. *Expert systems with applications*, v. 38, n. 5, p. 5826-5832, 2011.
- [2] ASILTÜRK, I., AKKUŞ, H. Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. *Measurement*, v. 44, n. 9, p. 1697-1704, 2011.
- [3] HORVÁTH, R.; DRÉGELYI-KISS, Á. Analysis of surface roughness of aluminum alloys fine turned: United phenomenological models and multi-performance optimization. *Measurement*, v. 65, p. 181-192, 2015.
- [4] FELHŐ, C.; KARPUSCHEWSKI, B.; KUNDRÁK, J. Surface roughness modelling in face milling. *Procedia CIRP*, v. 31, p. 136-141, 2015.
- [5] ABBAS, A. T.; RAGAB, A. E.; BAHKALI, A.; ALI, E.; DANAF, E.; ADEL, E. Optimizing cutting conditions for minimum surface roughness in face milling of high strength steel using carbide inserts. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016.
- [6] PRIYADARSHINI, A.; PAL, S. K.; SAMANTARAY, A. K. Influence of the Johnson Cook material model parameters and friction models on simulation of orthogonal cutting process. *Journal of Machining and Forming Technologies*, v. 4, n. 1/2, p. 59-83, 2012.
- [7] MACHADO, Ál. R.; DE ALMEIDA, V. H. M.; GOMES, V. Usinabilidade de vários materiais com características diferentes, tendo como parâmetro a rugosidade. 2015.
- [8] BENARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G.-C. Predicting surface roughness in machining: a review. *International journal of machine tools and manufacture*, v. 43, n. 8, p. 833-844, 2003.
- [9] DAMBATTA, Y. S.; SAYUTI, M.; SARHAN, A. A.; AB SHUKOR, H. B.; DE-RAHMAN, N. A. B.; MANLADAN S. M. Prediction of specific grinding forces and surface roughness in machining of AL6061-T6 alloy using ANFIS technique. *Industrial Lubrication and Tribology*, v. 71, n. 2, p. 309-317, 2019.
- [10] HESSAINIA, Z.; BELBAH, A.; YALLESE, M. A.; MABROUKI, T.; RIGAL, J. F. On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations. *Measurement*, v. 46, n. 5, p. 1671-1681, 2013.
- [11] HUI, H. H. Simulação da formação de cavacos usando FEM (Finite Element Method)-temperatura e força. Diss. Universidade de São Paulo, 2007.
- [12] KUMAR, R.; CHAUHAN, S. Study on surface roughness measurement for turning of Al 7075/10/SiCp and Al 7075 hybrid composites by using response surface methodology (RSM) and artificial neural networking (ANN). *Measurement*, v. 65, p. 166-180, 2015.

- [13] BARZANI, M. M.; ZALNEZHAD, E.; SARHAN, A. A.; FARAHANY, S.; RAMESH, S. Fuzzy logic based model for predicting surface roughness of machined Al-Si-Cu-Fe die casting alloy using different additives-turning. *Measurement*, v. 61, p. 150-161, 2015.
- [14] MASMIATI, N.; SARHAN, A. A.; HASSAN, M. A. N.; HAMDI, M. Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface roughness in end milling of S50C medium carbon steel. *Measurement*, v. 86, p. 253-265, 2016.
- [15] MEDDOUR, I.; YALLESE, M. A.; KHATTABI, R.; ELBAH, M.; BOULANOUAR, L. Investigation and modeling of cutting forces and surface roughness when hard turning of AISI 52100 steel with mixed ceramic tool: cutting conditions optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 77, n. 5-8, p. 1387-1399, 2015.
- [16] ASSAD NETO, A.; PEREIRA, G. B.; DROZDA, F. O.; SANTOS, A. P. L. A busca de uma identidade para a indústria 4.0. *Brazilian Journal of Development*, v. 4, n. 3, p. 715-732, 2015.
- [17] SANTOS, B. P.; ALBERTO, A.; LIMA, T. D. F. M.; CHARRUA-SANTOS, F. M. B. Indústria 4.0: desafios e oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*, v. 4, n. 1, p. 111-124, 2018.
- [18] DE OLIVEIRA MORAIS, M.; DE MOURA, I.; DENANI, A. L. A integração entre conhecimento, inovação e indústria 4.0 nas organizações/Integration between knowledge, innovation and industry 4.0 in organizations. *Brazilian Journal of Development*, v. 4, n. 7, p. 3716-3731, 2018.
- [19] PASQUALOTTO, A.; BUBLITZ, M. D. Desafios do presente e do futuro para as relações de consumo ante indústria 4.0 e a economia colaborativa. *Revista de Direito, Globalização e Responsabilidade nas Relações de Consumo*, v. 3, n. 2, p. 62-81, 2017.
- [20] COELHO, P. M. N. Rumo à indústria 4.0. MS thesis, 2016.
- [21] MARSON, M. D. A evolução da indústria de máquinas e equipamentos no Brasil: Dedini e Romi, entre 1920 e 1960. *Nova Economia*, v. 24, n. 3, p. 685-710, 2014.
- [22] DE OLIVEIRA, L. E. S.; ÁLVARES, A. J. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MONITORAMENTO E TELEOPERAÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA CNC VIA INTERNET ADERENTE À INDÚSTRIA 4.0. *Revista Produção e Desenvolvimento*, v. 4, n. 1, p. 133-151, 2018.
- [23] SILVA, R. D.; SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E. Modelagem de Sistema de Controle da Indústria 4.0 Baseada em Holon, Agente, Rede de Petri e Arquitetura Orientada a Serviços. XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Natal, 2015.
- [24] PONTES, F. J.; SILVA, M. B.; FERREIRA, J. R.; PAIVA, A. P. D.; BALESTRASSI, P. P.; SCHÖNHORST, G. B. A DOE based approach for the design of RBF artificial neural networks applied to prediction of surface roughness in AISI 52100 hardened steel turning. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 32, n. SPE, p. 503-510, 2010.

- [25] SICK, B. Tool wear monitoring in turning: A neural network application. *Measurement and Control*, v. 34, n. 7, p. 207-222, 2001.
- [26] MASMIATI, N.; SARHAN, A. A.; HASSAN, M. A. N.; HAMDI, M. Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface roughness in end milling of S50C medium carbon steel. *Measurement*, v. 86, p. 253-265, 2016.
- [27] MACHADO, Á. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; DA SILVA, M. B. Teoria da usinagem dos materiais. Editora Blucher, 2015.
- [28] RUBIO, J. C. C.; ABRÃO, A. M.; FARIA, P. E.; DAVIM, J. P. Análise digital de dano na furação de materiais compósitos laminados. *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, v. 19, n. 1-2, p. 19-24, 2007.
- [29] SILVA, R.; DINIZ, L.; NÓBREGA, L.; DA SILVA, V.; SILVA, J. Sistema para pré-ajustagem de ferramentas, utilizando processamento de imagens, aplicado a um centro de usinagem CNC. *Revista Principia - Divulgação Científica E Tecnológica Do IFPB*, 1(36), 141-156, 2017.
- [30] DE CARVALHO GOMES, L; DE FARIA CORRÊA, R. G. Utilização do Overall Equipment Effectiveness (OEE) em células de manufatura considerando o takt time. *Revista GEPROS*, v. 13, n. 3, p. 276, 2018.
- [31] BOEIRA, A. M. G. Modelagem e simulação das forças na furação com brocas helicoidais a partir de dados obtidos no torneamento de segmentos cilíndricos, 2012.
- [32] OZTURK, S.; ALTAN, E. Design of a computer aided quick-stop device for study of dead metal zone formation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 34, n. 4, p. 501-505, 2012.
- [33] DE OLIVEIRA, J. E. F. Desenvolvimento de um programa computacional para a integração de dados de projeto, fabricação e medição de peças torneadas com ênfase na síntese de tolerâncias dimensionais determinísticas, 2009.
- [34] DIB, M. H. M.; JASINEVICIUS, R. G. MODELO DA FORÇA PRINCIPAL DE USINAGEM PARA O TORNEAMENTO DE ULTRAPRECISÃO.
- [35] SANTOS, M. R. D. Modelo térmico para a solução de problemas inversos em transferência de calor com aplicação em um processo de usinagem por torneamento, 2008.
- [36] FRIGIERI, E. P. Monitoramento da rugosidade no processo de torneamento duro utilizando coeficientes Mel-Cepstrais de Sinais Acústicos e Modelos de Misturas de Gaussianas, 2013.
- [37] RAMEZANI, M.; AFSARI, A. Surface roughness and cutting force estimation in the CNC turning using artificial neural networks. *Management Science Letters*, v. 5, n. 4, p. 357-362, 2015.
- [38] SILVA, S. E. A. D. Otimização no processo de corte unidimensional de barras de aço, São Paulo, 2008.
- [39] POON, G.; GRAY, P. J.; BEDI, S.; MILLER, D. Architecture for direct model-to-part CNC manufacturing. *Systemics, Cybernetics and Informatics*, p. 14-18, 2006.

- [40] REINKE, G. Fresamento de um Molde para Lente Asférica com Diferentes Estratégias com o Auxílio do Software CAD/CAM. Trabalho de Conclusão de Curso, FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2013.
- [41] CAMPOS, P. H. D. S. Metodologia DEA-OTS: Uma contribuição para a seleção ótima de ferramentas no Torneamento do Aço ABNT H13 Endurecido, 2015.
- [42] TANIKIĆ, D.; MARINKOVIĆ, V. Modelling and optimization of the surface roughness in the dry turning of the cold rolled alloyed steel using regression analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 34, n. 1, p. 41-48, 2012.

**ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE****UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA****Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria**

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral<sup>1</sup> e criminais previstas no Código Penal<sup>2</sup>, além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 06 de Novembro de 2017.

---

Nome completo – Discente  
Matrícula: – CPF:

<sup>1</sup> LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

<sup>2</sup> Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.