

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

JOÃO PEDRO MÜLLER

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE CORTE EM TORNEAMENTO CNC  
UTILIZANDO ALGORÍTMOS GENÉTICOS

Xanxerê

2021

JOÃO PEDRO MÜLLER

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE CORTE EM TORNEAMENTO CNC  
UTILIZANDO ALGORÍTMOS GENÉTICOS

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica do Câmpus Xanxerê do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico

Orientador: Carlos Alfredo Gracioli Aita

Coorientador: Carlos Fernando da Silva Ramos

Xanxerê

2021

Müller, João Pedro

M958o Otimização de parâmetros de corte em torneamento CNC utilizando algoritmos genéticos / João Pedro Müller ; orientador: Carlos Alfredo Gracioli Aita ; coorientador: Carlos Fernando da Silva Ramos. -- 2021. 95 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Xanxerê, 2021. Inclui bibliografias.

1. Usinagem. 2. Otimização de parâmetros. 3. Algoritmos genéticos. I. Aita, Carlos Alfredo Gracioli. II. Ramos, Carlos Fernando da Silva. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – Curso de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD 670.1

JOÃO PEDRO MÜLLER

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE CORTE EM TORNEAMENTO CNC  
UTILIZANDO ALGORÍTMOS GENÉTICOS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Engenharia Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Xanxerê, 18 de fevereiro de 2021.

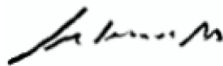


---

Prof. Carlos Alfredo Gracioli Aita, Me.

Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina



---

Prof. Carlos Fernando da Silva Ramos, Dr.

Coorientador

Instituto Superior de Engenharia do Porto



---

Prof. Marcelo André Toso, Dr.

Instituto Federal de Santa Catarina

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Dirce e Anestor, que sempre me apoiaram e me deram suporte ao longo de toda minha vida pessoal e acadêmica.

Às minhas irmãs, Isabel e Gabriela, pela cumplicidade em todos os momentos.

À minha namorada, Bruna, pelo companheirismo e apoio durante toda essa jornada.

Agradeço especialmente o meu orientador, professor Carlos Aita, pelo suporte em todos os estágios deste e de outros trabalhos que desenvolvemos juntos, o qual não mediu esforços para me auxiliar e me guiar no caminho correto de meus estudos.

Aos meus colegas pelas parcerias nesse trajeto de formação que percorremos.

Ao professor Marcelo Toso, pelo suporte e incentivo acadêmico nos projetos de pesquisa.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), todo o corpo docente e servidores, por me propiciarem a experiência e a formação como engenheiro, bem como todo o amparo necessário para realização deste projeto.

Ao Instituto Politécnico do Porto (IPP), ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) e ao Grupo de Investigação em Engenharia Inteligente para a Inovação Avançada e Desenvolvimento (GECAD) pela parceria internacional firmada entre Brasil e Portugal para realização deste trabalho.

Um agradecimento especial ao professor Carlos Ramos, que me embasou e me introduziu à área dos algoritmos genéticos dando todo suporte para realização desta pesquisa.

Ao aluno Bruno Mota, do ISEP/IPP, pela parceria e pela super colaboração no trabalho, desenvolvendo e atualizando o algoritmo genético utilizado.

A todas as pessoas que me auxiliaram direta ou indiretamente nesta etapa de minha vida acadêmica.

“Acho que esse é o melhor conselho de todos:  
pense constantemente sobre como  
você pode fazer as coisas melhor  
e questione a si mesmo.”

(Elon Musk)

## RESUMO

A otimização dos sistemas produtivos, no atual contexto tecnológico e econômico onde vivemos, tem se tornado uma necessidade de sobrevivência para as empresas. A redução do consumo energético também ganhou foco em diversos campos de pesquisa, tanto por motivos econômicos quanto por consciência ecológica, colocando como grande pilar a sustentabilidade. No âmbito da indústria 4.0, algoritmos computacionais vêm sendo utilizados para suprir necessidades de otimização, buscando sistemas mais inteligentes e eficientes. Entretanto, para aplicação destes algoritmos à escala industrial, em especial processos de usinagem, ainda é necessário muito estudo. Neste contexto, o objetivo desse trabalho foi utilizar um algoritmo genético para otimizar a escolha de parâmetros de corte na produção de peças usinadas em tornos com Comando Numérico Computadorizado (CNC), considerando a qualidade superficial das peças e a integridade do ferramental, visando a diminuição do *makespan* e do consumo energético. Para avaliar a efetividade da metodologia foi utilizada uma abordagem de pesquisa experimental, realizada por meio digital e validada laboratorialmente, buscando resultados quantitativos e otimizados de parâmetros de corte para usinagem de peças em tornos mecânicos CNC. Através do *input* de uma faixa de parâmetros de corte, o algoritmo genético organiza, seleciona e fornece parâmetros otimizados. O desempenho foi avaliado por meio da comparação das medidas de consumo energético, *makespan* e rugosidade superficial de usinagens experimentais utilizando parâmetros otimizados e parâmetros da primeira geração do algoritmo genético. Resultados satisfatórios foram obtidos virtualmente na escolha de parâmetros otimizados pelo algoritmo. A aproximação teórico-experimental do *makespan* também foi aceitável, entretanto as medidas de rugosidade e consumo energético não tiveram resultados satisfatórios.

Palavras-Chave: Otimização, Usinagem, Algoritmo Genético

## **ABSTRACT**

The production systems optimization, in the current technological and economic context that we live, has become a survival necessity for companies. The reduction of energy consumption has also gained focus in several research fields, both for economic reasons and for ecological awareness, placing sustainability as a great pillar. In the industry 4.0 scope, computational algorithms have been used to supply optimization needs, searching more intelligent and efficient systems. However, to apply these algorithms on an industrial scale, especially machining processes, much study is still needed. In this context, the objective of this work was to use a genetic algorithm to optimize the choice of cutting parameters in the production of parts machined in lathes with Computerized Numerical Command (CNC), considering the parts surface quality and the integrity of the tooling, aiming at reducing makespan and energy consumption. To evaluate the methodology effectiveness, an experimental research approach was used, performed digitally, and validated in the laboratory, aiming quantitative and optimized results of cutting parameters for machining in a CNC lathe. Through the input of a range of cutting parameters, the genetic algorithm organizes, select, and provides optimized parameters. The performance was evaluated by comparing the measures of energy consumption, makespan and surface roughness of experimental machining using optimized parameters and the first-generation parameters of the genetic algorithm. Satisfactory results were obtained virtually in the choice of optimized parameters by the algorithm. The theoretical-experimental approach of makespan was also acceptable, however the roughness and energy consumption measures did not have satisfactory results.

**Keywords:** Optimization, Machining, Genetic Algorithms



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Custos fixos e custos variáveis .....	20
Figura 2 - Divisão dos processos de fabricação.....	22
Figura 3 - Parâmetros de corte.....	26
Figura 4 - Qualidade de superfície. a) rugosidades; b) ondulações; c) direção das irregularidades; d) falhas. ....	36
Figura 5 - Sistema de Medição $R_z$ .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6 - Rugosidade máxima ( $R_{máx}$ ) e profundidade média ( $R_p$ ). <b>Erro! Indicador não definido.</b>	
Figura 7 - Desvio médio aritmético $R_a$ . ....	38
Figura 8 - Perspectiva para Indústria 4.0. ....	40
Figura 9 - Fluxograma de funcionamento dos algoritmos genéticos. ....	44
Figura 10 - Fluxograma da metodologia utilizada.....	45
Figura 11 - Dimensões do Corpo de Provas.....	46
Figura 12 - Operações de usinagem. ....	47
Figura 13 - Torno CNC Romi GL240 do IFSC câmpus Xanxerê. ....	57
Figura 14 - Pastilha de corte TNMG160408-GM. ....	58
Figura 15 - Embalagem da Ferramenta. ....	59
Figura 16 - Alicata Wattímetro Digital ICEL AW-4700.....	60
Figura 17 - Esquema de Instalação do Wattímetro. ....	61
Figura 18 - TESA - Rugosurf 20. ....	62
Figura 19 - Gráfico da potência da máquina obtido experimentalmente. ....	75
Figura 20 - Gráfico do tempo de operação obtido experimentalmente.....	74
Figura 21 - Comparação teórico-experimental para a configuração teoricamente otimizada.....	77
Figura 22 - Comparação teórico-experimental para a melhor solução da primeira geração. ....	77
Figura 23 - Comparação teórico-experimental dos tempos de corte.....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de entrada para operação. ....	49
Tabela 2 - Exemplo de Indivíduos. ....	49
Tabela 3 – Entrada para pressão específica de corte e vida da ferramenta.....	50
Tabela 4 - Constantes k.....	51
Tabela 5 - Usinagens experimentais. ....	56
Tabela 6 - Propriedade do Alumínio Aço SAE 1020. ....	57
Tabela 7 - Especificações técnicas do torno CNC ROMI 240GL.....	58
Tabela 8 - Especificações técnicas do Alicete Wattímetro Digital ICEL AW-4700.....	60
Tabela 9 - Especificações técnicas do TESA - Rugosurf 20.....	63
Tabela 10 - Cronograma de ação. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 11 - Resultados otimizados de parâmetros de corte do algoritmo. ....	64
Tabela 12 – Resultado por operação dos critérios para os parâmetros otimizados fornecidos pelo algoritmo. ....	64
Tabela 13 - Resultado dos critérios finais para os parâmetros otimizados fornecidos pelo algoritmo.....	64
Tabela 14 - Resultados de parâmetros de corte para a melhor solução da primeira geração obtidos pelo algoritmo. ....	65
Tabela 15 - Resultado por operação dos critérios para os parâmetros da melhor solução da primeira geração fornecidos pelo algoritmo. ....	65
Tabela 16 - Resultado dos critérios finais para os parâmetros da melhor solução da primeira geração fornecidos pelo algoritmo.....	66
Tabela 17 - Resultados da média dos critérios da primeira e da última geração do algoritmo.....	66
Tabela 18 - Potências obtidas para a configuração otimizada.....	67
Tabela 19 - Potências obtidas para a melhor configuração da primeira geração. ....	67
Tabela 20 - Tempos de corte de desbaste para a configuração otimizada. ....	68
Tabela 21 - Tempos de corte de desbaste para a melhor configuração da primeira geração. ....	68
Tabela 22 - Tempos de corte de acabamento para a configuração otimizada.....	69
Tabela 23 - Tempos de corte de acabamento para a melhor configuração da primeira geração. ....	69

Tabela 24 - Resultados obtidos para a configuração otimizada. ....	70
Tabela 25 - Resultados obtidos para a melhor configuração da primeira geração. ....	70
Tabela 26 - Diferença entre os critérios otimizados e da melhor solução da primeira geração por operação. ....	72

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- API – Interface de Programação de Aplicação
- ASME – American Society of Mechanical Engineers
- CLP – Controlador Lógico Programável
- CNC – Comando Numérico Computadorizado
- GECAD – Grupo de Investigação em Engenharia Inteligente para a Inovação Avançada e Desenvolvimento
- HTTP – Protocolo de Transferência de Hipertexto
- IA – Inteligência Artificial
- IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina
- IoT – Internet das Coisas
- IPP – Instituto Politécnico do Porto
- ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto
- JSON – Notação de Objeto JavaScript
- REST – Transferência Representacional de Estado
- RMS – *Root Mean Square Average*
- PCP – Planejamento e Controle da Produção
- PSO – Otimização por Enxame de Partículas (*particle swarm optimization*)

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $A_p$  – Profundidade de corte
- $A_{p_{df}}$  – Profundidade de corte final de desbaste
- $C$  – Constante do material e da ferramenta para pressão específica de corte
- $C'$  – Velocidade de corte para  $A_p = 1\text{mm/rot}$  e  $f = 1\text{mm}$
- $C_e$  – Consumo energético
- $C_o$  – Velocidade de corte para  $T_v = 60\text{ min}$ ,  $S = 1\text{ mm}^2$  e  $\frac{G}{5} = 1$
- $C_t$  – Constante para vida da ferramenta
- $d$  – Diâmetro do fundo de corte
- $D$  – Diâmetro da peça
- $D_f$  – Diâmetro final de desbaste
- $D_{t_v}$  – Dano total na ferramenta
- $D_v$  – Porcentagem de dano na ferramenta
- $F_c$  – Força de corte
- $f$  – Avanço
- $f_v$  – Constante para vida da ferramenta
- $G$  – Índice de esbeltez
- $g$  – Constante para vida da ferramenta
- $l$  – Comprimento usinado por revolução
- $k_{ft}$  – Preço da vida útil da ferramenta
- $K_p$  – Custo de produção por peça
- $K_s$  – Pressão específica de corte
- $K_{uf}$  – Custo das ferramentas
- $K_{um}$  – Custo relativo à máquina
- $K_{us}$  – Custo da mão de obra de usinagem
- $l_f$  – Percurso de avanço
- $\ell$  – Número de medições
- $m_f$  – Constante do material para vida da ferramenta
- $N_{fp}$  – Vida média do porta-ferramentas
- $N_s$  – Custo de aquisição da pastilha de corte
- $N_t$  – Número de trocas de ferramenta
- $n$  – Constante do material e da ferramenta para pressão específica de corte

$n_f$  – Constante do material para vida da ferramenta  
 $\eta_m$  – Rendimento da Máquina  
 $np$  – Número de passes  
 $np_a$  – Número de passes arredondado  
 $nt$  – Velocidade de rotação do cabeçote do torno  
 $n_t$  – Constante para vida da ferramenta  
 $P_c$  – Potência de corte  
 $P_m$  – Potência fornecida pelo motor  
 $P_u$  – Potência de usinagem  
 $r$  – Raio de ponta da ferramenta  
 $R_a$  – Rugosidade de desvio médio aritmético  
 $R_p$  – Rugosidade de profundidade média  
 $R_q$  – Rugosidade desvio médio quadrático  
 $R_t$  – Rugosidade máxima  
 $R_z$  – Rugosidade média  
 $S$  – Área da seção de corte  
 $Sh$  – Salário e encargos do operador  
 $Sm$  – Custo total da máquina por hora  
 $T_1$  – Tempo improdutivo  
 $T_2$  – Tempo de troca e *setup* da ferramenta  
 $T_a$  – Tempo de aproximação e afastamento da ferramenta  
 $T_c$  – Tempo de corte  
 $T_{c_t}$  – Tempo total de corte  
 $T_{ft}$  – Tempo de troca de ferramenta  
 $T_s$  – Tempo secundário  
 $T_p$  – Tempo de *setup* da máquina  
 $T_t$  – Tempo total de produção  
 $T_v$  – Tempo de vida da ferramenta  
 $V_c$  – Velocidade de corte  
 $V_{min}$  – Vida mínima esperada para ferramenta  
 $V_{t_f}$  – Vida total da ferramenta  
 $y$  – Constante para vida da ferramenta  
 $Z_t$  – Quantidade de peças fabricadas durante a vida da ferramenta

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	16
1.1	Objetivos.....	17
1.1.1	Objetivo geral.....	17
1.1.2	Objetivos específicos.....	17
1.2	Justificativa .....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	Planejamento da produção.....	18
2.2	Otimização industrial .....	19
2.3	Custos de produção.....	20
2.4	Usinagem .....	21
2.4.1	Custos de Usinagem .....	23
2.5	Parâmetros de corte .....	24
2.6	Tempo Total de Produção .....	27
2.7	Força de Usinagem .....	29
2.8	Potência de Usinagem.....	30
2.9	Avarias e Desgaste na Ferramenta de Corte.....	31
2.9.1	Vida da Ferramenta .....	32
2.9.2	Cálculo da Vida da Ferramenta .....	33
2.10	Qualidade Superficial.....	34
2.10.1	Rugosidade .....	37
2.10.1.1	Desvio médio quadrático ( $Rq$ ) .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.10.1.2	Rugosidade média ( $Rz$ ) .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.10.1.3	Rugosidade máxima ( $Rt$ ).....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.10.1.4	Profundidade média ( $Rp$ ).....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.10.1.5	Desvio médio aritmético ( $Ra$ ) .....	37
2.11	Indústria 4.0.....	39
2.12	Algoritmos para Otimização da Produção .....	41
2.12.1	Algoritmos Genéticos .....	42
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	45
3.1	Escolha da geometria .....	46
3.2	Operações Experimentais .....	47
3.3	Algoritmo Genético Aplicado.....	48

3.3.1	Parâmetros de Entrada.....	48
3.3.2	Evolução das Gerações.....	50
3.3.2.1	Formulação dos Critérios de Aptidão.....	52
3.3.3	Critérios de Parada.....	55
3.4	Procedimento Experimental.....	56
3.4.1	Material das peças.....	56
3.4.2	Especificações da Máquina.....	57
3.4.3	Especificações da ferramenta.....	58
3.5	Variáveis de desempenho.....	59
3.5.1	Consumo energético.....	59
3.5.2	Tempo total de usinagem (makespan).....	61
3.5.3	Rugosidade superficial.....	62
3.6	Cronograma.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4	RESULTADOS.....	63
4.1	Resultados do Algoritmo Genético.....	63
4.2	Resultados das Usinagens Experimentais.....	66
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	70
5.1	Análise e Discussão dos Resultados Teóricos.....	70
5.2	Análise e Discussão dos Resultados Experimentais.....	73
5.3	Comparação dos Resultados Teóricos e Experimentais.....	76
6	CONCLUSÕES.....	80
7	RECOMENDAÇÕES FINAIS.....	81
	REFERÊNCIAS.....	83
	Apêndice A – Código de Entrada Algoritmo Genético (JSON).....	92
	Apêndice B - Código de Saída do Algoritmo Genético.....	94
	Apêndice C – Programação CNC.....	97



## 1 INTRODUÇÃO

No contexto econômico globalizado onde vivemos, onde a informação está facilmente disponível e se propaga rapidamente, entrar ou manter-se no mercado tem se tornado um grande desafio para qualquer organização. Nesse cenário, a otimização dos sistemas de produção tem se tornado mais que um diferencial competitivo, e sim uma necessidade de sobrevivência para as empresas.

Segundo Coutinho (2006), na conjuntura atual, projetar um sistema eficaz já não é suficiente, o ideal é que se projete o melhor sistema, onde melhor traduz-se como um sistema eficiente, versátil, distinto e com a melhor relação custo-benefício, ou seja, otimizado.

Em seu trabalho, Vélez-Gallego et al. (2016) mostra que investimentos em otimização, quando relacionado com o planejamento da produção, demonstram um grande potencial para redução dos tempos de produção e, conseqüentemente, os custos.

O consumo de energia também é um fator muito importante a ser considerado durante o planejamento da produção, visto que dele provém boa parte dos custos de processamento. Pelegrino (2018) afirma que a redução do consumo de energia e de recursos naturais tem ganhado foco em diversos campos de pesquisa, tanto por motivos econômicos quanto por consciência ecológica, colocando como grande pilar a sustentabilidade. A U.S Energy Information Administration (2016) mostra que o setor industrial, considerando diferentes grupos, como os setores de fabricação, agricultura, mineração e construção civil, consomem cerca de 54% de toda energia entregue do mundo.

Em qualquer processo de fabricação, a energia é um *input* que se converte parcialmente em trabalho útil. A usinagem, por exemplo, utiliza apenas uma fração da energia de maneira efetiva, uma pequena parte é usada para criar condições estáveis do processo e funções periféricas (APOSTOLOS et al., 2013).

Desta forma o gerenciamento da produção desempenha um papel muito importante na indústria, podendo oferecer grande economia do ponto de vista energético e financeiro. O planejamento da produção deve incluir a eficiência energética, juntamente com os custos e o controle do tempo, nos objetivos em todos os níveis de projeto e controle da produção.

Diversas ferramentas e métodos para integrar a eficiência energética aos

processos de fabricação já foram aplicados. Inseridos na era da tecnologia, no âmbito da indústria 4.0, algoritmos computacionais estão sendo cada vez mais utilizados para suprir a necessidade de otimização, buscando sistemas mais inteligentes e eficientes.

Autores como Frascati et al. (2017) e Eduardo e Giselle (2014) utilizam algoritmos computacionais na resolução de problemas relacionados ao planejamento da produção, reduzindo o tempo de fabricação (*makespan*) e otimizando o processo.

Para aplicação de algoritmos computacionais na otimização de operações em processos de fabricação, em especial processos de usinagem, a nível industrial é necessário muito estudo, para definir, de maneira concreta, quais os efeitos que ela pode causar no produto. Este trabalho situa-se dentro desse contexto, o qual busca investigar a aplicação de um algoritmo genético para otimização de parâmetros de corte em operações de torneamento utilizando um centro de torneamento com Comando Numérico Computadorizado – CNC.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é utilizar um algoritmo genético para otimizar a escolha de parâmetros de corte na produção de peças usinadas em tornos CNC, considerando a qualidade superficial das peças e o desgaste da ferramenta de corte, visando a diminuição do *makespan* e dos custos de energia.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Estabelecer parâmetros de entrada para aplicação do algoritmo genético;
- Aplicar o algoritmo para otimização da escolha dos parâmetros de corte;
- Efetuar usinagens para validação dos parâmetros selecionados pelo algoritmo genético;
- Verificar o consumo de energia na produção das peças usinadas;
- Analisar o tempo de operação da máquina na usinagem das peças;
- Verificar a rugosidade superficial das peças produzidas;

## **1.2 Justificativa**

A busca por meios de produção mais eficientes, econômicos, inteligentes e sustentáveis tem impulsionado os estudos sobre otimização dos métodos de fabricação existentes, principalmente no contexto tecnológico da Indústria 4.0. A otimização da usinagem, dentro deste cenário e por ser um dos processos mais dispendiosos de fabricação mecânica, é de extrema importância e ganha mais relevância quando considerado alguns dos principais problemas enfrentados pelas indústrias, como a redução de tempo de fabricação, a minimização do consumo energético e a qualidade dos itens fabricados.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Planejamento da produção**

O principal objetivo da engenharia no planejamento da produção é aumentar a competitividade da empresa, por meio do aprimoramento da produção, incorporando valor processo. Muito utilizada, principalmente na área administrativa, o Planejamento e Controle da Produção - PCP é uma ferramenta que fornece informações para planejar, organizar, coordenar e controlar o processo produtivo, buscando sempre otimizar os meios de produção em prol da satisfação do cliente (MATOS et al., 2014).

Para aumentar a eficiência deste sistema, Tubino (2000) afirma que as atividades de planejamento, programação e controle, ligadas ao PCP, devem ser exercidas em três níveis hierárquicos, separados em nível estratégico, tático e operacional. No nível estratégico, que ocorre a longo prazo, o departamento de produção deve formular o planejamento estratégico da produção, que estabelece o rumo seguido pela organização. O tático, que ocorre a médio prazo e é realizado a nível departamental, deve se preocupar com o desenvolvimento dos programas e projetos da organização. Por fim, o nível operacional, que ocorre a curto prazo, preocupa-se com o detalhamento das ações e atividades necessárias para atingir os objetivos pré-estabelecidos pelas hierarquias anteriores, e é neste nível onde o planejamento das operações de fabricação está inserido.

O planejamento a nível operacional busca traçar metas e definir resultados bem específicos, obtendo planos de ações e cronogramas de atividades, combinadas com

especificações sobre a produção, pessoal envolvido, funções, responsabilidades atribuídas, divisões de tarefas e recursos financeiros necessários. Através do nível operacional, é possível modificar variáveis para otimizar o processo de produção, portanto, neste nível, a aplicação de algoritmos computacionais ganha grande importância, pois estes podem auxiliar na escolha de parâmetros ideais de fabricação, buscando a otimização industrial.

## 2.2 Otimização industrial

A otimização, dentro do contexto industrial, busca melhorar os processos de fabricação, almejando ter o melhor custo-benefício sobre os produtos para aumentar os lucros, fazendo com que a empresa possa se destacar no mercado.

A otimização industrial pode ter diferentes definições, para Ferreira (2010), em seu dicionário, a palavra otimizar é definida como “aproveitar, utilizar, ou realizar melhor, ou de forma mais produtiva”. O autor Olivieri (2004) define a otimização como sendo “um conjunto de procedimentos através dos quais se busca encontrar uma direção que maximize ou minimize uma função objetivo, almejando-se sempre o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis”.

Otimizar é minimizar ou maximizar determinado parâmetro, encontrando um modelo adequado de acordo com um ou mais critérios, como tempo de fabricação e consumo de energia. A otimização possibilita, como abordado neste trabalho, envolver uma metodologia para planejar a produção em uma empresa, para que ela produza mais, em menos tempo, reduzindo custos e maximizando os lucros.

Mesmo para um problema já resolvido com uma situação adequada, ainda poderá haver uma incrementação de forma a torná-lo melhor, nem que para isso seja necessário mudar os parâmetros, analisar outros materiais e utilizar novas tecnologias (BAZZO; PEREIRA, 2006).

Rafael et al. (2018) utilizou técnicas de otimização, propondo um algoritmo multiobjetivo, abordando problemas de planejamento da produção em um sistema com múltiplas rotas heterogêneas, utilizando como critério de otimização a diminuição do *makespan* e o consumo energético. Segundo o autor obtiveram-se resultados promissores quanto a alocação dos recursos e a minimização dos objetivos.

Gupta e Ho (2000) propuseram um algoritmo para determinar o planejamento ótimo da produção considerando uma linha com duas máquinas idênticas trabalhando

em paralelo, onde o critério ótimo é o menor tempo total de fluxo (*flowtime*) entre um conjunto de cronogramas de produção com o menor *makespan*. O trabalho mostra que o algoritmo proposto pelos autores pode encontrar rapidamente cronogramas ideais para problemas com grandes números de tarefas.

### 2.3 Custos de produção

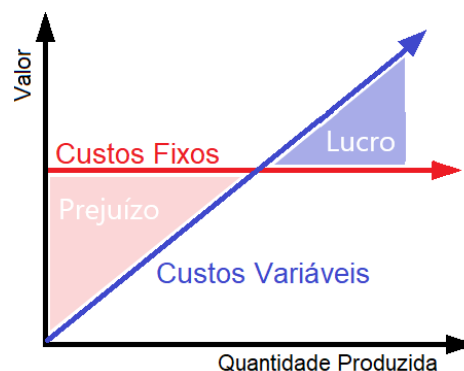
No contexto de otimização industrial um dos principais fatores que leva a busca de novas tecnologias é a diminuição dos custos de produção. Estes custos podem ter diferentes origens, considerando desde o pagamento de salários até a utilização de matéria prima e o consumo energético das plantas fabris.

Carareto et al. (2006), em seu trabalho, conceitua os custos como sendo o “gasto que é aplicado na produção ou em qualquer outra função de custo, gasto esse desembolsado ou não”.

Os custos, de maneira geral, podem ser divididos em custos fixos e custos variáveis. Os custos fixos são menos suscetíveis a apresentar variações com o volume de produção, ou seja, permanecem constantes dentro de determinada quantidade instalada. Os custos variáveis são aqueles que aumentam ou diminuem dependendo diretamente do volume produzido (CARARETO et al., 2006). Gastos em energia, água, matéria prima, serviços terceirizados e desgaste de maquinário e ferramentas são exemplos clássicos de custos variáveis.

Os custos variáveis estão diretamente relacionados com o lucro. Quanto maior o volume produzido maior serão os lucros e, conseqüentemente, maior serão os custos variáveis. A Figura 1 apresenta gráfico simplificado dos custos em função da quantidade produzida e do valor do produto.

Figura 1 - Custos fixos e custos variáveis



Fonte: Do autor (2020).

Um ponto de equilíbrio, entre lucro e prejuízo, é encontrado na intersecção das retas de custos fixos e custos variáveis. A partir deste ponto, à direita, o processo produtivo começa a ser lucrativo.

Problemas de otimização de produção geralmente estão ligados aos custos variáveis, onde geralmente busca-se, nem sempre de maneira direta, obter o maior lucro e produzir a menor quantidade possível. Desta forma, o objetivo da otimização da produção, na maioria dos casos, é aumentar a inclinação da curva de custos variáveis, representada na Figura 1, buscando o maior lucro.

## **2.4 Usinagem**

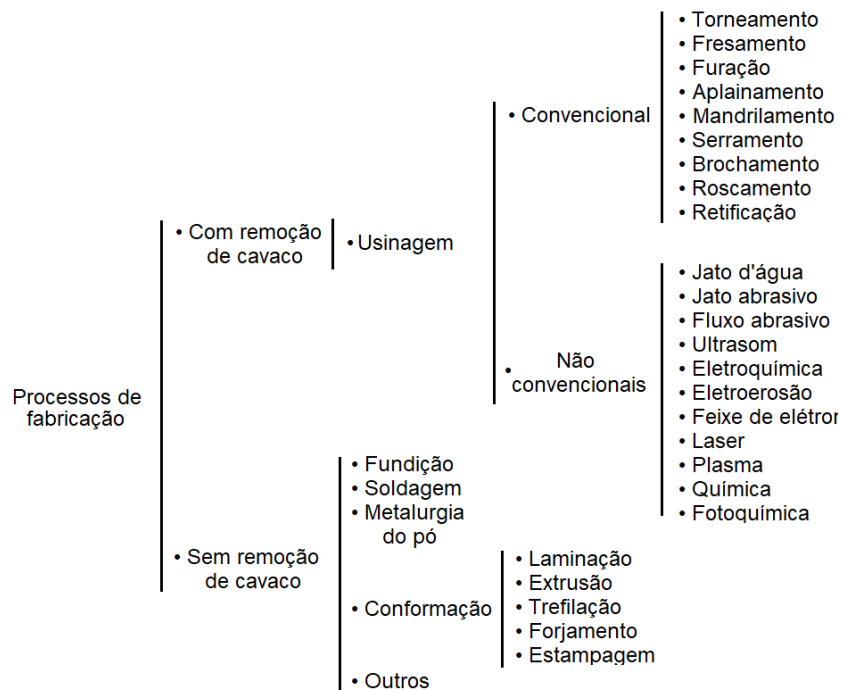
No estudo dos meios de produção, os que mais se destacam são os processos de fabricação mecânica, dentre os quais ressalta-se a usinagem, a fundição, a soldagem, a conformação mecânica e a metalurgia do pó. Muitas vezes mais de um destes processos são utilizados antes de uma peça estar acabada (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Ferraresi (1969) ainda classifica as operações dos metais em duas grandes classes, sendo as operações de conformação e as operações de usinagem.

Callister e Rethwisch (2012) descrevem as operações de conformação como sendo aquelas em que a geometria da peça é alterada por meio de uma deformação plástica induzida por uma força ou tensão externa que deve exceder o limite de escoamento do material. Exemplos usuais de técnicas de conformação são forjamento, extrusão, laminação e trefilação.

Já a usinagem Ferraresi (1969) define como sendo as operações que “ao conferir a peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco”.

Ainda dentro desta analogia, Machado et al. (2009) subdivide os processos de fabricação em processos com remoção de cavaco e processos sem remoção de cavaco, como é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Divisão dos processos de fabricação.



Fonte: Adaptado de (MACHADO et al., 2009).

Desta maneira, a usinagem classifica-se como um processo com remoção de cavaco. Ferraresi (1969) ainda define o cavaco sendo “a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular”.

A usinagem é um processo realizado por uma máquina-ferramenta. O princípio usado em máquinas-ferramentas é o de gerar superfícies fornecendo um movimento relativo adequado entra a ferramenta e a peça (BOOTHROYD, 1988).

Dentro dos processos de usinagem o torneamento demonstra ser um dos mais importantes, e será foco deste estudo. Para Ferraresi (1969), a operação de torneamento é um processo mecânico com a finalidade de obter superfícies de revolução utilizando ferramentas monocortantes.

A operação de torneamento é realizada através de uma máquina-ferramenta, nomeada torno mecânico, responsável por rotacionar a peça, em torno de um eixo principal, sobre uma ferramenta cortante que se desloca sobre a peça, removendo cavaco. As versões mais avançadas destas máquinas-ferramentas são os centros de torneamento com controle CNC (WALKER, 1998).

Por fim, segundo Machado et al. (2009), a usinagem pode ser uma operação complexa e simples ao mesmo tempo. Complexa devido à dificuldade de estabelecer parâmetros ideais de corte, uma vez que estes muitas vezes são imprevisíveis. E

simples pois, determinados os parâmetros, o cavaco se forma corretamente, dispensando intervenções externas. Por conta disto, a escolha correta dos parâmetros de corte é de suma importância, pois através desta é possível produzir peças dentro das especificações de geometria e acabamento com o menor custo.

#### 2.4.1 Custos de Usinagem

Nos processos de usinagem, diversas são as variáveis que compõem os custos totais variáveis de produção. Diniz, Marcondes e Coppini (2010) sugere que os custos de produção de uma peça podem ser divididos em duas categorias: os custos devido ao processo, como custos das ferramentas, da ocupação das máquinas e dos operadores e os custos que não se relacionam diretamente com o processo, como custos de controle de qualidade, matéria prima e periféricos. Considerando somente os custos relativos ao processo, que é interessante neste estudo, o autor sugere a Equação 1 para o cálculo do custo de produção por peça ( $Kp$ ).

$$Kp = Kus + Kum + Kuf \quad 1$$

Onde  $Kus$  é o custo da mão de obra de usinagem,  $Kum$  é o custo relativo à máquina e  $Kuf$  é o custo das ferramentas.

O custo da mão de obra ( $Kus$ ) pode ser facilmente estimado multiplicando o tempo total de produção ( $Tt$ ) em horas pelo salário e encargos do operador ( $Sh$ ) em R\$/hora, obtendo-se assim a Equação 2.

$$Kus = Tt \cdot Sh \quad 2$$

O custo relativo a máquina ( $Kum$ ) utilizado para calcular o custo de produção por peça, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2010), considera diversas variáveis, como o valor inicial de aquisição, idade e vida prevista, custo anual de manutenção e custo do m<sup>2</sup> ocupado pela máquina. Estas variáveis formam o custo total da máquina por hora ( $Sm$ ), que multiplicado pelo tempo total de produção ( $Tt$ ) resulta no custo da máquina ( $Kum$ ), como apresentado na Equação 3.



$$K_{um} = Tt \cdot S_m \quad 3$$

O custo da ferramenta ( $K_{uf}$ ) é estimado com base no preço da vida útil da ferramenta ( $K_{ft}$ ) e a quantidade de peças que podem ser fabricadas durante a vida da ferramenta ( $Z_t$ ), e pode ser numericamente expressa pela Equação 4 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010).

$$K_{uf} = \frac{K_{ft}}{Z_t} \quad 4$$

Sendo  $K_{ft}$ , no caso de pastilhas intercambiáveis como ferramenta, dependente da vida média do porta-ferramentas ( $N_{fp}$ ), do custo de aquisição do porta-ferramentas ( $V_{si}$ ) e do custo de aquisição da pastilha de corte ( $N_s$ ), e pode ser aproximado pela Equação 5 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010).

$$K_{ft} = \frac{V_{si}}{N_{fp}} + \frac{K_{pi}}{N_s} \quad 5$$

É possível perceber que o custo de produção por peça está diretamente ligado ao tempo total de produção ( $Tt$ ), uma vez que as três variáveis principais que compõem a Equação 1 são em função dele.

## 2.5 Parâmetros de corte

Antes de ater-se aos tempos de usinagem é importante definir os parâmetros de corte, visto que seu entendimento é necessário para compreender os tempos de fabricação.

Os processos de usinagem, mais especificamente o torneamento, possuem três parâmetros de corte principais: a velocidade de corte ( $V_c$ ), a profundidade de corte ( $A_p$ ) e o avanço ( $f$ ).

A velocidade de corte ( $V_c$ ) é a velocidade instantânea tangencial resultado do deslocamento da ferramenta em relação a peça. Machado et al. (2009) conceitua a velocidade de corte como sendo “a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte”. A velocidade de

corte pode ser representada numericamente pela Equação 6.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot nt}{1000} \quad 6$$

Onde,

$V_c$  = Velocidade de corte (m/min);

$D$  = Diâmetro da peça (mm);

$nt$  = Velocidade de rotação do cabeçote (rpm).

A velocidade de corte também está diretamente relacionada ao desgaste da ferramenta, devido ao aquecimento durante o processo, e pode variar de acordo com a dureza do material usinado.

A profundidade de corte ( $A_p$ ) é a medida, geralmente em milímetros, perpendicular à superfície, da penetração da ferramenta de corte sobre a peça. Ferraresi (1969) define a profundidade de corte como sendo “a profundidade ou largura de penetração da aresta principal de corte, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho”. Stemmer (1993) aponta que a profundidade de corte  $A_p$ , mencionada como penetração passiva, é a medida, perpendicular ao plano de trabalho, que a ferramenta penetra na peça. A profundidade de corte pode ser facilmente descrita matematicamente com a Equação 7.

$$A_p = \frac{D - d}{2} \quad 7$$

Em que,

$A_p$  = Profundidade de corte (mm);

$d$  = Diâmetro do fundo de corte (mm);

$D$  = Diâmetro da peça (mm).

Por fim, o avanço ( $f$ ) é o deslocamento da ferramenta de corte em relação à peça a cada rotação, ciclo ou unidade de tempo. Boothroyd (1988) aponta que o avanço é um movimento que pode ser fornecido à ferramenta ou peça que leva à remoção repetida ou contínua de cavacos e à criação de uma superfície usinada com

as características geométricas desejadas. Segundo Ferraresi (1969) o avanço é definido como o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso, medido na direção do avanço da ferramenta, o qual pode conter uma subdivisão chamada “avanço por dente” em casos de ferramentas com mais de uma aresta cortante.

O avanço também pode ser descrito matematicamente pela Equação 8.

$$f = \frac{I}{nt} \quad 8$$

Onde,

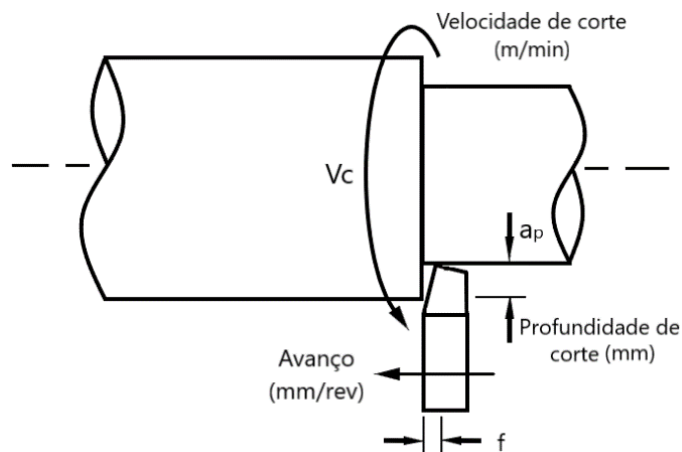
$f$  = Avanço (mm/rev);

$I$  = Comprimento usinado por revolução (mm);

$nt$  = Velocidade de rotação do cabeçote (rpm).

A Figura 3 apresenta uma ilustração simplificada indicando cada parâmetro apresentado.

Figura 3 - Parâmetros de corte



Fonte: Adaptado de (FERRARESI, 1969).

A partir da maximização de parâmetros, como a velocidade de corte, é possível alterar os tempos de fabricação. Entretanto, Diniz, Marcondes e Coppini (2010) salienta que o aumento elevado da velocidade de corte pode acarretar em desgaste excessivo da ferramenta, gerando gastos indesejados. Assim, o autor define em seu trabalho intervalos de máxima eficiência para este parâmetro.

## 2.6 Tempo Total de Produção

O tempo total de usinagem ( $Tt$ ), também referido neste trabalho como uma simplificação do *makespan*, corresponde ao tempo necessário para um ciclo completo de usinagem de uma peça.

Stemmer (1993) subdivide o tempo total de usinagem em duas componentes: o tempo de preparação para a tarefa e o tempo de execução da tarefa. O tempo de preparação para a tarefa por sua vez, é subdividido em tempo de preparação básico e tempo de preparação distribuído. Já o tempo de execução da tarefa é função dos tempos efetivo de execução, básico de execução, principal, secundário de execução, distribuído de execução, distribuído devido ao pessoal, distribuído devido à ferramenta e distribuído devido ao equipamento e ao material.

Para Ferraresi (1969) e Diniz, Marcondes e Coppini (2010) um ciclo completo de usinagem de uma peça, que pertence a um lote de  $Z$  peças, é composto pelas seguintes fases:

- a. Colocação da peça bruta na máquina.
- b. Aproximação da ferramenta para o corte.
- c. Corte.
- d. Afastamento da ferramenta.
- e. Inspeção, caso necessário, e retirada da peça fabricada.

Ainda segundo os autores, fazem parte, de maneira indireta, no ciclo de usinagem.

- f. *Setup* da máquina para início da produção.
- g. Remoção da ferramenta para substituição.
- h. *Setup* da nova ferramenta.

Desta forma o tempo total de usinagem de uma peça, pertencente a um lote de  $Z$  peças, pode ser descrita seguindo a Equação 9.

$$Tt = Tc + Ts + Ta + \frac{Tp}{Z} + \frac{Nt}{Z} \cdot Tft \quad 9$$

Onde  $Tc$  é o tempo de corte correspondente a fase  $c$ ,  $Ts$  é o tempo

secundário correspondente às fases *a* e *e*,  $T_a$  representa o tempo de aproximação e afastamento das fases *b* e *d*,  $T_p$  é o tempo de *setup* da máquina da fase *f* e, por fim,  $T_{ft}$  é o tempo de troca de ferramenta. A variável  $Nt$  representa o número de trocas da ferramenta para a usinagem do lote, e pode ser descrita seguindo a Equação 10, com  $T_v$  representando o tempo de vida de uma ferramenta.

$$Nt = Z \cdot \frac{T_c}{T_v} - 1 \quad 10$$

Como simplificação do modelo proposto pela Equação 9, Ferraresi (1969) ainda apresenta a Equação 11.

$$T_t = T_c + T_1 + T_2 \quad 11$$

Sendo  $T_c$  o tempo efetivo de corte, representado pela fase *c*, que é em função da velocidade de corte ( $V_c$ ) e  $T_1$  considerado o tempo improdutivo, representado pelas fases *a*, *b*, *d*, *e* e *f*.  $T_2$  é o tempo de troca e *setup* da nova ferramenta, representada pelas fases *g* e *h*, esta variável está diretamente relacionada à velocidade de corte, uma vez que quanto maior a velocidade de corte maior será o desgaste da ferramenta e, conseqüentemente, maior o tempo para sua substituição.

Desconsiderando a troca de ferramenta por avarias, no processo de uma única peça, o único tempo dependente da velocidade de corte é o  $T_c$ , que também é caracterizado sendo o tempo efetivo de corte. Esta variável pode ser aproximada, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2010), pela Equação 12.

$$T_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} \quad 12$$

Em que

$T_c$  = Tempo de corte (min)

$l_f$  = Percurso de avanço (mm)

$d$  = Diâmetro da peça (mm)

$f$  = Avanço (mm/rev)

$V_c$  = Velocidade de corte (m/min)

A Equação 12 se aplica para casos em que o avanço da ferramenta é constante e segue uma trajetória retilínea.

## 2.7 Força de Usinagem

As forças presentes no processo de usinagem são consideradas como a ação que a peça faz sobre a ferramenta. A força total que atua sobre a ferramenta é denominada força de usinagem. Devido à dificuldade de estimar a intensidade e sentido desta força é necessário subdividi-la em componentes seguindo direções conhecidas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010; FERRARESI, 1969; MACHADO et al., 2009).

Para este trabalho a componente mais importante, por atuar diretamente sobre a potência de corte, é a chamada força de corte ( $F_c$ ). A força de corte é a projeção da força de usinagem sobre a direção de corte, ou seja, no processo de torneamento atua em sentido contrário à velocidade de corte  $c$ .

Matematicamente a força de corte é representada como a multiplicação de uma pressão específica de corte ( $K_s$ ) pela área da seção de corte. Esta área é descrita pela multiplicação do avanço ( $f$ ) pela profundidade de corte ( $A_p$ ). Assim, a força de corte pode ser concebida segundo a Equação 13 (MACHADO et al., 2009).

$$F_c = K_s \cdot A_p \cdot f \quad 13$$

A pressão específica de corte ( $K_s$ ), medida em  $[N/mm^2]$ , é a energia necessária para cortar uma unidade de volume da peça, que é equivalente à potência de corte para remover uma unidade de volume da peça por unidade de tempo (BORGES, 2009).

Diversos são os fatores que influenciam na pressão específica de corte. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2010) a pressão específica de corte pode variar em função do material da peça, do material e geometria da ferramenta, da seção de corte, da velocidade de corte, das condições de lubrificação e refrigeração do processo e do estado de afiação da ferramenta.

Ferraresi (1969) especifica uma formulação geral para o valor de  $K_s$ , obtida através de dados tabelados descritos na ASME para diferentes materiais e diferentes

ferramentas. A formulação segue como exposto na Equação 14.

$$K_s = \frac{C}{f^n} \quad 14$$

Onde as constantes  $C$  e  $n$  dependem do material usinado e da ferramenta de corte. A velocidade e a profundidade de corte também influem na pressão específica, entretanto é somente considerado o avanço pois este é o parâmetro dominante.

## 2.8 Potência de Usinagem

Diversos são os fatores que contribuem para o consumo de energia em processos de usinagem. Em máquinas CNC, mesmo com um melhor rendimento em comparação com máquinas convencionais, há dispositivos periféricos ao processo efetivo como *hardware* do CNC, compressor, bomba (em caso de utilização de fluidos de corte), iluminação e motores secundários que também consomem energia.

Uma máquina-ferramenta gera potência ao girar seu eixo para executar os movimentos de corte e avanço (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010). Desta forma, para simplificar o processo, a potência de usinagem será utilizada como parâmetro base de medição do consumo energético da usinagem.

Há duas potências principais que compõem a potência de usinagem, a potência de corte e a potência de avanço. Devido a dominância da potência de corte e grandeza ínfima da potência de avanço pode-se utilizar somente a potência de corte para definir a potência de usinagem. Stemmer (1993) define a potência de corte sendo “a potência disponível no gume da ferramenta e consumida na operação de remoção de cavacos”. Assim, podemos aproximar a potência de usinagem de acordo com a Equação 15 (FERRARESI, 1969).

$$P_u \cong P_c \cong \frac{F_c \cdot V_c \cdot 735,49}{60 \cdot 75} \cong F_c \cdot V_c \cdot 0,16344 \quad 15$$

Sendo

$P_u$  = Potência de usinagem (W)

$P_c$  = Potência de corte (W)

$F_c$  = Força de corte (N)

$V_c$  = Velocidade de corte (m/min)

Reagrupando os termos das Equações 13, 14 e 15, define-se a potência de corte, como na Equação 16.

$$P_c \cong C \cdot A_p \cdot f^{1-n} \cdot V_c \cdot 0,16344 \quad 16$$

Boothroyd (1988) salienta que a potência de corte pode variar consideravelmente dependendo do material, e é afetada por mudanças na velocidade de corte, avanço, inclinação da ferramenta e assim por diante.

Stemmer (1993) aponta ainda que a potência fornecida pelo motor da máquina difere da potência de corte, e isso ocorre por conta de perdas ocasionadas por atrito nos mancais, engrenagens, sistemas de lubrificação e refrigeração, sistema de avanço entre outros.

Por fim, para definirmos a potência que o motor fornece ao processo deve-se considerar o rendimento da máquina operatriz. Logo, temos a Equação 17.

$$P_m = \frac{P_c}{\eta_m} \quad 17$$

Em que  $P_m$  representa a potência que o motor fornece ao processo (em Watt) e  $\eta_m$  é o rendimento da máquina. Stemmer (1993) propõe uma metodologia para determinar o rendimento da máquina baseada na potência em vazio da máquina e na potência de acionamento. Entretanto Diniz, Marcondes e Coppini (2010) sugerem que, para processos em máquinas CNC, o rendimento da máquina geralmente é maior que 90%, sendo essa uma estimativa suficiente para este estudo.

## 2.9 Avarias e Desgaste na Ferramenta de Corte

No cálculo de custo de produção uma importante parcela a ser considerada é relativa à ferramenta. Em processos de usinagem, as ferramentas de corte estão sempre sujeitas ao desgaste e, por maior que seja a diferença de dureza e resistência entre a ferramenta e a peça usinada, as ferramentas eventualmente terão que ser



substituídas. O custo próprio da ferramenta é responsável apenas por uma pequena fração do valor total, entretanto, a necessidade excessiva de troca exige paradas no processo, o que causa improdutividade e adição de custos. (MACHADO et al., 2009). Por conta disso, a vida da ferramenta é um importante parâmetro a ser considerado quando se busca a otimização da produção.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2010), os principais tipos de desgaste e avarias em ferramentas de corte são: desgaste frontal (ou de flanco), desgaste de cratera, deformação plástica da aresta de corte, lascamento, trincas e quebra.

Rao (2018) explica que os desgastes e avarias ocorrem pois, em processos de usinagem, as ferramentas estão sujeitas a condições severas, como o contato metal com metal, alto gradiente de tensões mecânicas, alto gradiente de temperatura e trabalho sobre metais virgens, os quais podem apresentar dureza elevada, baixa usinabilidade e óxidos. Ainda segundo o autor, os mecanismos de aderência, abrasão, difusão e fadiga foram propostos para explicar o fenômeno de desgaste observado nas ferramentas de corte.

### 2.9.1 Vida da Ferramenta

A vida da ferramenta ( $T_v$ ) geralmente é compreendida como o tempo, em minutos, que a mesma trabalha de forma efetiva, realizando o corte, até atingir algum critério de falha preestabelecido, definindo o fim de sua capacidade útil (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010). Entretanto, outras medidas podem ser utilizadas para mensurar a vida da ferramenta, como o comprimento de corte até a falha, o volume de material removido até a falha, o número de componentes produzidos e a velocidade de corte por um determinado tempo até a falha (RAO, 2018).

Para determinar o fim da vida útil da ferramenta, algum critério deve ser utilizado. Rao (2018) subdivide possíveis critérios de falha baseados no desgaste da ferramenta e nas consequências que a ferramenta pode causar sobre a peça.

Critérios baseado no desgaste da ferramenta:

- a) Estilhaçamento ou rachaduras na aresta de corte;
- b) Tamanho da região de desgaste;
- c) Profundidade, largura da cratera ou outros parâmetros;
- d) Combinação dos efeitos anteriores;

- e) Volume ou peso do material perdido da ferramenta;
- f) Destruição total da ferramenta.

Critérios baseados nas consequências do desgaste sobre peça:

- a) Valor limite do acabamento superficial (rugosidade);
- b) Limite do valor da mudança de dimensão do componente usinado;
- c) Aumento fixo na força ou potência de corte necessária para operação.

### 2.9.2 Cálculo da Vida da Ferramenta

Dentre os fatores que influenciam na vida da ferramenta, a velocidade de corte ( $V_c$ ) se destaca. Com uma baixa velocidade de corte, tem-se uma longa vida do ferramental, mas baixa produtividade. Por outro lado, uma alta velocidade de corte aumenta a produtividade, mas causa desgaste excessivo na ferramenta, causando grandes perdas por parada de processo (RAO, 2018). O engenheiro Frederick Taylor foi pioneiro no estudo de condições ótimas de usinagem, as quais consideram estes fatores, e propôs a Equação 18 para determinar a curva de vida da ferramenta em função da velocidade de corte ( $V_c$ ).

$$V_c \cdot T v^{n_t} = C_t \quad 18$$

Em que  $n_t$  e  $C_t$  são parâmetros dependentes do material da peça, material da ferramenta, área da seção de corte, ângulos da ferramenta e fluido de corte. Quando se estima a velocidade de corte, através da Equação 18, utilizando valores predeterminados de vida da ferramenta, denomina-se *velocidade ótima de corte*. Por outro lado, caso a vida for calculada considerando questões econômicas, a velocidade de corte nomeia-se *velocidade econômica de corte* (FERRARESI, 1969).

As formulações mais recentes da velocidade de corte consideram a influência da forma da seção de corte, relacionando com o avanço ( $f$ ) e com a profundidade de corte ( $A_p$ ). A Equação 19 foi proposta por diversos pesquisadores para considerar esta relação (FERRARESI, 1969).

$$V_c = \frac{C'}{A_p^{m_f} \cdot f^{n_f}} \quad 19$$

Onde  $C'$  representa a velocidade de corte para um avanço  $A_p = 1 \text{ mm/rot}$  e uma profundidade de corte  $f = 1 \text{ mm}$  para uma vida ( $T_v$ ) seguindo algum critério de desgaste. Os valores de  $n_f$  e  $m_f$  são constantes relativas ao material usinado.

Kronenberg (1954) compilou informações, reagrupou os termos e escreveu a Equação 19 em função do índice de esbeltez ( $G$ ) e da área da seção de corte ( $S$ ), originando a Equação 20.

$$V_c = \frac{C_o \cdot \left(\frac{G}{5}\right)^g}{S^{f_v} \cdot \left(\frac{T_v}{60}\right)^y} \quad 20$$

Onde o índice de esbeltez  $G = A_p/f$  e a área da seção de corte  $S = A_p \cdot f$ . Os valores de  $y$ ,  $g$  e  $f_v$  são constante dependentes de diversos fatores inerentes ao processo. Já a constante  $C_o$  é a velocidade de corte para uma vida  $T_v = 60 \text{ min}$ ,  $S = 1 \text{ mm}^2$  e  $G/5 = 1$  seguindo algum critério de desgaste da ferramenta.

## 2.10 Qualidade Superficial

A qualidade superficial, além de estética, no contexto de projetos mecânicos apresenta uma grande importância. Essa preocupação se fundamenta na hipótese de que as peças geralmente são submetidas a uma série de solicitações, as quais são fortemente influenciadas pela qualidade da superfície. Segundo Amorin (2003), a qualidade superficial se justifica pela sua relação com fatores como:

- Precisão e tolerâncias – Importância significativa, principalmente em peças de conjunto furo e eixo que estejam submetidos a movimentos relativos. Uma má qualidade superficial fará com que as peças sofram desgastes mais intensos, perdendo as características funcionais estabelecidas para o conjunto.
- Resistência a corrosão – Peças com uma pobre qualidade superficial são mais suscetíveis a corrosão devido a tendência de acúmulo de quantidades maiores de líquidos e vapores do que em superfícies bem acabadas.
- Resistência a fadiga – Uma qualidade superficial grosseira, em peças que

operam sob solicitações dinâmicas, propicia na geometria a concentração de tensões e nucleação de trincas, que podem levar à fadiga do material.

- Escoamento de fluidos – Superfícies bem acabadas permitem escoamentos laminares a maiores velocidades, reduzindo a turbulência e a perda de carga em tubulações. Um bom acabamento também propicia uma vedação mais eficiente em casos de elementos que atuam como retentores, promovendo uma melhor estanqueidade do elemento.
- Lubrificação – A lubrificação pode ser ineficaz caso haja crateras rugosas maiores que a película de lubrificante, ocasionando o contato direto entre as partes metálicas.
- Transmissão de calor – Uma boa qualidade superficial propicia uma maior área de contato entre duas superfícies, aumentando o coeficiente de transmissão de calor.

Em usinagem, Ferraresi (1969) afirma que “a qualidade superficial das peças é caracterizada pelo acabamento obtido na usinagem e pelas propriedades físicas e mecânicas do metal na camada superficial”. Ainda segundo o autor, tais propriedades se modificam no processo por ação de fatores como:

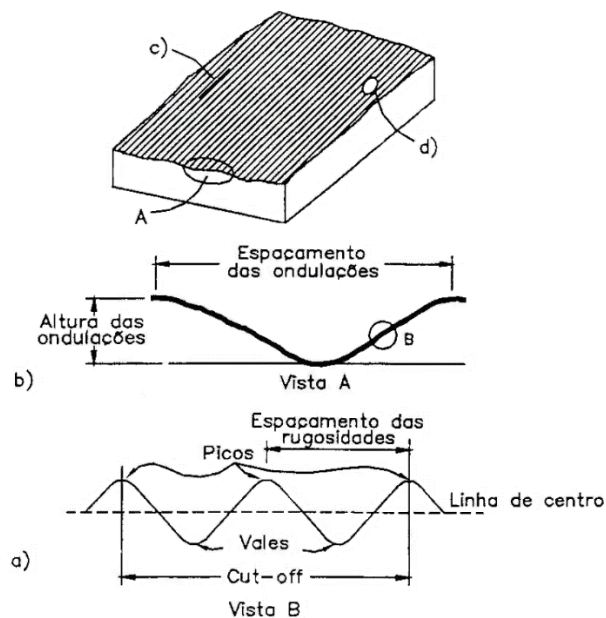
- Pressão da ferramenta sobre a peça;
- Atrito da superfície ferramenta-peça;
- Atrito interno do material, em regime de deformação plástica;
- Calor gerado durante o processo;
- Fenômenos da formação de cavaco;
- Vibração da ferramenta e/ou da máquina.

De acordo com Machado et al. (2009) e Amorin (2003), em usinagem, o acabamento superficial é a combinação de fatores que podem ser divididos em ondulações, falhas e rugosidade. Ainda segundo os autores, as ondulações são irregularidades na superfície ou erros de geometria, em que os espaçamentos são maiores que das irregularidades consideradas rugosidades, e podem ser causadas por vibrações e flexões da ferramenta e/ou da peça. Já as falhas são descontinuidades indesejáveis, inesperadas e não intencionais na superfície da peça, e podem ser causadas por defeitos como inclusões, trincas, bolhas, ou defeitos causados pelo processo de corte. Amorin (2003) também cita a subdivisão denominada “marcas de

avanço” para a qualidade superficial em usinagem, a qual determina a direção predominante das imperfeições na superfície da peça, e depende, principalmente, dos parâmetros de corte. Por fim, Amorin (2003) descreve a rugosidade como sendo finas irregularidades que se relacionam ao processo de fabricação e são mensuradas em um percurso determinado denominado comprimento de amostragem ou *cut-off*.

A Figura 4 demonstra, de maneira simplificada, as divisões que compõem o entendimento da qualidade superficial de uma peça usinada.

Figura 4 - Qualidade de superfície. a) rugosidades; b) ondulações; c) direção das irregularidades; d) falhas.



Fonte: (MACHADO et al., 2009).

Em processos de usinagem, a divisão que mais se relaciona com os parâmetros de corte é a rugosidade, e esta muitas vezes determina se um componente tem a qualidade superficial adequada para realizar a função para o qual foi projetado.

Ferraresi (1969) aponta que, na usinagem, a rugosidade pode ser afetada diretamente pelos parâmetros de avanço e velocidade de corte, bem como pelos ângulos e pelo raio de curvatura da ponta da ferramenta, o tipo de processo, a utilização de fluidos de corte e a vibração resultado do processo de usinagem.

### 2.10.1 Rugosidade

A rugosidade é um erro microgeométrico que, no processo de usinagem, é função do tipo de acabamento, das propriedades de corte, da máquina e/ou da ferramenta (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977). Segundo Perreira (2006), a rugosidade se caracteriza pela sua forma de medição. No Brasil, adotou-se, através da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, o sistema de medição por “Linha Média”. Neste sistema, é tomado como base uma linha imaginária traçada entre a média dos picos e vales das irregularidades e se direciona paralelamente à direção geral do perfil e localizada dentro do comprimento de amostragem.

Agostinho, Rodrigues e Lirani (1977) apontam que os sistemas baseados na linha média são divididos em três classes:

- Baseados na medida da profundidade da rugosidade;
- Baseados em medidas horizontais;
- Baseados em medidas proporcionais.

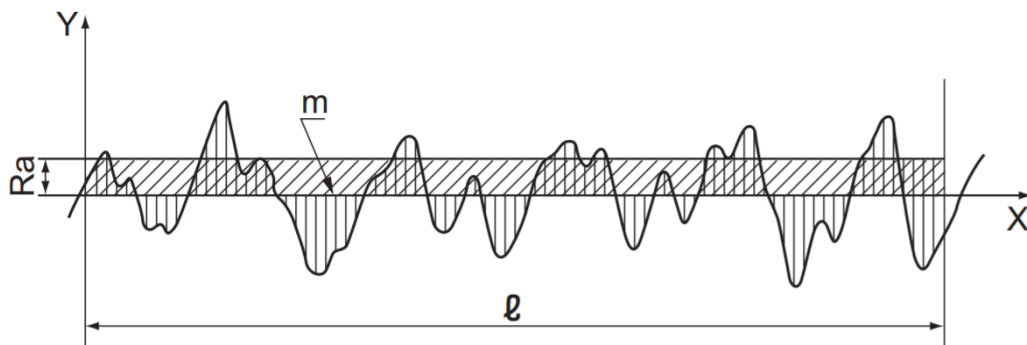
Neste trabalho somente será especificado um método baseado na medida da profundidade da rugosidade. Mesmo possuindo diferentes formas para medição da rugosidade, neste trabalho somente o Desvio Médio Aritmético ( $Ra$ ) foi considerado.

#### 2.10.1.1 Desvio médio aritmético ( $Ra$ )

O desvio médio aritmético, ou somente rugosidade média, é a medida de rugosidade mais utilizada em todo o mundo e é aplicável em diversos processos de fabricação. De acordo com Perreira (2006) e Hammes, Rosa e Walker (2017) o parâmetro  $Ra$  é a média aritmética dos valores absolutos das medidas dos picos e reentrâncias do perfil avaliado em relação à linha média, medido dentro de um comprimento de amostragem.

O valor de  $Ra$  também pode ser representado como sendo a altura de um retângulo, com o comprimento do *cut-off* de base, e de área igual à área limitada pelo perfil de rugosidade e a linha média. Esta situação pode ser visualizada na Figura 5.

Figura 5 - Desvio médio aritmético Ra.



Fonte: (JIS, 2001)

Desta forma, a norma NBR ISO 4287:2002 descreve o  $Ra$  matematicamente de acordo com a Equação 21.

$$Ra = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |Y(x)| dx \quad 21$$

Para determinar a rugosidade superficial teórica, Machado et al. (2009) e Diniz (1989) sugerem uma formulação com base nos parâmetros de avanço e raio de ponta da ferramenta, que matematicamente seguem a Equação 22.

$$Ra \cong \frac{f^2}{31,2 \cdot r} \quad 22$$

A Equação 22 é válida somente se o avanço  $f$  for maior que o raio de ponta  $r$ . É importante salientar que esta formulação é somente um indicativo, pois a rugosidade superficial também depende de diversos outros fatores já mencionados anteriormente.

Por ser um dos parâmetros mais utilizados na indústria, diversos são os métodos estudados para estimar este fator com base nos parâmetros de usinagem. Patel e Gandhi (2019) desenvolveu um modelo com base no efeito simultâneo da variação de parâmetros de avanço, velocidade de corte e raio de ponta da ferramenta, mantendo a profundidade de corte constante. A validação de seu modelo foi dada através da experimentação na usinagem de uma peça de aço AISI D2 com ferramenta

CBN (nitreto de boro cúbico) e concluiu-se que o avanço é o parâmetro que mais afeta na rugosidade Ra. Ferraresi (1969) apresenta uma metodologia, proposta pela *General Electric Co.*, que relaciona, através de um ábaco, a velocidade de corte, o avanço, o material usinado e o raio de ponta da ferramenta, para determinar a rugosidade teórica. Mas o autor afirma que os valores obtidos só devem ser considerados como valores médios aproximados, pois há diversos outros fatores que podem influenciar no valor de rugosidade final. O trabalho de Asiltürk e Akkuş (2011) se concentra na otimização dos parâmetros de corte, em operações de torneamento, utilizando o método Taguchi para minimizar a rugosidade superficial. Seus experimentos se basearam na usinagem a seco do aço AISI 4140 com ferramentas de metal duro, e os resultados indicaram que o avanço é o parâmetro mais influente sobre a rugosidade Ra.

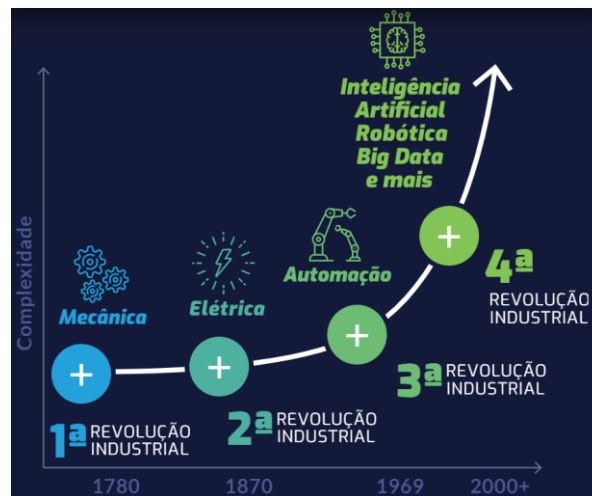
## **2.11 Indústria 4.0**

A terceira revolução industrial, ou revolução informacional, introduziu maior produtividade com auxílio da tecnologia e está, mais do que nunca, difundida nos processos de produção e nos meios em que vivemos. Entretanto, pode-se afirmar que o mundo converge para a quarta revolução industrial, chamada de indústria 4.0, a qual afetará significativamente, de modo positivo, os meios de produção que conhecemos.

As três revoluções industriais ofereceram subsídios para a produção em massa e as linhas de produção, também trouxeram a energia elétrica e propiciaram o avanço tecnológico da informação, que hoje permite a globalização econômica. A quarta revolução industrial tem perspectiva de crescimento exponencial, como ilustrado na Figura 6, e será embasada na união do mundo físico, digital e biológico, com tecnologias como: Manufatura Aditiva, Inteligência Artificial (IA), Internet das Coisas (IoT), Biologia Sintética e os Sistemas Ciber-Físicos, buscando processos mais fáceis, eficientes e otimizados para diminuir os desperdícios e maximizar os lucros (AGENDA... 2020).



Figura 6 - Perspectiva para Indústria 4.0.



Fonte: (AGENDA... 2020).

Santos et al. (2018) aponta que a Indústria 4.0 utiliza um conjunto de tecnologias, com estruturas de produção dotadas de dispositivos “inteligentes” ligados à internet, possibilitando a comunicação dos produtos e processos produtivos, assim criando as chamadas *Smart Factories* (Fábricas Inteligentes), as quais buscam tornar os meios de produção mais flexíveis e colaborativos, buscando atender as exigências do mercado.

No contexto das *Smart Factories*, Kamarul Bahrin et al. (2016) indica que, com o intuito de melhorar a eficiência de custo e a qualidade dos bens ou serviços, as máquinas são dotadas de inteligência artificial e utilizam sistemas que permitem a auto otimização e a autoconfiguração.

Através da produção inteligente, subsidiada pela Indústria 4.0, será possível uma maior economia energética e operacional, uma vez que as máquinas apresentarão maior autonomia no controle e nas tomadas de decisões, buscando computacionalmente, através de sensores, da comunicação entre máquinas e de banco de dados, parâmetros otimizados e eficientes para a produção, diminuindo o consumo desnecessário de energia e minimizando a necessidade de controle externo.

Neste contexto, diversos são os estudos visando tecnologias para possibilitar a implantação da Indústria 4.0 em sistemas de manufatura já existentes. Como exemplo, cita-se o trabalho de Oliveira e Álvares (2018), o qual desenvolveu um sistema para o monitoramento e tele operação de máquinas CNC via internet, o qual foi validado experimentalmente utilizando um CNC Fanuc 18i-Ta, e caracterizou-se como sendo uma aplicação multiplataforma.

Por fim, o desenvolvimento de sistemas inteligentes agregados aos meios de produção se demonstra de extrema importância na implantação da Indústria 4.0. Os algoritmos computacionais, a inteligência artificial (IA) e a internet das coisas (IoT) são o futuro dos sistemas de usinagem modernos, gerando a chamada usinagem 4.0.

## 2.12 Algoritmos para Otimização da Produção

Aliado ao crescimento exponencial da produção, esperado pela Indústria 4.0, está a procura por novas tecnologias e o aprimoramento das existentes, para subsidiar a evolução até a quarta revolução industrial. Um dos focos de pesquisa dos últimos anos, que vem de encontro com esta proposta, é a utilização de algoritmos computacionais para resolver de maneira mais eficiente problemas relacionados a otimização da produção.

A palavra algoritmo, dentro da informática, pode ser definida como um conjunto de regras e operações lógicas que resultam em uma sequência de operações finitas destinadas à resolução de um problema. Cormen et al. (2009) aponta que, informalmente, algoritmo é qualquer procedimento computacional bem definido que leva algum valor de entrada e produz algum valor como saída.

Diversas são as aplicações de algoritmos computacionais dentro da manufatura, seja ele de maneira individual ou embutido em algum software. Como exemplos básicos da aplicação de algoritmos computacionais na indústria pode-se citar a programação CNC, os softwares que comandam os centros de usinagem, os softwares de controladores em sistemas de aquisição de dados por sensores, o Controlador Lógico Programável (CLP), entre outros.

Nesta linha de pensamento e com a necessidade de sistemas de produção mais eficientes, vários pesquisadores estudam e desenvolvem diferentes algoritmos computacionais objetivando otimizar os meios de produção.

Li et al. (2011) desenvolveu um algoritmo de Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*), baseado em uma analogia com a termodinâmica, para resolver problemas de planejamento de produção em máquinas paralelas idênticas, o qual busca a diminuição do *makespan*. Em seu estudo os tempos de processamento são controláveis com um consumo limitado de recursos e são consideradas máquinas críticas e não críticas.

Ji, Wang e Lee (2013) desenvolveu um algoritmo, denominado Otimização por

Enxame de Partículas - PSO (*particle swarm optimization*), e uma heurística para resolver um problema de planejamento de produção de máquinas paralelas visando a minimização do consumo total de recursos, como a emissão de carbono, consumo de água e uso de eletricidade, com um limite de produção.

Jia et al. (2017) propõem um algoritmo de otimização inspirado na movimentação de formigas baseado em Pareto (*Pareto-based ant colony optimization* - PACO) para resolver simultaneamente um problema de dois critérios, diminuição do *makespan* e minimização do consumo energético, em um conjunto de máquinas idênticas trabalhando paralelamente.

Por fim, algoritmos genéticos, baseados na evolução e cruzamento genético, apresentam bons resultados no trabalho de Rocha, Ramos e Vale (1999), o qual utiliza este tipo de rotina para planejar o sequenciamento das operações, selecionar máquinas e ferramentas, no intuito de otimizar alguns critérios (como o tempo de fabricação por exemplo).

Neste trabalho, o algoritmo selecionado para a escolha dos parâmetros de corte, visando a otimização dos processos de usinagem, será o algoritmo genético.

### 2.12.1 Algoritmos Genéticos

O estudo dos algoritmos genéticos iniciou na década de 70 quando o professor John Holland desenvolveu pesquisas sobre os processos adaptativos dos sistemas naturais. Seu estudo buscou verificar como estes sistemas poderiam ser incorporados em algoritmos para a resolução automática de problemas (GOLDBERG, 1989). Algoritmos genéticos são definidos por Olivieri (2004) como “procedimentos de otimização e busca global, fundamentados nos mecanismos de seleção e evolução natural das espécies (Teoria de Darwin)”

Para Holland (1975), a solução de um problema é entendida como um indivíduo inserido em uma população, desta forma, cada indivíduo corresponde a um conjunto de soluções para o problema e é representado pelo seu genótipo, ou seja, pelos seus cromossomos, que são por sua vez compostos por um conjunto de características denominadas genes.

Melo (2008) define o cromossomo como sendo “uma unidade de código genético, responsável pelo aparecimento de determinadas características em um indivíduo” e afirma que cada cromossomo representa uma solução característica para

o problema. O autor ainda define gene como “uma unidade genética que compõem a cadeia cromossômica”, e aponta que cada gene pode ter diferentes valores.

A ideia de maneira geral é, partindo de uma população inicial, gerar novas populações de cromossomos com características genéticas melhores que as de seus antepassados. Esta base é associada a solução de um problema em que, contendo um conjunto de soluções, novas soluções superiores são geradas, baseando-se em critérios preestabelecidos (TSURUTA; NARCISO, 2000).

Durante o processo evolutivo a população é avaliada, seguindo um ou mais critérios, de acordo com seu grau de “aptidão” à resolução da solução esperada. Cromossomos mais aptos, de modo geral, são os selecionados e os de menor aptidão descartados. Então os membros selecionados podem gerar novos descendentes por meio de operadores de *crossover* (cruzamento) e mutações. Este processo é iterativo e se repete até que uma solução que satisfaça os critérios preestabelecidos seja encontrada (LACERDA; CARVALHO, 1999).

Melo (2008) define o termo *crossover* como sendo a “combinação dos cromossomos envolvendo troca de material genético e geração de características intermediárias”, o autor ainda define o operador de mutação como “alteração aleatória ou acidental do material genético”.

De maneira prática o *crossover* é feito a cada iteração do algoritmo e é responsável por formar a geração seguinte de indivíduos (soluções). O operador de mutação é responsável por inserir novos genes, não presentes na população inicial, ou então trazer de volta genes descartados, para serem testados dentro de uma nova combinação.

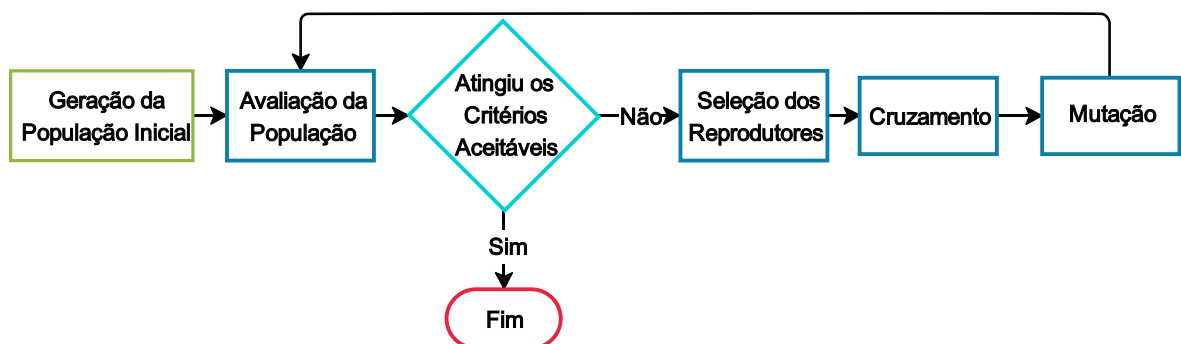
Mitchell (1998) exemplifica um algoritmo genético simples seguindo os seguintes passos:

- a. Geração aleatória de uma população inicial de cromossomos, candidatos a solução do problema.
- b. Avaliação da aptidão de cada cromossomo da população.
- c. Seleção dos melhores indivíduos como progenitores e aplicação da operação de *crossover*.
- d. Aplicação da operação de mutação na nova geração (esta operação tem uma probabilidade predefinida de acontecer ou não).
- e. Inserção da nova geração na população.
- f. Retorno ao passo 2.

Na proposta de Mitchell (1998) a “avaliação” é entendida como o cálculo de aptidão dos indivíduos e a comparação com os critérios de parada estabelecidos para o algoritmo, ou seja, se a aptidão do cromossomo estiver de acordo com a mínima esperada para a solução do problema o algoritmo cessará.

De uma forma geral os algoritmos genéticos funcionam de acordo com o fluxograma simplificado apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma de funcionamento dos algoritmos genéticos.



Fonte: Do autor (2020).

Olivieri (2004) ainda apresenta um pseudocódigo para representar um algoritmo genético simples, o qual é exposto na sequência:

#### **Algoritmo Genético Simples**

Inicialize a população

Avalie indivíduos da população

#### **Repita**

    Selecione indivíduos para reprodução

    Aplique operadores de recombinação e mutação

    Avalie indivíduos da população

    Selecione indivíduos mais adaptados

**Até** critério de parada satisfeito

**Fim**

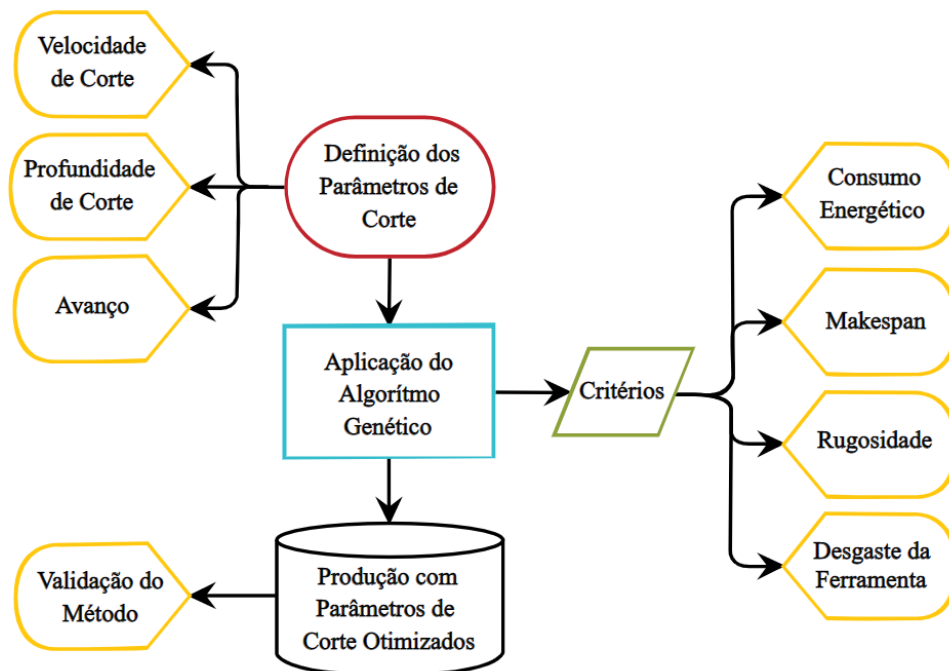
Ainda segundo Olivieri (2004), algumas variações do algoritmo apresentado podem ser encontradas na literatura, como o Algoritmo Genético Geracional e o Algoritmo Genético em Regime, os quais não serão detalhados neste estudo.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

No presente trabalho foi utilizada uma abordagem de pesquisa experimental, realizada por meio digital e validada laboratorialmente, buscando resultados quantitativos e otimizados de parâmetros de corte para usinagem de peças em centros de torneamento com Comando Numérico Computadorizado (CNC).

Para que os objetivos propostos fossem obtidos com êxito, foi utilizada uma abordagem com ações sequenciais, ilustrada de maneira simplificada no fluxograma apresentado pela Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma da metodologia utilizada



Fonte: Do autor (2020)

Em primeiro momento foram atribuídos uma faixa de valores de parâmetros de usinagem como velocidade de corte ( $V_c$ ), profundidade de corte ( $A_p$ ) e avanço ( $f$ ), para utilização em forma de *input* em um algoritmo genético. Estes parâmetros foram combinados de diferentes maneiras, de modo a gerar diferentes características de usinagem, buscando sempre a otimização dos parâmetros. O algoritmo genético organiza, seleciona e fornece os parâmetros de corte otimizados com base em critérios estimados analiticamente, de consumo energético, qualidade superficial, *makespan* e desgaste da ferramenta. Estes critérios são avaliados e selecionados

pelo algoritmo com diferentes prioridades, buscando resultados otimizados de acordo com as necessidades do usuário.

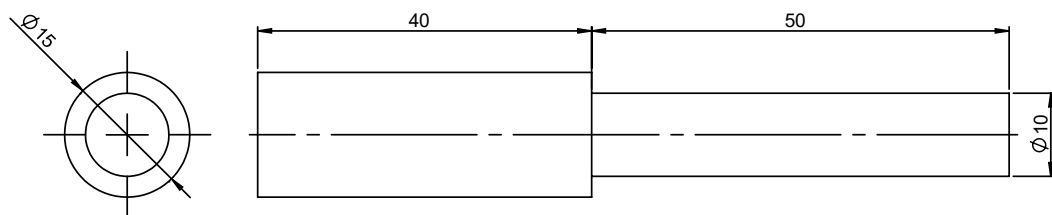
Os parâmetros de corte otimizados, fornecidos pelo algoritmo, foram utilizados para a validação do método em usinagens utilizando um torno mecânico CNC, e seu desempenho foi comparado com o desempenho da melhor combinação da primeira geração do algoritmo genético.

Em cada usinagem foram tomados valores reais do consumo energético e do *makespan* do processo, bem como medidas da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) para verificar a qualidade superficial da peça usinada. Estes valores serviram como parâmetro para a validação do método proposto. O desgaste da ferramenta não foi avaliado experimentalmente.

### 3.1 Escolha da geometria

A aplicação do algoritmo genético, bem como os testes de usinagem foram efetuados considerando uma geometria padrão de peça. Todos os testes foram realizados utilizando como matéria prima cilindros brutos com aproximadamente 16 mm de diâmetro e 90 mm de comprimento, os quais foram previamente usinados para padronizar o material, removendo impurezas e normalizando a superfície, deixando todos com 15 mm de diâmetro. A geometria final esperada para cada peça segue as dimensões apresentadas na Figura 9.

Figura 9 - Dimensões do Corpo de Provas



Fonte: Do autor (2020).

Sendo 50 mm o comprimento efetivamente usinado ( $l_f$ ) e 40 mm para a fixação da peça na máquina. As operações de corte foram realizadas em apenas 5 mm de profundidade, sendo esta dimensão compreendida entre 15 mm e 10 mm do diâmetro peça.

Esta geometria foi escolhida devido à baixa complexidade para as operações

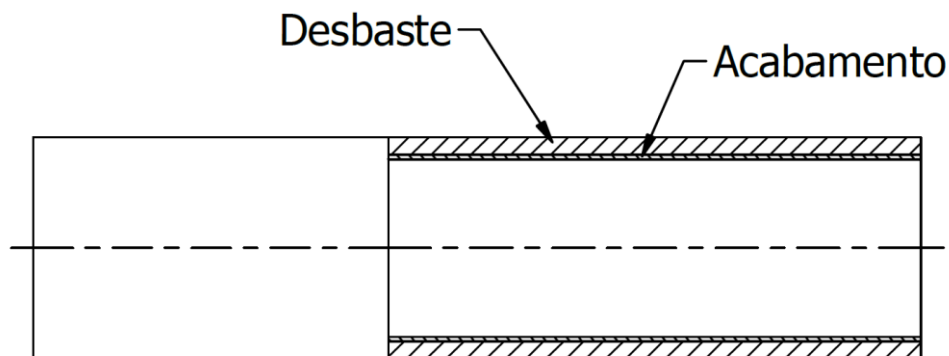
de usinagem e por apresentar áreas suficientemente alongadas, de diâmetro constante, que permitem a fácil leitura da rugosidade superficial com o equipamento disponível.

As dimensões de comprimento foram selecionadas para assegurar um comprimento longo o suficiente para realização das medições de rugosidade e para a fixação da peça na máquina, mas também curto o suficiente para evitar vibrações excessivas, dispensando a utilização de ponta rotativa. O diâmetro da peça foi escolhido considerando a disponibilidade de material para o estudo.

### 3.2 Operações Experimentais

Para obtenção da geometria esperada, apresentada pela Figura 9, e para avaliação dos critérios estudados, foi necessária uma operação de desbaste lateral e outra de acabamento superficial, como representado na Figura 10.

Figura 10 - Operações de usinagem.



Fonte: Do autor (2020).

A operação de desbaste é realizada em diversos passes da ferramenta, sendo o número de passes estipulado de acordo com os parâmetros de corte selecionados. Já o acabamento, feito após o desbaste, é realizado em apenas um passe, com a profundidade de corte definida pelo sobre metal deixado pela operação de desbaste.

Para todas as usinagens a mesma rotina de programação CNC foi utilizada, variando somente os parâmetros de corte em cada configuração. O código CNC utilizado para as usinagens experimentais se encontra disponível no Apêndice C.

Todas as operações de usinagem foram realizadas a seco, ou seja, não foram utilizados fluidos corte ou lubrificantes sólidos.



### 3.3 Algoritmo Genético Aplicado

Para realização deste estudo utilizou-se um algoritmo genético simples, desenvolvido em parceria com o Instituto Superior de Engenharia do Porto – ISEP, sendo este adaptado para atender os requisitos esperados neste trabalho.

O programa foi elaborado em linguagem Python, sem utilização de bibliotecas, onde primeiramente foi desenvolvido uma Interface de Programação de Aplicação - API (*Application Programming Interface*) de Transferência Representacional de Estado - REST (*Representational State Transfer*) que envia e recebe pedidos de Protocolo de Transferência de Hipertexto - HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) através de um método POST de ficheiros do tipo JSON (*JavaScript Object Notation*). Esta API atua como intermediador entre o solicitante e o algoritmo genético.

A base do algoritmo genético é constituída principalmente pelos conceitos de operação, ferramenta, tarefa, configuração e plano escalonado de corte. A operação representa uma atividade de corte, como “Desbaste” e “Acabamento”. A ferramenta é representada pela própria ferramenta de corte, utilizada em operações de usinagem. A tarefa engloba todo o procedimento de corte de uma peça, possuindo uma ordem de execução, a operação a realizar, a ferramenta a utilizar, o diâmetro da peça em cada operação e o percurso de avanço, dados utilizados como *input* no algoritmo. O sistema de escalonamento de corte possibilita a configuração dos critérios de parada, os pesos e os parâmetros de otimização. O plano escalonado de corte representa o melhor planejamento de corte encontrado pelo algoritmo genético, o qual apresenta uma lista de tarefas contendo a operação, a ferramenta e os parâmetros de corte que melhor correspondem aos pesos predefinidos.

#### 3.3.1 Parâmetros de Entrada

Para aplicação do algoritmo genético é necessário o fornecimento, como *input*, de uma faixa de valores reais de três parâmetros de corte, são eles: velocidade de corte ( $V_c$ ), profundidade de corte ( $A_p$ ) e avanço ( $f$ ). Estas são as variáveis básicas necessárias para compor uma programação de usinagem CNC e serão os valores de *output* do algoritmo. Também é necessário informar ao algoritmo o valor do percurso de avanço ( $lf$ ), do raio de ponta da ferramenta de corte ( $r$ ) e dos diâmetros ( $D$ ) de

cada operação de usinagem.

A faixa de valores de entrada fornecidos para aplicação do algoritmo genético estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados de entrada para operação.

<b>Variável</b>	<b>Desbaste (<i>d</i>)</b>	<b>Acabamento (<i>a</i>)</b>
<i>V<sub>c</sub></i> (m/min)	50 – 175	50 – 175
<i>f</i> (mm/rev)	0,1 – 0,5	0,01 – 0,5
<i>A<sub>p</sub></i> (mm)	1 – 3	0,05 – 1
<i>l<sub>f</sub></i> (mm)	50	50
<i>r</i> (mm)	0,8	0,8
<i>D</i> (mm)	15	10

Fonte: Do autor.

As faixas de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte foram definidos com base em valores recomendados pelo fabricante da ferramenta de corte, nas características de usinabilidade do material e nas limitações da máquina ferramenta utilizada. O valor do raio de ponta depende diretamente da ferramenta.

A primeira tarefa do algoritmo genético é a geração da população inicial, a qual é composta por um número predefinido de indivíduos, onde cada indivíduo representa uma configuração de diferentes parâmetros de corte. A Tabela 2 apresenta uma lista com exemplos de três indivíduos distintos I1, I2 e I3.

Tabela 2 - Exemplo de Indivíduos.

<b>Indivíduo</b>	<b>I1</b>		<b>I2</b>		<b>I3</b>	
<b>Operação</b>	Desb.	Aca.	Desb.	Aca.	Desb.	Aca.
<i>V<sub>c</sub></i>	55,3	82,19	120,43	162,74	87,02	110,51
<i>A<sub>p</sub></i>	1,36	0,86	2,74	0,07	1,65	0,87
<i>f</i>	0,28	0,36	0,47	0,08	0,14	0,24

Fonte: Do autor (2020).

A população inicial é gerada pelo algoritmo aleatoriamente, respeitando uma faixa de valores previamente estabelecida para os parâmetros de corte. O tamanho de cada população também é predefinido, sendo neste trabalho utilizado um valor de

10 indivíduos por população.

Além dos parâmetros de operação, também é necessário o *input* das constantes ( $C$ ) e ( $n$ ) do material, relativas à pressão específica de corte para as condições de usinagem utilizadas, e das constantes ( $C_o$ ), ( $g$ ), ( $f_v$ ) e ( $y$ ), advindas da equação de vida da ferramenta de Taylor. Os valores utilizados para estas constantes são originários da ASME, para aço SAE 1020 usinado com ferramenta de metal duro, e seus valores são expostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Entrada para pressão específica de corte e vida da ferramenta.

Variável	Valor
$C$	182
$n$	0,2
$C_o$	197,75
$g$	0,22
$f_v$	0,41
$y$	0,15

Fonte: Adaptado de (FERRARESI, 1969).

O Apêndice A apresenta o código de entrada do algoritmo genético para esta aplicação, com os devidos valores utilizados para este trabalho.

### 3.3.2 Evolução das Gerações

Uma nova geração é formada a partir de operações de cruzamento e mutação, sendo posteriormente os melhores indivíduos selecionados por meio de testes de aptidão.

A operação de cruzamento é responsável por combinar características de velocidade de corte, profundidade de corte e avanço das operações de dois indivíduos, escolhidos aleatoriamente.

A partir da população obtida por meio do cruzamento é aplicada a operação de mutação. Nesta etapa, cada indivíduo passa pelo processo e o algoritmo decide, com base na porcentagem predefinida, se vai ou não aplicar a mutação em algum parâmetro de corte. Em caso positivo um novo valor aleatório é atribuído a este parâmetro. Para este trabalho foi estipulado uma chance de 20% de ocorrer a mutação

em um dado indivíduo.

A próxima etapa é a de seleção, onde será concebida a geração seguinte. A seleção inicia com a união da população nova e antiga, onde filtram-se os indivíduos repetidos e os avaliam através de testes de aptidão. Por fim, é feita a escolha dos “n” melhores indivíduos de ambas as populações, sendo os restantes selecionados por meio de torneios não elitistas entre pares de indivíduos aleatórios, onde o mais apto é o escolhido.

A aptidão dos indivíduos é calculada analiticamente seguindo a formulação proposta na Equação 23, a combinação de parâmetros, que tiver o maior valor de aptidão, será intitulada como melhor indivíduo e terá maior chance de ser escolhido como progenitor para a próxima geração.

$$Aptidão = k1 \cdot C1 \cdot \frac{1}{Ce} + k2 \cdot C2 \cdot \frac{1}{Tc_t} + k3 \cdot C3 \cdot \frac{1}{Ra} + k4 \cdot C4 \cdot \frac{1}{Dt_v} \quad 23$$

Em que

$Ce$  = Consumo Energético (Wh)

$Tc_t$  = Tempo total de corte (min)

$Ra$  = Rugosidade média aritmética (mm)

$Dt_v$  = Dano Total na Ferramenta (min)

Os valores de  $k$  são constantes de prioridade que definem o peso que cada critério terá na soma total, e a soma destas constantes deve igualar-se a 1. Já os valores de  $C$  são constantes de normalização, que tem a função de balancear o sistema, uma vez que os critérios apresentam grandezas diferentes. Os valores utilizados neste estudo para a constante  $k$  estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Constantes k.

Índice	$k$
1	0,3
2	0,3
3	0,1
4	0,3

Fonte: Do autor (2020).

Os valores de  $(Ce)$ ,  $(Tc_t)$ ,  $(Ra)$  e  $(Dt_v)$  são inversamente proporcionais ao valor de aptidão, isso acontece pois quanto menor o consumo energético, o *makespan*, a rugosidade e o dano na ferramenta melhor será a configuração de parâmetros do indivíduo e mais apto ele está de ser a solução ideal do problema.

### 3.3.2.1 Formulação dos Critérios de Aptidão

A determinação dos valores de *makespan*, consumo energético, rugosidade e danos na ferramenta de cada cromossomo são feitas analiticamente e calculados pelo algoritmo. Para definir a formulação de cada um dos critérios, para o caso específico deste estudo, algumas considerações foram realizadas.

Quando referido a operação de desbaste o sub escrito “*d*” será utilizado, para operação de acabamento será utilizado o sub escrito “*a*”.

As características de desbaste serão aplicadas em todos os passes até a obtenção do diâmetro final esperado. O diâmetro inicial de usinagem é o de desbaste ( $D_d$ ) e o final o de acabamento ( $D_a$ ), indicados por  $D$  na Tabela 1.

A profundidade de corte do acabamento ( $Ap_a$ ) é considerada sobremetal, e deve ser prevista no diâmetro usinado pela operação de desbaste. Desta forma o diâmetro usinado no desbaste é dado por  $D_d - (D_a + 2 \cdot Ap_a)$ .

O acabamento será efetuado em apenas um passe. Para a operação de desbaste, o número de passes ( $np$ ) é função do diâmetro usinado e da profundidade de corte ( $Ap_d$ ), e segue a Equação 24.

$$np = \frac{D_d - (D_a + 2 \cdot Ap_a)}{2 \cdot Ap_d} \quad 24$$

O resultado da Equação 24 deve ser um número inteiro, caso não seja, deve ser arredondado para cima, então será designado por  $np_a$ . Caso a Equação 24 forneça um valor não inteiro, a profundidade de corte final será diferente das demais para compensar a diferença de diâmetro. O valor da profundidade de corte inicial de desbaste ( $Ap_{df}$ ) pode ser encontrado pela Equação 25.

$$Ap_{df} = Ap_d \cdot [1 - (np_a - np)] \quad 25$$

O cálculo do consumo energético será baseado na potência fornecida pelo motor da máquina ( $P_m$ ), e como visto na Equação 17, a potência do motor é a razão entre a potência de corte ( $P_c$ ) e o rendimento do motor ( $\eta_m$ ). Para este caso, a potência total de corte pode ser calculada como a soma da potência de desgaste ( $P_{c_d}$ ) com a potência de acabamento ( $P_{c_a}$ ), assim tem-se a Equação 26.

$$P_m \cong \frac{P_c}{\eta_m} \cong P_{c_d} + P_{c_a} \quad 26$$

A potência de desgaste ( $P_{c_d}$ ) será considerada como a potência média de toda a operação e segue como uma pequena modificação da Equação 16, para considerar o número de passes necessários para execução da operação e o rendimento do motor. Assim, tem-se a Equação 27.

$$P_{c_d} \cong [(np_a - 1) \cdot Ap_d + Ap_{df}] \cdot \frac{0,16344 \cdot C \cdot V_{c_d} \cdot f_d^{(1-n)}}{np_a \cdot \eta_m} \quad 27$$

Já a potência de acabamento ( $P_{c_a}$ ) pode ser calculada aplicando os valores referentes ao acabamento, com uma pequena variação da Equação 16, que considerando o rendimento do motor, como apresentado na Equação 28.

$$P_{c_a} \cong \frac{0,16344 \cdot C \cdot Ap_a \cdot V_{c_a} \cdot f_a^{(1-n)}}{\eta_m} \quad 28$$

Agrupando as Equações 26, 27 e 28, tem-se a potência utilizada pelo motor para realização de todas as operações de corte, como apresentado na Equação 29.

$$P_m \cong \frac{0,16344 \cdot C}{\eta_m} \cdot \left\{ [(np_a - 1) \cdot Ap_d + Ap_{df}] \cdot \frac{V_{c_d} \cdot f_d^{(1-n)}}{np_a} + Ap_a \cdot V_{c_a} \cdot f_a^{(1-n)} \right\} \quad 29$$

Para rendimento do motor ( $\eta_m$ ) será considerado um valor aproximado de 0,9, considerando um rendimento médio de 90% para máquinas CNC (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010).

Analogamente à potência de corte, o tempo total de fabricação ( $T_{c_t}$ ) será a soma do tempo da operação de desbaste ( $T_{c_d}$ ) com o tempo da operação de acabamento ( $T_{c_a}$ ), como mostrado na Equação 30.

$$T_{c_t} \cong T_{c_d} + T_{c_a} \quad 30$$

Como visto na Equação 12, o tempo de fabricação depende do diâmetro da peça, desta forma, para obter um resultado mais próximo da realidade, o diâmetro deve ser atualizado a cada passe da ferramenta, descontando o dobro da profundidade de corte de desbaste ( $Ap_d$ ) a cada passe. Assim, o diâmetro para cada passe  $i$  será dado por  $D_{i-1} - 2 \cdot Ap_d$ . Também terá um passe com a profundidade de corte variada, que será  $Df = D_d - 2 \cdot Ap_{df}$ . Desta forma, considerando  $np_a - 1$  os passes de desbaste à profundidade de corte constante e  $D_0 = D_f$ , o tempo da operação de desbaste ( $T_{c_d}$ ) pode ser aproximado pela Equação 31.

$$T_{c_d} \cong \left( Df + \sum_{i=1}^{np_d-1} (D_{i-1} - 2 \cdot Ap_d) \right) \cdot \frac{lf \cdot \pi}{1000 \cdot f_d \cdot V_{c_d}} \quad 31$$

Já o tempo para a operação de acabamento ( $T_{c_a}$ ) pode ser calculada diretamente pela Equação 12, aplicando os valores referentes ao acabamento, como apresentado na Equação 32.

$$T_{c_a} = D_a \cdot \frac{lf \cdot \pi}{1000 \cdot f_a \cdot V_{c_a}} \quad 32$$

Agrupando as Equações 30, 31 e 32, tem-se o tempo total de fabricação ( $T_{c_t}$ ), em minutos, para realização de todas as operações de corte, como apresentado na Equação 33.

$$T_{c_t} \cong \left( \frac{Df + \sum_{i=1}^{np_d-1} (D_{i-1} - 2 \cdot Ap_d)}{f_d \cdot V_{c_d}} + \frac{D_a}{f_a \cdot V_{c_a}} \right) \cdot \frac{lf \cdot \pi}{1000} \quad 33$$

Por fim, o consumo energético ( $C_e$ ), medido em watt-minuto, é obtido através

da soma dos produtos entre o tempo e a potência de cada operação, como descrito na Equação 34.

$$Ce = Tc_d \cdot Pc_d + Tc_a \cdot Pc_a \quad 34$$

Já o critério para vida da ferramenta é definido em função do dano que cada uma das operações causa na ferramenta durante o processo. A Equação 35 define o dano total na vida da ferramenta ( $Dt_v$ ) em função da porcentagem de dano de desgaste e acabamento, ( $Dv_d$ ) e ( $Dv_a$ ), e da vida total da ferramenta ( $Vt_f$ ).

$$Dt_v = (Dv_d + Dv_a) \cdot Vt_f \quad 35$$

As porcentagens de dano ( $Dv$ ) são calculadas de acordo com a Equação 36 considerando os valores de tempo de corte ( $Tc$ ) e tempo de vida da ferramenta ( $Tv$ ) para as respectivas operações de desgaste e acabamento. O tempo de vida da ferramenta ( $Tv$ ), para cada operação, é estimado utilizando a Equação 20.

$$Dv = \frac{Tc}{Tv} \quad 36$$

A vida total da ferramenta ( $Vt_f$ ), em minutos, é estimada como sendo o menor valor entre a vida da ferramenta em desgaste ( $Tv_d$ ) e a vida da ferramenta em acabamento ( $Tv_a$ ).

Já o critério definido para rugosidade superficial ( $Ra$ ) pode ser obtido diretamente pela aplicação da Equação 22, tendo como input os parâmetros de acabamento apresentados na Tabela 1.

### 3.3.3 Critérios de Parada

Para o algoritmo genético cessar e fornecer os parâmetros de corte esperados, alguns critérios devem ser atingidos. Quando um número, previamente estipulado, de 100000 (cem mil) gerações ou um tempo máximo de execução, também estipulado previamente, de 300 segundos for atingido o algoritmo irá parar a execução.

Ao final, será informada se a combinação de parâmetros fornecidos como *input* é válida ou não. Esta informação leva em consideração a vida mínima esperada para



a ferramenta ( $V_{mín}$ ), que deve ser inserida como *input* no algoritmo. O algoritmo verifica se a vida total da ferramenta ( $Vt_f$ ) é maior ou igual a vida mínima esperada para a ferramenta ( $V_{mín}$ ),  $Vt_f \geq V_{mín}$ , caso esta inequação se satisfaça a combinação de parâmetros será válida, caso contrário novos parâmetros que satisfaçam esta verificação devem ser inseridos. Para este trabalho o valor escolhido para a vida mínima esperada para a ferramenta é  $V_{mín} = 240 \text{ min}$ .

### 3.4 Procedimento Experimental

Para validação do resultado obtido através da aplicação do algoritmo genético, foi efetuado uma série de usinagens experimentais, considerando os parâmetros otimizados e os parâmetros da melhor solução da primeira geração selecionados pelo algoritmo. Tais parâmetros foram escolhidos para possibilitar a avaliação da evolução genética dos parâmetros ao longo das gerações.

No total, oito usinagens foram realizadas, sendo quatro com cada combinação de parâmetro de corte, ou seja, quatro com as configurações otimizadas do algoritmo e quatro com as configurações do melhor indivíduo da primeira geração, também fornecido pelo algoritmo, como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Usinagens experimentais.

<b>Parâmetros de corte</b>	<b>Nº de usinagens</b>
Otimizado	4
Melhor da Primeira Geração	4

Fonte: Do autor (2020).

#### 3.4.1 Material das peças

As peças foram fabricadas em Aço SAE 1020, fornecido pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC) câmpus Xanxerê. O material normatizado é composto de uma liga de 99,1%p Fe (mín), 0,20%p C e 0,45%p Mn, em que o indicativo “%p” significa porcentagem em peso do elemento (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). As propriedades físicas e mecânicas aproximadas do material estão dispostas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedade do Alumínio Aço SAE 1020.

<b>Propriedade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	7,85
Limite de escoamento	MPa	210 (mín)
Resistência a tração	MPa	380 (mín)
Alongamento	%	25 (mín)
Coefficiente de Poisson	-	0,30
Dureza	HB	120-170
Módulo de Young	GPa	207
Calor Específico	J/kg.K	186

Fonte: Adaptado de (CALLISTER; RETHWISCH, 2012)

### 3.4.2 Especificações da Máquina

A máquina utilizada neste trabalho para realização das usinagens foi o torno Romi GL 240, o qual é comandado por um CNC com linguagem FANUC 0I-TD.

A máquina utilizada, apresentada na Figura 11, pertence ao Instituto Federal de Santa Catarina e está alocada no laboratório de CNC do câmpus Xanxerê.

Informações relevantes sobre a máquina são apresentados na Tabela 7, podendo ser encontradas informações adicionais no catálogo do fabricante em Romi (2016).

Figura 11 - Torno CNC Romi GL240 do IFSC câmpus Xanxerê.



Fonte: Do autor (2020)

Tabela 7 - Especificações técnicas do torno CNC ROMI 240GL

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS		ROMI GL 240
<b>Capacidade</b>		
Curso transversal do carro (eixo X)	mm	188
Curso longitudinal do carro (eixo Z)	mm	400
<b>Cabeçote</b>		
Capacidade de barras (diâmetro)	mm	51
Faixas de velocidades	rpm	6 a 6000
<b>Avanços</b>		
Avanço rápido transversal (eixo X)	m/min	30
Avanço rápido longitudinal (eixo Z)	m/min	30
<b>Torre porta-ferramentas</b>		
Número de posições / ferramentas	un	12
Tempo de giro estação / estação	s	0,4
<b>Cabeçote móvel</b>		
Posicionamento do corpo	-	manual
Acionamento da manga	-	hidráulico
<b>Potência instalada</b>		
Motor principal ca	cv/kW	20/15 (reg. S2 – 15 min)
Potência total instalada	kVA	25

Fonte: Adaptado de (ROMI, 2016)

### 3.4.3 Especificações da ferramenta

Para as duas operações de usinagem apenas uma ferramenta de corte foi necessária. Foi utilizada uma pastilha de corte KORLOY NC3030 modelo TNMG160408-GM, apresentada na Figura 12, a qual possui geometria triangular e um raio de ponta de 0,8 mm, ideal para o torneamento externo de aço.

Figura 12 - Pastilha de corte TNMG160408-GM.



Fonte: Do autor (2020).

A faixa de valores dos parâmetros de corte fornecido pelo algoritmo foram baseados nos parâmetros ilustrados na embalagem da ferramenta, a qual é apresentada na Figura 13.

Figura 13 - Embalagem da Ferramenta.



Fonte: Do autor (2020).

### 3.5 Variáveis de desempenho

Para avaliar os parâmetros de corte selecionado pelo algoritmo genético, bem como para compará-los com os parâmetros da primeira geração e validar a metodologia deste trabalho, foram efetuadas medições do consumo energético, do *makespan* e da rugosidade na fabricação de cada peça.

#### 3.5.1 Consumo energético

Para análise do consumo energético da máquina durante as operações de usinagem foi utilizado um wattímetro digital ICEL de alicate modelo AW-4700 aplicado à alimentação do motor. O objetivo foi verificar a potência ativa utilizada pelo equipamento em cada operação de usinagem, a qual, neste estudo, é entendida como

o consumo energético do processo. O wattímetro utilizado para o experimento é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Alicate Wattímetro Digital ICEL AW-4700.



Fonte: Do autor (2020)

A Tabela 8 apresenta algumas especificações técnicas do equipamento.

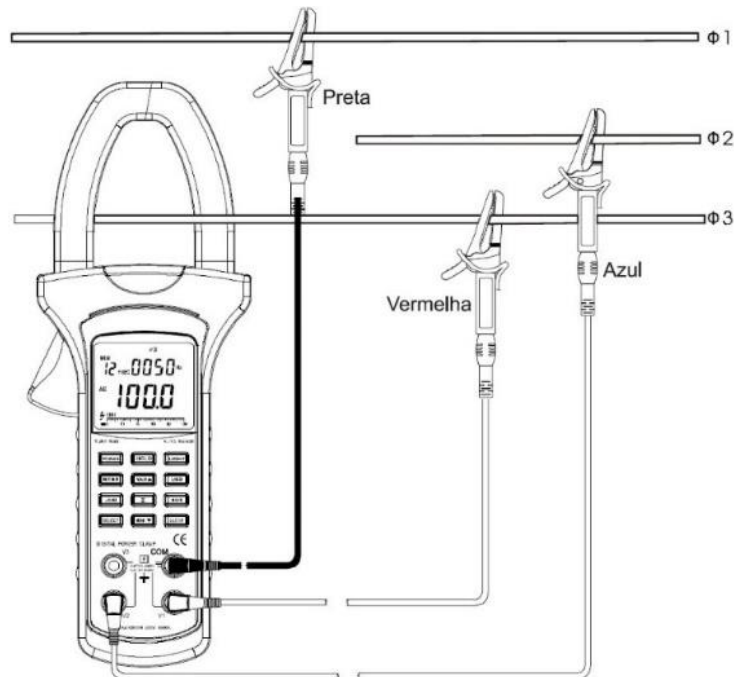
Tabela 8 - Especificações técnicas do Alicate Wattímetro Digital ICEL AW-4700.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS		Alicate Wattímetro Digital ICEL AW-4700
<b>Potência ativa</b>		
Faixas de medição	kW	0,60 - 600
Exatidão	-	+/- (3,0%+5dig.)
Resolução	kW	0,01; 0,1
Faixa de corrente para medida	A	40 - 1000
Faixa de tensão para medida	V	100 - 600

Fonte: Adaptado de (ICEL 2020).

A potência foi mensurada através da configuração de Potência Ativa 4 fios, como apresentado no esquema da Figura 15.

Figura 15 - Esquema de instalação do wattímetro.



Fonte: ICEL (2020)

Como o tempo de usinagem de cada operação é muito curto, foi necessário medir a potência em apenas uma fase, multiplicando o resultado por três para obter uma aproximação da potência trifásica do equipamento.

O display do wattímetro atualiza aproximadamente uma vez a cada 2 segundos sendo o resultado obtido através da média de todas as medições durante cada operação. Para isso, o equipamento foi filmado durante a execução das operações e os resultados lidos posteriormente por meio de gravações.

Através das medidas de potência foi comparado o consumo energético analítico, fornecido pelo algoritmo, com o consumo energético real, obtido através da leitura do wattímetro.

### 3.5.2 Tempo total de usinagem (makespan)

O *makespan* do processo de usinagem é avaliado sendo o tempo do início da primeira operação até o final da última operação, ou seja, para este estudo será o tempo do início da operação de desbaste até o término da operação de acabamento.

Para obter o *makespan* de forma mais exata e poder identificar com mais

clareza os resultados, foram tomados os tempos de usinagem de cada processo individual (desbaste e acabamento).

Como a operação de desbaste é realizada em múltiplos passes, o tempo de usinagem deve ser cronometrado do início do primeiro passe até o final do último passe da ferramenta. Já a operação de acabamento é realizada em apenas um passe, então o tempo de usinagem será o tempo total deste passe.

Os tempos para cada operação foram tomados com auxílio de um cronômetro digital simples operado manualmente e pelo cronômetro de operação da própria máquina. Já o tempo total de usinagem foi obtido somando o tempo total das duas operações, utilizando tanto os tempos cronometrados quanto os fornecidos pela máquina.

### 3.5.3 Rugosidade superficial

A qualidade superficial das peças usinadas foram avaliadas com base na medida da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ). Para obtenção da rugosidade das peças foi utilizado um rugosímetro TESA - Rugosurf 20, o qual é apresentado na Figura 16.

Figura 16 - TESA - Rugosurf 20.



Fonte: (TESA SARL, 2019)

O equipamento utilizado segue a norma ISO 3274 para medição da rugosidade superficial. Algumas informações técnicas relevantes estão disponíveis na Tabela 9.

Tabela 9 - Especificações técnicas do TESA - Rugosurf 20.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS		TESA - Rugosurf 20
Força de medição	mN	0,75
Erro máximo permitido	-	Classe 1 – ISO 3274
Resolução	$\mu\text{m}$	0,001
Material da ponteira	-	Diamante
Raio de ponta	$\mu\text{m}$	2
Ângulo de ponta	-	90°
Faixa de medição em Z	$\mu\text{m}$	400
Faixa de medição em X	mm	16
Comprimento de <i>cut-off</i>	mm	0,25 - 0,80 – 2,50
Número de <i>cut-offs</i>	-	1 – 5

Fonte: Adaptado de (TESA SARL, 2019).

As medidas da rugosidade foram tomadas após a fabricação de cada peça. Para isso, apoiou-se a peça em uma mesa de desempenho com superfície apropriada sendo que o rugosímetro foi posto sobre a peça. Assim, foram realizadas três medições em pontos distintos e aleatórios sobre a superfície usinada de cada peça. A rugosidade final foi obtida por meio de uma média aritmética simples das medidas.

## 4 RESULTADOS

Nesta etapa serão apresentados os resultados teóricos e experimentais, obtidos neste trabalho, de parâmetros de corte e os respectivos valores de consumo energético, *makespan*, rugosidade superficial, desgaste e vida da ferramenta utilizados como critérios de avaliação do processo.

### 4.1 Resultados do Algoritmo Genético

A partir da execução do algoritmo genético, utilizando os parâmetros de entrada especificados no tópico 3.3.1 e disponíveis no Apêndice A, foram obtidos resultados teóricos de parâmetros de corte otimizados seguindo os critérios estudados.

A Tabela 10 apresenta os valores teoricamente otimizados de velocidade de corte, profundidade de corte e avanço para as operações de desbaste e acabamento



obtidos através do algoritmo genético.

Tabela 10 - Resultados otimizados de parâmetros de corte do algoritmo.

<b>Parâmetro de Corte</b>	<b>Desbaste</b>	<b>Acabamento</b>
$V_c$ (m/min)	146,635	174,839
$A_p$ (mm)	2,490	0,050
$f$ (mm/rev)	0,500	0,444

Fonte: Do autor (2020).

Adicionalmente aos parâmetros de corte, o algoritmo genético também fornece valores teóricos, utilizados como critério de otimização, de consumo energético, *makespan*, rugosidade superficial e vida da ferramenta para cada operação de usinagem, os quais são apresentados na Tabela 11. As unidades de medida foram adaptadas para valores comumente utilizados para facilitar a análise dos resultados.

Tabela 11 – Resultado por operação dos critérios para os parâmetros otimizados fornecidos pelo algoritmo.

<b>Critério</b>	<b>Desbaste</b>	<b>Acabamento</b>
Consumo Energético (Wh)	2,4595	0,0509
Makespan (s)	1,2983	1,2141
Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )	-	7,8980
Vida da Ferramenta (min)	240,6177	17317,26

Fonte: Do autor (2020).

O resultado dos critérios finais de otimização para os parâmetros de corte otimizados, escolhidos pelo algoritmo genético, são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultado dos critérios finais para os parâmetros otimizados fornecidos pelo algoritmo.

<b>Critério</b>	<b>Valor</b>
Consumo Energético (Wh)	2,5104
Makespan (s)	2,5124
Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )	7,8980
Dano na Ferramenta (min)	0,0219

Fonte: Do autor (2020).

Para fins de comparação de processos o algoritmo genético também fornece resultados referentes ao melhor indivíduo da primeira geração. A Tabela 13 expõe os resultados obtidos de parâmetros para este indivíduo.

Tabela 13 - Resultados de parâmetros de corte para a melhor solução da primeira geração obtidos pelo algoritmo.

<b>Parâmetro de Corte</b>	<b>Desbaste</b>	<b>Acabamento</b>
$V_c$ (m/min)	84,144	165,069
$A_p$ (mm)	2,015	0,866
$f$ (mm/rev)	0,444	0,406

Fonte: Do autor (2020).

Os resultados dos critérios por operação, com medidas adaptadas, correspondentes aos parâmetros do melhor indivíduo da primeira geração são expostos na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultado por operação dos critérios para os parâmetros da melhor solução da primeira geração fornecidos pelo algoritmo.

<b>Critério</b>	<b>Desbaste</b>	<b>Acabamento</b>
Consumo Energético (Wh)	1,9512	0,8974
Makespan (s)	2,9596	1,4063
Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )	-	6,6040
Vida da Ferramenta (min)	21014,89	998,47

Fonte: Do autor (2020).

Por fim, os resultados dos critérios finais de otimização, considerando ambas as operações, para o melhor indivíduo da primeira geração podem ser visualizados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultado dos critérios finais para os parâmetros da melhor solução da primeira geração fornecidos pelo algoritmo.

<b>Critério</b>	<b>Valor</b>
Consumo Energético (Wh)	2,8486
Makespan (s)	4,3659
Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )	6,6040
Dano na Ferramenta (min)	0,0258

Fonte: Do autor (2020).

Para fins de avaliação da evolução genética do algoritmo, este fornece valores da média dos critérios de consumo energético, *makespan*, rugosidade superficial e danos na ferramenta da primeira e da última geração, os quais são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados da média dos critérios da primeira e da última geração do algoritmo.

<b>Critério</b>	<b>Primeira Geração</b>	<b>Última Geração</b>
Consumo Energético (Wh)	3,1676	2,5164
Makespan (s)	10,5940	2,7400
Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )	2,2332	8,8494
Dano na Ferramenta (min)	0,0720	0,0277

Fonte: Do autor (2020).

## 4.2 Resultados das Usinagens Experimentais

A partir dos resultados obtidos através da execução do algoritmo genético, uma série de usinagens foram realizadas para avaliação experimental dos parâmetros de corte teoricamente selecionados. Conforme descrito na seção 3.4, foram executados quatro procedimentos completos de usinagem, com desbaste e acabamento, medidos os valores reais de potência da máquina e tempo de corte para cada operação e medida a rugosidade superficial final da peça usinada.

Na apresentação dos resultados, o prefixo das peças 1-X será referente à configuração teoricamente otimizada e 2-X referente à melhor configuração da primeira geração.

Além da apresentação dos valores dos critérios mensurados em cada

usinagem, os resultados de desvio padrão também serão mostrados como meio de análise da reprodutibilidade dos experimentos realizados neste estudo.

Considerando a configuração dos parâmetros de corte teoricamente otimizados, a Tabela 17 apresenta os valores de potência fornecida pela máquina medidos para as operações de desbaste e acabamento.

Tabela 17 - Potências obtidas para a configuração otimizada.

<b>Configuração</b>	<b>Peça</b>	<b>Potência no Desbaste (kW)</b>	<b>Potência no Acabamento (kW)</b>
Otimizado	1-1	21,310	22,545
	1-2	18,990	21,120
	1-3	17,730	21,615
	1-4	21,879	22,260
<b>Média</b>	-	19,977	21,885
<b>Desvio Padrão</b>	-	1,6894	0,5555

Fonte: Do autor (2020).

Conforme obtido pela configuração teoricamente otimizada, valores de potência da máquina também foram mensurados para as operações de usinagem utilizando a melhor configuração encontrada na primeira geração do algoritmo, os quais são expostos na Tabela 18.

Tabela 18 - Potências obtidas para a melhor configuração da primeira geração.

<b>Configuração</b>	<b>Peça</b>	<b>Potência no Desbaste (kW)</b>	<b>Potência no Acabamento (kW)</b>
Melhor da Primeira Geração	2-1	7,256	20,183
	2-2	5,451	18,833
	2-3	5,487	20,280
	2-4	6,253	21,533
<b>Média</b>	-	6,112	20,207
<b>Desvio Padrão</b>	-	0,7341	0,9555

Fonte: Do autor (2020).

Para avaliação do tempo de corte foram mensurados valores para cada

operação utilizando medidas manualmente cronometradas e medidas retiradas dos dados de início e fim de operação da própria máquina ferramenta.

Os dados de tempo de corte medidos para a operação de desbaste utilizando a configuração de corte teoricamente otimizada é mostrada na Tabela 19.

Tabela 19 - Tempos de corte de desbaste para a configuração otimizada.

<b>Configuração</b>	<b>Peça</b>	<b>Cronometrado (s)</b>	<b>Máquina (s)</b>
Otimizado	1-1	9,366	9
	1-2	9,091	9
	1-3	9,119	9
	1-4	9,204	9
<b>Média</b>	-	9,195	9
<b>Desvio Padrão</b>	-	0,1071	0

Fonte: Do autor (2020).

A Tabela 20 apresenta os valores de tempo de corte, obtidos na operação de desbaste, utilizando a melhor configuração da primeira geração do algoritmo genético.

Tabela 20 - Tempos de corte de desbaste para a melhor configuração da primeira geração.

<b>Configuração</b>	<b>Peça</b>	<b>Cronometrado (s)</b>	<b>Máquina (s)</b>
Melhor da Primeira Geração	2-1	12,281	12
	2-2	12,215	12
	2-3	12,249	12
	2-4	12,105	12
<b>Média</b>	-	12,212	12
<b>Desvio Padrão</b>	-	0,0663	0

Fonte: Do autor (2020).

Os dados de tempo de corte para operação de acabamento, utilizando a configuração de parâmetros teoricamente otimizados fornecidos pelo algoritmo, podem ser visualizados na Tabela 21.

Tabela 21 - Tempos de corte de acabamento para a configuração otimizada.

<b>Configuração</b>	<b>Peça</b>	<b>Cronometrado (s)</b>	<b>Máquina (s)</b>
Otimizado	1-1	6,066	8
	1-2	6,001	7
	1-3	6,071	9
	1-4	5,998	7
<b>Média</b>	-	6,034	7,75
<b>Desvio Padrão</b>	-	0,0346	0,8292

Fonte: Do autor (2020).

Os valores de tempo de corte obtidos utilizando a configuração de parâmetros do melhor indivíduo da primeira geração do algoritmo são expostos na Tabela 22.

Tabela 22 - Tempos de corte de acabamento para a melhor configuração da primeira geração.

<b>Configuração</b>	<b>Peça</b>	<b>Cronometrado (s)</b>	<b>Máquina (s)</b>
Melhor da Primeira Geração	2-1	5,848	8
	2-2	5,889	9
	2-3	5,766	7
	2-4	5,804	7
<b>Média</b>	-	5,826	7,75
<b>Desvio Padrão</b>	-	0,0462	0,8292

Fonte: Do autor (2020).

Os resultados de tempo total de corte foram obtidos pela soma dos tempos de desbaste e acabamento manualmente cronometrados. Já os resultados de consumo energético foram calculados pela soma do produto entre a potência da máquina e o tempo de corte de cada operação. Por fim, a rugosidade superficial foi mensurada sobre cada peça, medindo-se em três pontos distintos e calculando a média simples dos resultados.

A Tabela 23 apresenta os valores verificados de tempo total de corte, consumo energético e rugosidade superficial média de todas as peças usinadas utilizando a configuração de parâmetros de corte teoricamente otimizados.

Tabela 23 - Resultados obtidos para a configuração otimizada.

<b>Configuração</b>	<b>Peça</b>	<b>Tempo Total de Corte (s)</b>	<b>Consumo Energético (Wh)</b>	<b>Rugosidade Média (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
Otimizado	1-1	15,432	93,430	2,610
	1-2	15,092	83,161	2,880
	1-3	15,19	81,362	2,330
	1-4	15,202	93,024	2,970
<b>Média</b>	-	15,229	87,744	2,698
<b>Desvio Padrão</b>	-	0,1247	5,5212	0,2501

Fonte: Do autor (2020).

Analogamente, a Tabela 24 expõe os resultados mensurados em cada peça usinada utilizando a configuração de parâmetros da melhor solução da primeira geração do algoritmo genético.

Tabela 24 - Resultados obtidos para a melhor configuração da primeira geração.

<b>Configuração</b>	<b>Peça</b>	<b>Tempo Total de Corte (s)</b>	<b>Consumo Energético (Wh)</b>	<b>Rugosidade Média (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
Melhor da Primeira Geração	2-1	18,129	57,537	3,593
	2-2	18,104	49,304	3,530
	2-3	18,015	51,150	3,630
	2-4	17,909	55,742	3,580
<b>Média</b>	-	18,039	53,433	3,583
<b>Desvio Padrão</b>	-	0,0863	3,3331	0,0358

Fonte: Do autor (2020).

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção serão analisados e discutidos os resultados obtidos teoricamente pelo algoritmo genético e experimentalmente pelas medições físicas dos critérios avaliados nas usinagens realizadas neste trabalho.

### 5.1 Análise e Discussão dos Resultados Teóricos

A execução do algoritmo foi rápida considerando o número e a quantidade de

cálculos necessários para cada geração, levando 3 minutos e 0,36 segundo para a execução completa. O algoritmo genético foi executado em um computador com processador Intel Core i7-7700HQ (8 CPUs ~2.80GHz) e 16384 MB de memória RAM. Assim, o número limite de 100000 (cem mil) gerações propostas como condição de parada foi atingido antes dos 300 segundos também propostas como condição de parada. No trabalho de Olivieri (2004), o algoritmo genético apresentou maior custo computacional quando comparado a outros métodos de otimização, contudo o autor destaca que o esforço não refletiu em grande aumento de tempo de processamento devido a velocidade dos computadores modernos. Porém, neste presente estudo, verificou-se que a utilização de algoritmos genéticos, para otimização de parâmetros corte em usinagem CNC, não necessita de grandes esforços computacionais.

Os valores de *input* propostos para ao algoritmo seguiam as recomendações da literatura e do fabricante da ferramenta neste sentido, não houve casos de resoluções fisicamente impossíveis. Isso demonstra que o algoritmo genético produziu dados teóricos com exatidão proporcionando a otimização de parâmetros de corte de acordo com os critérios previamente estabelecidos. Uma satisfatória eficiência na utilização de algoritmos genéticos também foi encontrada no trabalho de Carneiro Jr et al. (2005), onde objetivou-se a otimização do custo total de uma termoelétrica considerando diversas restrições operacionais.

Os resultados para os critérios de consumo energético, *makespan*, rugosidade e vida da ferramenta foram de acordo com o esperado, considerando o peso predeterminado de cada parâmetro e a vida mínima da ferramenta requerida.

A Tabela 25 apresenta a diferença entre os critérios obtidos para os parâmetros otimizados e para os parâmetros da primeira geração do algoritmo por operação de corte, os resultados da tabela foram obtidos verificando a diferença numérica entre os valores experimentais da primeira configuração e da segunda configuração para cada parâmetro.



Tabela 25 - Diferença entre os critérios otimizados e da melhor solução da primeira geração por operação.

<b>Operação</b>	<b>Consumo Energético (MWh)</b>	<b>Tempo Total de Corte (s)</b>	<b>Rugosidade Média (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Vida da Ferramenta (min)</b>	<b>Dano na Ferramenta (min)</b>
Desbaste	0,5083	-1,6613	-	-20774,27	-
Acabamento	-0,8465	-0,1922	1,294	16318,79	-
Total	-0,3382	-1,8535	1,294	-757,85	-0,00388

Fonte: Do autor (2020).

Considerando o tempo de corte, o *makespan* e a rugosidade, quanto menor o valor, mais promissora é a configuração de corte. O inverso ocorre com a vida da ferramenta, quanto maior o valor mais durável ela será.

Analisando a Tabela 25, percebe-se que para o consumo energético de desbaste a opção da primeira geração apresenta melhores resultados quando comparados à otimizada, entretanto o contrário ocorre para o acabamento, resultando assim em um menor tempo total de corte para a operação otimizada.

Para o tempo de corte ambas as operações se sobressaíram na opção otimizada, resultando um melhor aproveitamento com esta configuração. Este resultado é consequência da elevada velocidade de corte para a configuração teoricamente otimizada.

Sobre a qualidade superficial, a rugosidade foi considerada somente na operação de acabamento e apresentou resultados superiores para a configuração da primeira geração. Este fato se deve ao peso diminuto atribuído a este critério, somente 10%, sendo assim um resultado esperado para esta aplicação. Gaitonde, Karnik e Davim (2012) basearam seus estudos com algoritmos genéticos somente na rugosidade superficial, considerando fluidos lubrificantes no torneamento de latão utilizando uma ferramenta de metal duro. Os autores concluíram que o algoritmo foi capaz de otimizar a quantidade de lubrificante e fornecer parâmetros ideais de corte dentro das predefinições atribuídas. O algoritmo também revelou que a rugosidade mínima varia entre 0,23 e 0,5 micrômetros com a faixa de parâmetros selecionados.

O valor encontrado para a vida da ferramenta com os parâmetros da primeira geração foi elevado quando comparado ao otimizado, entretanto, como esse é um valor que o usuário define como limite mínimo, os resultados obtidos eram esperados,

sinalizando que o algoritmo trabalhou dentro dos limites propostos e aproveitou ao máximo os parâmetros decisivos.

O dano à ferramenta foi avaliado somente de forma geral e apresentou melhores resultados para a configuração teoricamente otimizada.

Por fim, outro indício da evolução das gerações do algoritmo genético são os resultados da Tabela 16, a qual compara os valores médios dos critérios da última geração com os da primeira. É possível perceber que os valores de consumo energético, *makespan* e danos na ferramenta são muito inferiores na última geração quando comparados aos da primeira. A exceção desse resultado é somente em relação a rugosidade, tendo como justificativa o baixo peso atribuído ao critério.

A nível teórico, os resultados obtidos pelo algoritmo genético foram satisfatórios, apresentando visível otimização ao longo das gerações, respeitando os limites impostos e cumprindo com o esperado.

Parâmetros ótimos de velocidade de corte e avanço, aliados a um custo mínimo de torneamento, também foram obtidos com a utilização de algoritmos genéticos no trabalho de Petrovic e Radovanovic (2016). Do ponto de vista teórico, o trabalho de Olivieri (2004) também apresentou resultados satisfatórios na utilização de algoritmos genéticos, o qual foi empregado na otimização do pré-dimensionamento da seção transversal de pontes rodoviárias. Boas respostas também foram encontradas no trabalho de Colheirinhas (2016), que utilizou uma ferramenta baseada em algoritmos genéticos para otimização em dois estudos de caso de engenharia. O primeiro propõe uma metodologia de projeto do controle passivo de torres eólicas do tipo TMP-Pendular. O segundo identifica as configurações de um Trato Vocal.

Com base nos resultados obtidos, é possível classificar o algoritmo genético como adequado para otimização de parâmetros de corte em usinagem CNC, pois este apresentou excelentes respostas evolutivas em um curto período de execução, respeitando os limites impostos e aproveitando ao máximo as faixas de parâmetros preestabelecidas.

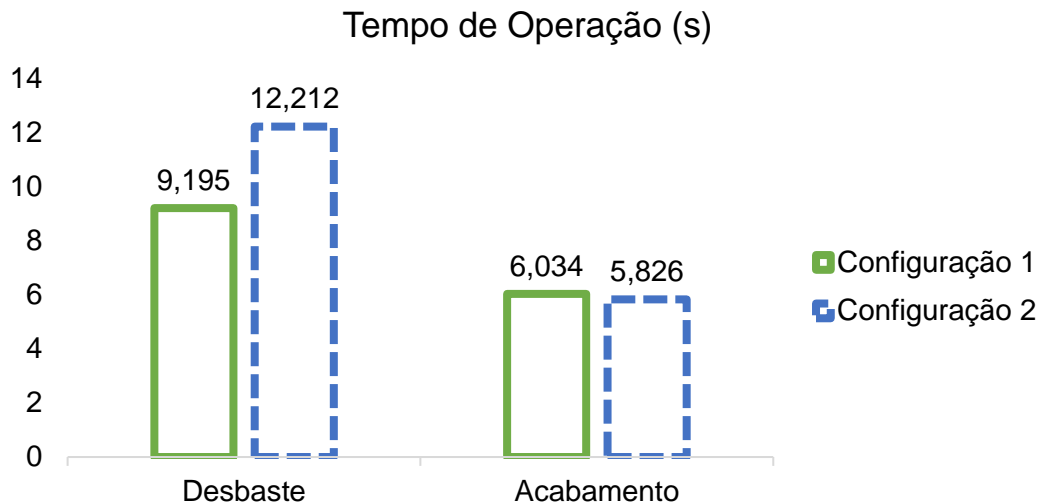
## **5.2 Análise e Discussão dos Resultados Experimentais**

As usinagens experimentais, de modo geral, ocorreram de acordo com o planejado, entretanto alguns resultados não foram tão condizentes quanto esperava-se. Algumas imprecisões nas medições e condições imprevistas no processo podem

ter causado tais resultados.

A Figura 17 mostra graficamente a média dos valores cronometrados para as operações de desbaste e acabamento utilizando a configuração otimizada (1) e a melhor solução da primeira geração (2).

Figura 17 - Gráfico do tempo de operação obtido experimentalmente.



Fonte: Do autor (2020)

Como é verificável na Figura 17, a operação mais influente para o tempo de corte é o desbaste, também é a que apresenta maior variação à mudança de parâmetros. Isso se deve ao fato de o desbaste ser realizado em mais de um passe da ferramenta, atenuando a diferença entre os valores da mesma operação e fazendo com que o tempo total seja superior em relação ao acabamento.

Através da análise dos resultados das usinagens experimentais, percebe-se que o tempo de corte mensurado para as operações utilizando os parâmetros teoricamente otimizados foi menor quando comparados às operações com parâmetros da primeira geração. Este fator pode ser explicado pela velocidade de corte e avanço elevados durante a operação de desbaste na configuração otimizada. Entretanto, o contrário é observável para o acabamento, em que, mesmo sendo uma pequena diferença, a segunda configuração se sobressaiu com um tempo menor de operação. Esta observação pode ser explicada pela diferença no valor de rotação do eixo árvore do torno das duas configurações, o qual depende da velocidade de corte, e quanto maior a rotação maior será o tempo de aceleração do eixo árvore antes de iniciar a usinagem, logo a configuração com maior velocidade de corte terá um tempo

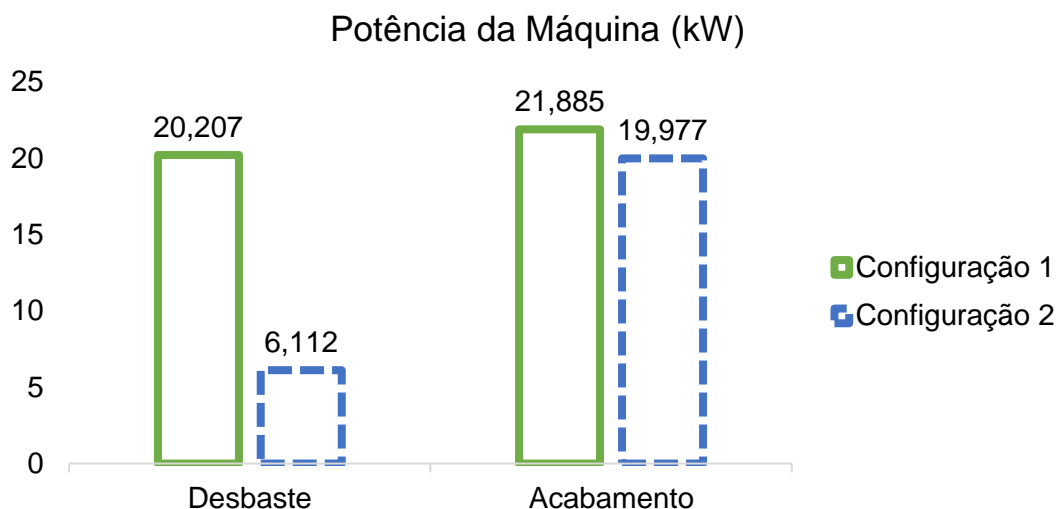
maior de operação. É verificável que este fenômeno ocorre somente na operação de acabamento, pois como o desbaste é realizado em mais de um passe da ferramenta os resultados são amplificados, fazendo com que a velocidade de corte maior supere a diferença de tempo causada pela aceleração do torno. O parâmetro de tempo de aceleração do torno não foi considerado nos critérios de aplicação do algoritmo genético, sendo este um fator de imprecisão dos resultados experimentais.

Outro ponto importante a ser ressaltado sobre o tempo de corte é a diferença de leitura dos valores da máquina e dos cronometrados manualmente. Este fato acontece uma vez que a máquina só fornece valores inteiros, já o cronometro pode apresentar até três casas decimais e considerar o erro humano de medição. O maior desvio padrão encontrado para o tempo de corte cronometrado foi de 0,1071, verificado na Tabela 19, já para o tempo fornecido pela máquina o maior desvio padrão foi de 0,8292, como mostrado na Tabela 21 e Tabela 22.

Sobre as potências mensuradas durante as operações, é possível verificar na Tabela 17 e Tabela 18 que o desvio padrão das medidas foi relativamente elevado, contudo, considerando a ordem de grandeza dos valores finais de consumo energético, expressos na Tabela 23 e Tabela 24, o impacto não é expressivo.

Na Figura 18, verifica-se graficamente a média das potências de desbaste e acabamento para a configuração de parâmetros teoricamente otimizados (1) e para a melhor configuração da primeira geração (2).

Figura 18 - Gráfico da potência da máquina obtido experimentalmente.



Fonte: Do autor (2020)

Através da Figura 18, nota-se que as potências de desbaste do grupo 1 foram maiores que as do grupo 2, o que pode ser explicado pela superioridade na rotação do motor causada pela alta velocidade de corte na operação da primeira configuração. Este motivo também esclarece o fato de a configuração teoricamente otimizada apresentar um maior consumo energético mesmo com menor tempo de operação.

Um motivo para as imprecisões de potência pode estar atribuído ao método de leitura das unidades do equipamento utilizado, o qual fornece atualizações em forma intermitente, aproximadamente uma vez a cada dois segundos, considerado um intervalo grande frente aos tempos trabalhados.

Outra fonte de erro na medição da potência pode estar relacionada a alimentação da máquina, que se dá em forma trifásica, porém o wattímetro utilizado faz a leitura em tempo real de somente uma fase, o resultado foi aproximado multiplicando o valor mensurado por três.

Por fim, a rugosidade superficial não apresentou diferenças expressivas entre os dois parâmetros de corte,  $\sim 0,9 \mu\text{m}$ , sendo o melhor caso encontrado na configuração teoricamente otimizada. Entretanto, após as usinagens foi possível perceber, após uma inspeção visual, um melhor acabamento nas peças usinadas com a configuração da primeira geração do algoritmo, porém o mesmo não foi comprovado com as medições realizadas pelo rugosímetro. Rosado de Paula e Benini (2017) estudaram a influência dos parâmetros de corte no torneamento de aço ABNT 1020 e constataram que a velocidade de corte é um dos parâmetros mais influentes. O que pode justificar os resultados obtidos, visto que a velocidade de corte da primeira configuração era ligeiramente superior à da segunda.

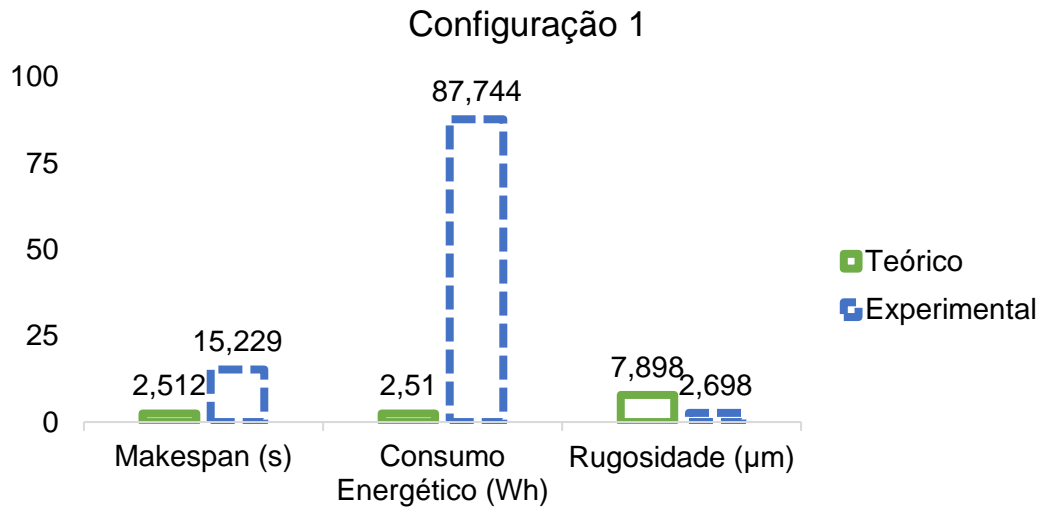
Por meio dos experimentos, verificou-se que os parâmetros de corte para a configuração teoricamente otimizada apresentaram resultados superiores de tempo de corte e rugosidade frente aos da primeira geração. Já os resultados de consumo energético foram melhores para a segunda configuração de corte.

### **5.3 Comparação dos Resultados Teóricos e Experimentais**

Confrontando os resultados obtidos através do algoritmo genético com os obtidos por meio das usinagens, tanto para a configuração otimizada quanto para a melhor configuração da primeira geração, verifica-se que houve um grande desvio teórico-experimental.

A Figura 19 expressa graficamente os resultados obtidos para os critérios utilizando a configuração de parâmetros de corte teoricamente otimizados (1) do modelo teórico e do modelo experimental mensurados fisicamente.

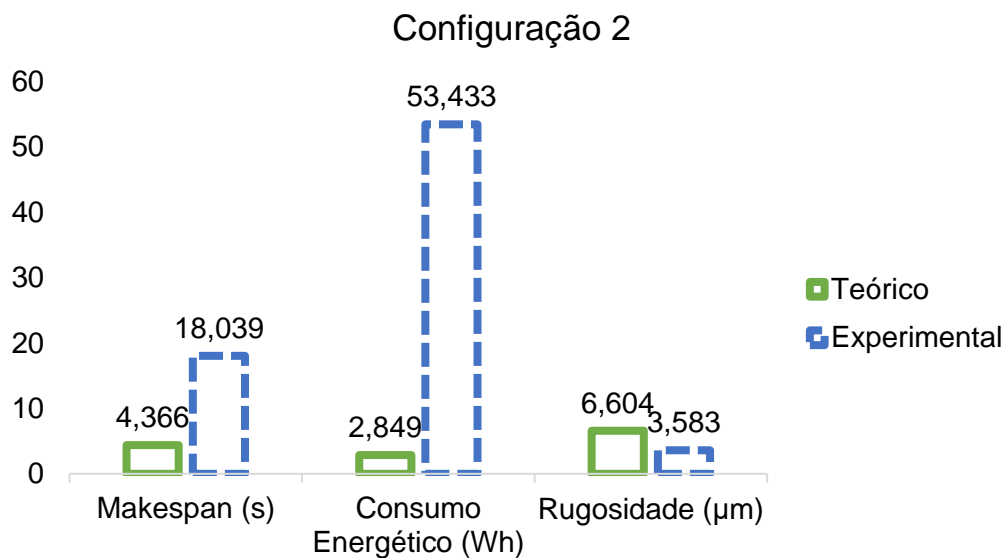
Figura 19 - Comparação teórico-experimental para a configuração teoricamente otimizada.



Fonte: Do autor (2020)

Analogamente, a Figura 20 expõe os resultados para os critérios avaliados utilizando a configuração de corte do melhor indivíduo da primeira geração (2) do algoritmo genético.

Figura 20 - Comparação teórico-experimental para a melhor solução da primeira geração.

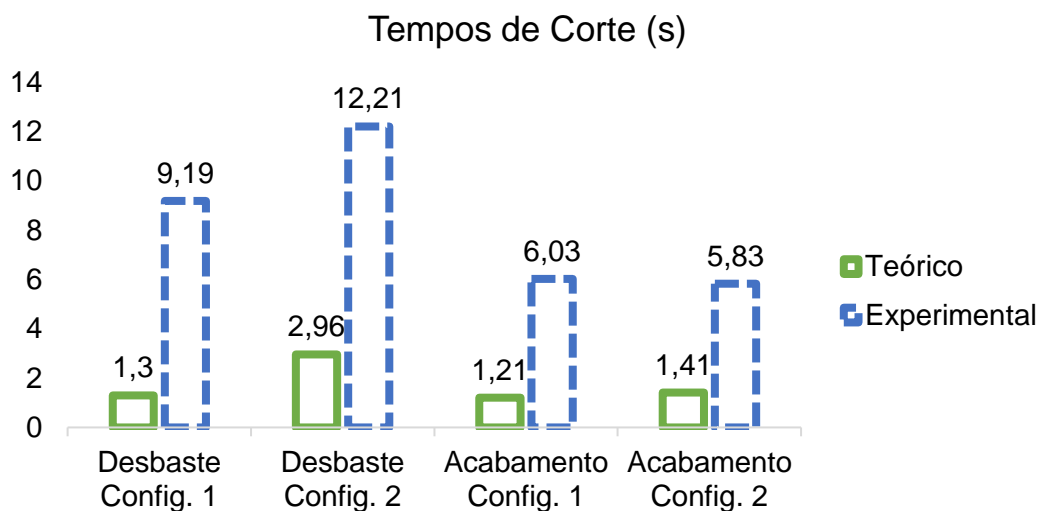


Fonte: Do autor (2020)

Por meio da Figura 19 e da Figura 20, visualiza-se facilmente a defasagem teórico-experimental dos resultados de *makespan*. Um dos motivos que explicam a diferença para ambas as operações é o tempo de aceleração do cabeçote do torno, a qual não foi considerada no modelo analítico. Outra justificativa se refere somente à operação de desbaste e à programação dos comandos da máquina ferramenta utilizada, estes consideram um passe extra da ferramenta quando utilizado o comando “G71” para o desbaste externo, também não previsto no modelo teórico. Estes fatores podem ser facilmente verificados na Figura 21, onde são confrontados os tempos de corte teóricos e experimentais para ambas as operações e configurações.

Através da Figura 21 ainda se percebe que para o acabamento, por ser realizado em apenas um passe da ferramenta, a aceleração inicial do torno afetou diretamente os resultados de tempo de corte, o que não foi previsto pelo modelo analítico proposto, justificando a diferença da proporção esperada.

Figura 21 - Comparação teórico-experimental dos tempos de corte.



Fonte: Do autor (2020)

Mesmo que em diferentes escalas, o modelo analítico utilizado pelo algoritmo genético ainda foi eficaz na seleção da melhor configuração para o *makespan*.

Analisando novamente a Figura 19 e a Figura 20, dando enfoque ao consumo energético, verifica-se que o desvio teórico-experimental foi severamente elevado e a estimativa do algoritmo de que a primeira configuração seria mais econômica energeticamente do que a segunda também foi errônea.

O erro analítico ocorreu, pois, os cálculos consideram somente a potência que o motor fornece ao corte, ignorando a potência necessária para a própria rotação do motor e as forças necessárias para mover os periféricos, e no modelo experimental foi mensurada a potência de alimentação do motor, considerando todo o sistema por ele governado. Melhores resultados foram obtidos no trabalho de Zhou et al. (2017), o qual aprimorou um modelo base de consumo energético de furação para considerar a velocidade de rotação do eixo da máquina ferramenta.

Lv et al. (2018) analisou a precisão de diferentes métodos de aproximação direta da potência de corte, e verificou que a metodologia baseada na força, assim como a utilizada nesse estudo, foi a que mais se aproximou dos resultados fisicamente mensurados. Contudo, o autor constatou que erros de até 49,5%% foram obtidos quando utilizados constantes provenientes da literatura, muito superior aos 3,3% obtidos através de constantes experimentais.

Outro responsável pelo desvio experimental do consumo energético é o *makespan*, que também apresentou uma grande defasagem, considerando que estes estão diretamente relacionados. Logo, se o *makespan* for elevado o consumo energético, por sua vez também será, uma vez que o aumento de tempo é diretamente proporcional ao aumento do consumo.

Já a grande disparidade das potências da primeira e segunda configuração, como mencionado anteriormente, é explicada pela relação entre a velocidade de corte e a velocidade de rotação do eixo árvore do torno aliada com a falta da consideração da potência de rotação do motor. Como a primeira configuração possui elevada rotação do cabeçote, o consumo energético mensurado também foi igualmente elevado, o que não se considerou no modelo analítico.

Por fim, analisando a rugosidade teórica e experimental na Figura 19 e na Figura 20, para as duas configurações, percebe-se que houve uma pequena diferença entre o modelo analiticamente proposto, utilizado no algoritmo genético, e o modelo mensurado nas usinagens. Lima e Rolim (2013) verificaram que o aumento do avanço gera como consequência o aumento da rugosidade, como foi previsto analiticamente neste trabalho. Entretanto há muitas outras variáveis influentes na qualidade superficial que são impossíveis ou muito difíceis de prever teoricamente. Como citado por Ferraresi (1969), a qualidade superficial depende de fatores como a pressão da ferramenta sobre a peça, o atrito superficial ferramenta-peça, o atrito interno do material, o calor gerado no processo, os fenômenos da formação do cavaco e a



vibração dos componentes durante as usinagens.

Por outro lado, os resultados de rugosidade obtidos experimentalmente foram melhores do que os previstos analiticamente, mostrando que a formulação utilizada ainda é conservativa na predeterminação deste critério. Como o peso atribuído ao critério de rugosidade foi baixo, apenas 10%, o desvio observado não interferiu de maneira significativa no resultado de outros critérios. Entretanto, para a utilização no algoritmo genético ainda é necessária a inserção de parâmetros que melhor descrevem esta aproximação teórico-experimental, para que o melhor indivíduo possa ser escolhido com maior exatidão.

De modo geral, as equações utilizadas para escolha do melhor indivíduo não foram completamente satisfatórias, sendo somente os valores experimentais de *makespan* proporcionalmente condizentes com os previstos de forma analítica.

## **6 CONCLUSÕES**

Neste trabalho foi explorado a aplicação de um algoritmo genético para a escolha de parâmetros de corte otimizados para usinagem em centro de usinagem CNC, onde foram utilizados como critérios o consumo energético, o tempo de corte, a rugosidade superficial e o desgaste da ferramenta de corte. O objetivo principal deste estudo foi validar a metodologia de aplicação de um algoritmo genético para escolha de parâmetros de corte através da realização de ensaios de usinagens e da medição física dos critérios avaliados.

Considerou-se nesse estudo apenas as operações de torneamento externo de desbaste e acabamento.

Foram realizadas diversas usinagens com diferentes parâmetros de corte fornecidos pelo algoritmo para a avaliação da efetividade da metodologia proposta. Medições de consumo energético, tempo de corte e rugosidade superficial foram efetuadas para cada peça usinada, as quais foram utilizadas para confrontar os valores teóricos. As configurações de corte do melhor indivíduo geral e do melhor indivíduo da primeira geração do algoritmo genético foram utilizadas nos ensaios.

Tanto o centro de torneamento quanto os instrumentos de medição se provaram confiáveis para a realização do estudo, apresentando um baixo desvio padrão nas medições e propiciando uma boa reprodutibilidade. Entretanto, a forma de medição do equipamento utilizado para mensurar o consumo energético não se demonstrou

adequada para esta aplicação.

O algoritmo genético, analisando de forma individualizada, apresentou excelentes resultados teóricos na escolha dos parâmetros de corte otimizados, respeitando as restrições e aproveitando ao máximo os limites a ele impostos. A execução do código foi relativamente rápida, considerando os critérios de parada preestabelecidos. A evolução das gerações do algoritmo também é um parâmetro facilmente observável.

As usinagens experimentais ocorreram de acordo com o esperado, contudo alguns resultados obtidos por meio delas foram razoáveis. Imprecisão nas medições e condições imprevistas no processo podem ter causado tal resposta. Entretanto, a melhor configuração escolhida pelo algoritmo genético se destacou perante a configuração da primeira geração, com medições superiores de *makespan* e rugosidade superficial.

Os resultados da comparação teórico-experimental não foram inteiramente satisfatórios, apresentando grandes desvios numéricos e uma baixa previsibilidade dos fenômenos envolvidos. Nesta análise, somente o valor de *makespan*, ainda fora de escala, foi condizente com o esperado.

Assim, o algoritmo genético se mostrou uma poderosa ferramenta para a escolha otimizada de parâmetros de corte. Contudo, para obter maior assertividade e poder utilizá-lo em larga escala, ainda é necessário o aprimoramento das equações por ele utilizadas. Para isso, é necessário um melhor entendimento dos fenômenos presentes nas operações de usinagem, a fim de prever analiticamente com maior exatidão os critérios avaliados.

## **7 RECOMENDAÇÕES FINAIS**

Por meio das análises realizadas neste trabalho e dos conhecimentos obtidos na elaboração, é sugerido para futuros estudos os seguintes aprimoramentos:

- Elaborar analiticamente uma formulação para o consumo energético total de um centro de torneamento CNC.
- Investigar diferentes metodologias para medição da potência de corte e consumo energético em operações de torneamento.
- Considerar analiticamente o tempo de aceleração do eixo árvore do torno, bem como métodos mais eficientes para medição experimental do tempo de corte.

- Realizar novamente o estudo considerando maiores porções de material, para amplificar e facilitar a medição dos critérios analisados.
- Estudar os efeitos de diferentes pesos atribuídos aos critérios de otimização do algoritmo genético.
- Analisar a aplicação da metodologia em usinagens considerando a utilização de fluidos de corte.
- Considerar uma análise experimental do desgaste e da vida da ferramenta de corte.
- Adicionar os custos de fabricação aos critérios avaliados pelo algoritmo genético.

## REFERÊNCIAS

AGENDA brasileira para a Indústria 4.0: O Brasil preparado para os desafios do futuro. Um incentivo da: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), Ministério da Indústria Comercio e Serviço, Governo Federal. Disponível em: <http://www.industria40.gov.br/>. Acesso em: 20 jul. 2020.

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. DOS S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análises de Dimensões**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1977.

AMORIN, H. **Processos de Fabricação por Ussinagem: Acabamento Superficial**. Porto Alegre: DEMEC/UFRGS, 2003.

APOSTOLOS, F. et al. Energy efficiency of manufacturing processes: A critical review. **Procedia CIRP**, v. 7, p. 628–633, 2013.

ASILTÜRK, İ.; AKKUŞ, H. Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. **Measurement**, jul. 2011.

BAZZO, W. A.; PEREIRA, L. T. DO V. **Introdução à Engenharia**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2006.

BOOTHROYD, G. **Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools**. 2. ed. [s.l.] CRC Press, 1988.

BORGES, J. B. **Módulo III: Usinagem Básica**. Araranguá: [s.n.].

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CARARETO, E. S. et al. Gestão Estratégica de Custos: custos na tomada de decisão. **Revista de Economia da UEG**, v. 2, n. 2, 2006.

CARNEIRO JR, S. et al. **No TitleAplicação de Algoritmo Genético na Otimização**

**da Operação de Unidades Termoelétricas a Ciclo Combinado.** Rio de Janeiro: [s.n.].

COLHEIRINHAS, G. B. **Ferramenta de Otimização via Algoritmos Genéticos com Aplicações em Engenharia.** [s.l.] Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia, 2016.

CORMEN, T. H. et al. **Introduction to Algorithms.** 3. ed. London, England: MIT Press (MA), 2009.

COUTINHO, K. D. **Método de Otimização Topológica em Estruturas Tridimensionais.** [s.l: s.n.].

DINIZ, A. E. **A Rugosidade Superficial da Peça em Processos de Torneamento: Critério de Fim de Vida da Ferrament e Fatores de Influência.** [s.l.] Universidade Federal de Campinas, 1989.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 7. ed. São Paulo: Artliber, 2010.

EDUARDO, S.-H.; GISELLE, S.-A. Estrategias evolutivas para la minimización del makespan en una máquina con tiempos de preparación dependientes de la secuencia. **Ingeniería, Investigación y Tecnología**, v. 15, n. 1, p. 1–10, 2014.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** São Carlos: Edgard Blucher LTDA., 1969.

FERREIRA, A. . DE H. **Mini Aurélio: o dicionário da língua portuguesa.** 8. ed. Curitiba: [s.n.].

FRASCATI, G. et al. **Algoritmos para minimização do makespan em ambiente de máquina única com tempos de setup dependentes da sequência.** Blumenau: XLIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2017.

GAITONDE, V. N.; KARNIK, S. R.; DAVIM, J. P. Optimal mql and cutting conditions determination for desired surface roughness in turning of brass using genetic algorithms. **Machining Science and Technology**, v. 16, n. 2, p. 304–320, abr. 2012.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. 1. ed. MA: Assison-Wesley, 1989.

GUPTA, J. N. D.; HO, J. C. Minimizing flowtime subject to optimal makespan on two identical parallel machines. **Pesquisa Operacional**, v. 20, n. 1, p. 05–17, jun. 2000.

HAMMES, J. M.; ROSA, A. F. P.; WALKER, E. Optimization of Surface Finish in Cylindrical External Turning a SAE 1045 steel. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, v. 12, n. 2, p. 138–156, 1 jun. 2017.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. 1. ed. London, England: MIT Press (MA), 1975.

ICEL (Manaus). **Manual de instruções do alicate wattímetro modelo AW-4700**. Manaus, 2010. Disponível em: [www.icel-manaus.com.br](http://www.icel-manaus.com.br). Acesso em: 05 fev. 2021.

JI, M.; WANG, J.-Y.; LEE, W.-C. Minimizing resource consumption on uniform parallel machines with a bound on makespan. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 12, p. 2970–2974, dez. 2013.

JIA, Z. et al. Bi-criteria ant colony optimization algorithm for minimizing makespan and energy consumption on parallel batch machines. **Applied Soft Computing**, v. 55, p. 226–237, jun. 2017.

KAMARUL BAHRAIN, M. A. et al. Industry 4.0: a review on industrial automation and robotic. **Jurnal Teknologi**, v. 78, n. 6–13, 28 jun. 2016.

KRONENBERG, M. **Grundzüge der Zerspanungslehre: Mehrschneidige Zerspanung**. 1954. ed. Berlin: Springer Verlag, 1954.

LACERDA, E. G. M.; CARVALHO, A. C. P. L. F. Introdução aos Algoritmos Genéticos. In: GALVÃO, C. O.; VALENÇA, M. J. SILVA (Eds.). . **Sistemas Inteligentes – Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1999. p. 99–148.

LI, K. et al. Parallel machine scheduling problem to minimize the makespan with resource dependent processing times. **Applied Soft Computing**, v. 11, n. 8, p. 5551–5557, dez. 2011.

LIMA, F. E.; ROLIM, F. R. Efeitos dos parâmetros de corte na qualidade de peças usinadas pelo processo de torneamento. **Revista Tecnologia**, v. 34, n. 1/2, p. 97–103, 2013.

LV, J. et al. An investigation into methods for predicting material removal energy consumption in turning. **Journal of Cleaner Production**, v. 193, p. 128–139, ago. 2018.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo: DEEME - UFU, 2009.

MATOS, A. C. DE et al. Planejamento e Controle da Produção: Um Estudo em Uma Empresa de Pequeno Porte do Setor Metalúrgico. **Mostra de Iniciação Científica, Pós-graduação, Pesquisa e Extensão**, v. 3, n. 2014, p. 1–16, 1 dez. 2014.

MELO, T. Q. W. F. **Emprego de Algoritmos Genéticos na Generalização de Modelos Digitais de Superfície**. [s.l.] Instituto Militar de Engenharia, 2008.

MITCHELL, M. **An Introduction to Genetic Algorithms**. 1. ed. Cambridge, Massachusetts: MIT Press (MA), 1998.

OLIVEIRA, L. E. S.; ÁLVARES, A. J. [s.l.]: Revista Produção e Desenvolvimentos, 2018.

OLIVIERI, B. P. **Otimização do Projeto de Pontes Protendidas Pré-Moldadas pelo Método dos Algoritmos Genéticos**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro,

2004.

PATEL, V. D.; GANDHI, A. H. Analysis and modeling of surface roughness based on cutting parameters and tool nose radius in turning of AISI D2 steel using CBN tool. **Measurement**, v. 138, p. 34–38, maio 2019.

PELEGRINO, D. H. **Estudo do Consumo de Energia Elétrica em Máquinas-Ferramentas**. [s.l.] Escola de Engenharia de São Carlos, 2018.

PERREIRA, J. C. C. **Determinação de Modelos de Vida de Ferramenta e Rugosidade no Torneamento do Aço ABNT 52100 Endurecido Utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta (DOE)**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2006.

PETKOVIC, D.; RADOVANOVIC, M. Using genetic algorithms for optimization of turning machining process. **Journal of Engineering Studies and Research**, v. 19, n. 1, 30 ago. 2016.

RAFAEL, G. C. et al. Minimização De Makespan E Consumo Energético Em Sistemas a Eventos Discretos. **Proceedings XXII Congresso Brasileiro de Automática**, n. September, 2018.

RAO, R. N. **Manufacturing Technology: Metal Cutting and Machine Tools**. 4. ed. Chennai: McGraw Hill Education (India) Private Limited, 2018.

ROCHA, J.; RAMOS, C.; VALE, Z. **Process Planning Using a Genetic Algorithm Approach**. Porto: International Symposium on Assembly and Task Planning, 1999.

ROSADO DE PAULA, T.; BENINI, L. Influência Da Velocidade De Corte Do Processo De Torneamento Nos Resultados De Rugosidade Do Aço ABNT 1020. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 3, n. 1, 6 mar. 2017.

SANTOS, B. P. et al. **Indústria 4.0: Desafios e Oportunidades**. [s.l.]: Revista Produção e Desenvolvimentos, 2018.



STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1993.

TESA SARL (Switzerland). **Rugosurf 20 portable roughness tester**. Renens, 2019. Disponível em: [www.tesatechnology.com](http://www.tesatechnology.com). Acesso em: 05 fev. 2021.

TSURUTA, J. H.; NARCISO, M. G. **Um Estudo Sobre Algoritmos Genéticos**. Campinas: EMBRAPA, 2000.

TUBINO, D. F. **Manual de planejamento e controle da produção**. 2. ed. São Paulo: [s.n.].

U.S ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **International Energy Outlook 2016**. Washington: [s.n.]. v. 0484

VÉLEZ-GALLEGO, M. C.; MAYA, J.; MONTOYA-TORRES, J. R. A beam search heuristic for scheduling a single machine with release dates and sequence dependent setup times to minimize the makespan. **Computers and Operations Research**, 2016.

WALKER, J. R. **Machining Fundamentals: From Basic to Advanced Techniques**. 6. ed. [s.l.] Goodheart-Willcox Company, 1998.

ZHOU, L. et al. An improved cutting power model of machine tools in milling process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, n. 5–8, p. 2383–2400, 4 jul. 2017.

## Apêndice A – Código de Entrada Algoritmo Genético (JSON)

```
{
  "operations":
    [{"id": "Desbaste",
      "cutting_speed":
        {"min": 50, "max": 175},
      "cutting_depth":
        {"min": 1, "max": 3},
      "cutting_feed":
        {"min": 0.1, "max": 0.5}
    },
    {"id": "Acabamento",
      "cutting_speed":
        {"min": 50, "max": 175},
      "cutting_depth":
        {"min": 0.05, "max": 1},
      "cutting_feed":
        {"min": 0.01, "max": 0.5}
    }
  ],
  "tools":
    [{"id": "Ferramenta 1", "tool_tip_radius": 0.8}],
  "tasks":
    [{"order_number": 1, "operation": "Desbaste", "tool": "Ferramenta 1",
      "part_diameter": 15, "advancement_path": 50},
    {"order_number": 2, "operation": "Acabamento", "tool": "Ferramenta 1",
      "part_diameter": 10, "advancement_path": 50}],
  "configuration":
    {"stop_condition": {
      "seconds": 300,
      "generations": 100000
    }}
}
```

```
},  
  "weights":  
    {"energy": 0.3,  
     "roughness": 0.1,  
     "makespan": 0.3,  
     "damage": 0.3},  
  "optimisation_parameters":{  
    "population_size": 10,  
    "elite_size": 3,  
    "mutation_rate": 0.2  
  },  
  "decimal_cases": 3,  
  "minimum_tool_lifetime": 240},  
"calculation_variables":{  
  "engine_efficiency": 0.9,  
  "n": 0.2,  
  "C": 182,  
  "C0": 197.75,  
  "g": 0.22,  
  "f": 0.41,  
  "y": 0.15  
}  
}
```

**Apêndice B - Código de Saída do Algoritmo Genético**

```
{
  "valid_schedule": true,
  "consumed_energy": 150.624364,
  "roughness": 0.007898076923076923,
  "makespan": 0.04187360637237869,
  "damage": 0.021919977209038422,
  "tasks": [
    {
      "order": 1,
      "operation": "Desbaste",
      "tool": "Ferramenta 1",
      "cutting_speed": 146.635,
      "cutting_depth": 2.49,
      "cutting_feed": 0.5,
      "consumed_energy": 147.570846,
      "makespan": 0.021638821428210803,
      "tool_lifetime": 240.61777720347345
    },
    {
      "order": 2,
      "operation": "Acabamento",
      "tool": "Ferramenta 1",
      "cutting_speed": 174.839,
      "cutting_depth": 0.05,
      "cutting_feed": 0.444,
      "consumed_energy": 3.053518,
      "makespan": 0.020234784944167895,
      "tool_lifetime": 17317.264333402305
    }
  ],
  "statistics": {
    "generations_weights_mean": {
```

```

"first_generation": {
  "consumed_energy_mean": 190.056190,
  "roughness_mean": 0.002233249198717949,
  "makespan_mean": 0.1765675277096651,
  "damage_mean": 0.07196301395789585
},
"last_generation": {
  "consumed_energy_mean": 150.986485,
  "roughness_mean": 0.008849467147435897,
  "makespan_mean": 0.04566666844954224,
  "damage_mean": 0.027687232204777017
}
},
"last_and_first_generation_best_schedules_difference": {
  "consumed_energy_difference": -2.0690871783224996,
  "roughness_difference": 0.0012940705128205122,
  "makespan_difference": -0.03089193860593066,
  "damage_difference": -0.003862103856898575
},
"best_first_generation_schedule": {
  "valid_schedule": true,
  "consumed_energy": 170.914255,
  "roughness": 0.00660400641025641,
  "makespan": 0.07276554497830935,
  "damage": 0.025782081065936997,
  "tasks": [
    {
      "order": 1,
      "operation": "Desbaste",
      "tool": "Ferramenta 1",
      "cutting_speed": 84.144,
      "cutting_depth": 2.015,
      "cutting_feed": 0.444,
      "consumed_energy": 117.072427,

```

```
"makespan": 0.04932712546926667,  
"tool_lifetime": 21014.8985094804  
},  
{  
  "order": 2,  
  "operation": "Acabamento",  
  "tool": "Ferramenta 1",  
  "cutting_speed": 165.069,  
  "cutting_depth": 0.866,  
  "cutting_feed": 0.406,  
  "consumed_energy": 53.841828,  
  "makespan": 0.0234384195090427,  
  "tool_lifetime": 998.4731380585083  
}  
]  
}  
}
```

**Apêndice C – Programação CNC**

O0011

N10 G21 G40 G90

N20 G54 G00 X200 Z200

N30 T0606 (FERRAMENTA-POSICIONAMENTO)

N40 G54

N50 X0 Z0

N60 M5

N70 M00 (POSICIONAMENTO-DA-PECA)

N80 G00 Z200

N90 X200

N100 T0202 (DESBASTE-LIMPEZA)

N110 G96 S200

N120 G92 S3000 M04

N130 G00 X16 Z2 (X=DIAMETRO-PECA-BRUTA)

N140 G71 U0.5 R2 (DESBASTE-DIAMETRO-15MM)

N150 G71 P160 Q180 U0 W0 F0.5

N160 G01 X15 Z0

N170 Z-50

N180 X16 (DIAMETRO-BARRA-BRUTA)

N190 G00 X200 Z200

N200 T0202 (DESBASTE)

N210 G00 X15 Z2 (X=DIAMETRO-PECA-BRUTA)

N220 M5

N230 M00 (CONFERIR-COLETA-DE-DADOS-DESBASTE)

N240 G96 **S146.635** (SPEED-DES)

N250 G92 S5500 M04

N260 G71 **U2.49** R2 (DES-D-10MM)(DEEP-DES)N270 G71 P280 Q300 **U0.05** W0 **F0.5** (DEEP-ACA)(FEED-DES)

N280 G01 X10 Z0

N290 Z-50

N300 X15 (DIAMETRO-BARRA-BRUTA)

N310 M5

N320 M00 (CONFERIR-COLETA-DE-DADOS-FIM-DESBASTE)

N330 G00 X200 Z200  
N340 T0202 (ACABAMENTO)  
N350 G00 X10 Z2  
N360 M5  
N370 M00 (CONFERIR-COLETA-DE-DADOS)  
N380 G96 **S174.839** (SPEED-ACA)  
N390 G92 S5500 M04  
N400 G01 X10 Z-49 **F0.444** (FEED-ACA)  
N410 X20  
N420 M5  
N430 M00 (CONFERIR-COLETA-DE-DADOS)  
N440 G00 X200 Z200  
N450 T0606 (BEDAME)  
N460 G00 X18 Z-50  
N470 G96 S120 (ROTACAO-PARA-CORTE)  
N480 G92 S500 M04  
N490 G75 R3  
N500 G75 X0 Z-50 P2000 Q0 F0.05  
N510 G54 G00 X200 Z200  
N520 M30

\*Os valores em negrito representam os parâmetros de corte que devem ser modificados a cada configuração a ser estudada.