



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

Enéas Róssi Neto

Método de seleção para tecnologias de carga e descarga de peças seriadas em diferentes condições de torneamento

CAMPINAS
2018

ENÉAS RÓSSI NETO

Método de seleção para tecnologias de carga e descarga de peças seriadas em diferentes condições de torneamento

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, na Área de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO ENÉAS RÓSSI NETO, E ORIENTADO PELO PROF. DR. AMAURI HASSUI.

.....
ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS
2018**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

R819m Róssi Neto, Enéas, 1980-
Método de seleção para tecnologias de carga e descarga de peças
seriadas em diferentes condições de torneamento / Enéas Róssi Neto. –
Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Amauri Hassui.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Mecânica.

1. Manufatura. 2. Torneamento. 3. Carga e descarga. I. Hassui, Amauri,
1967-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Selection method for load and unload technologies of mass
production parts in different turning conditions

Palavras-chave em inglês:

Manufacture

Turning

Load and unload

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Amauri Hassui [Orientador]

Nivaldo Lemos Coppini

Marcos Valério Ribeiro

Armando Italo Sette Antonialli

Daniel Iwao Suyama

Data de defesa: 22-08-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MANUFATURA E MATERIAIS

TESE DE DOUTORADO

Método de seleção para tecnologias de carga e descarga de peças seriadas em diferentes condições de torneamento

Autor: **Enéas Róssi Neto**

Orientador: prof. **Dr. Amauri Hassui**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

Prof. Dr. Amauri Hassui, Presidente
Universidade Estadual de Campinas - Unicamp

Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini
Universidade Estadual de Campinas – Unicamp

Prof. Dr. Daniel Iwao Suyama
Universidade Estadual de Campinas – Unicamp

Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Universidade Estadual Paulista – UNESP

Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antoniali
Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 22 de Agosto de 2018.

Dedicatória

Dedico esta tese de doutorado à Deus, aos meus pais e aos meus irmãos, que sempre estiveram presentes em todos os momentos da minha vida.

Agradecimentos

Esta tese de doutorado não poderia ser concluída sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minhas homenagens:

Primeiramente agradeço à Deus, infinitamente justo e bom!

Novamente agradeço à minha família, principalmente à minha Mãe, ao meu Pai “*in memoriam*” e aos meus Irmãos, pelo incentivo e suporte prestados em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador Amauri Hassui, que me mostrou os caminhos a serem seguidos.

A minha namorada Isabele, pela convivência, companheirismo e confiança.

Ao meu sócio Milton Sakaguti da MN Engenharia e aos demais companheiros de profissão, que confiam no meu trabalho e apoiam minhas ações profissionais e acadêmicas.

Ao meu primo Rafael Rossi, que contribuiu com idéias e na elaboração do *software* para o método proposto por esta tese de doutorado.

A todas as empresas e colegas de profissão que disponibilizaram tempo, recursos, informações e companheirismo, pois diversos profissionais contribuíram para a elaboração desta tese de doutorado.

Aos meus amigos, com quem incontáveis vezes desabafei externando minhas dificuldades em conciliar minhas responsabilidades profissionais e acadêmicas.

A todos os professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

A todos, minha gratidão eterna!

“Voar, voar alto, mas
sempre mantendo os pés
firmes no chão.”

Resumo

As reduções dos custos de manufatura são fundamentais para todas as empresas. Isso contribui para melhores resultados e possibilita aumentar a lucratividade de seus acionistas. No caso do setor metal-mecânico que utiliza os processos de torneamento para usinagem seriada, as empresas visam reduzir seus custos continuamente, principalmente por meio da redução da mão de obra e dos tempos operacionais. Diversas empresas estão se esforçando para aumentar a eficiência e a produtividade dos seus processos, sendo isso muitas vezes possível apenas mediante novas tecnologias de manufatura. O tempo de ciclo da operação, neste caso, o tempo de usinagem, pode ser decomposto em tempos efetivos de corte, tempos passivos das máquinas-ferramenta e tempos para carga e descarga. A parcela dos tempos efetivos de corte é a mais explorada, sendo o principal foco dos estudos científicos e dos fabricantes de ferramentas de corte. Já os tempos passivos são explorados basicamente pelos fabricantes de máquinas-ferramenta. Comparando-se máquinas com o mesmo nível tecnológico, observam-se similaridades que pouco diferenciam uma das outras e, assim, não sugerem reduções expressivas nos tempos finais de usinagem. Finalmente, tem-se a parcela dos tempos para carga e descarga das máquinas-ferramenta, que são tempos totalmente improdutivos, os quais cada vez mais estão sendo explorados pelas empresas de usinagem e que é o objeto de estudo desta tese de doutorado. Esta tese propõe um método seletivo para indicar quais tecnologias de carga e descarga são mais adequadas para torneamento de peças seriadas, em diversas condições de manufatura e com os meios mais frequentemente utilizados, simulando o melhor custo por peça para cada tipo de aplicação. O método proposto foi simulado em empresas que usinam peças com as características consideradas e em regimes de produção seriados, nas quais os resultados verificados foram compatíveis com os casos práticos analisados. Os cálculos de tempos, capacidades e custos por peça apresentaram resultados confiáveis, validando a utilização do método para selecionar quais tecnologias de carga e descarga são mais adequadas para diferentes condições de torneamento. O método seletivo proposto por esta tese contribui para as empresas de usinagem de peças torneadas com as características analisadas, no sentido de apoio para tomada de decisões, de forma a disponibilizar informações para melhorias dos processos atuais e também para análises de novos investimentos em máquinas-ferramenta.

Palavras-chave: manufatura; torneamento; carga e descarga.

Abstract

Reducing manufacturing costs is fundamental for all companies, in order to contribute with better manufacturing margins and also increase profitability for the companies' shareholders. In the metal-cutting market that uses the turning process in mass production conditions, companies are constantly struggling to reduce costs, mainly through cutting down on human labor as well as production lead time reduction. Several companies are striving to increase efficiency and productivity in its processes, often being possible only through new manufacturing technologies. The production cycle time, in this case the machining time, is decomposed by the effective cutting times with material removal, machine-tools idle times and the load and unload times. The effective cutting times are the most explored, being the main focus of scientific researches, and also is the focus of metal working tools manufacturers. On the other hand, the machine-tools idle times are explored basically by the machine's manufacturers. Comparing machines with the same technological level, we observe similarities that little differentiate one from the others and thus do not suggest significant reductions in the final machining cycle time. Finally there is the load and unload times, which are periods of total inactivity, that are increasingly being explored by the machining companies and will be the main focus of this investigation. This thesis proposes a method for selecting load and unload technologies that are most suitable for turning mass production, under different manufacturing conditions and with the most frequent resources, simulating the best cost per part for each type of application. The proposed method was simulated in different machining companies, applied in parts with the considered features and in serial production conditions, and the verified results were compatible with the practical cases analyzed. The calculations of cycle times, capacities and costs per part presented reliable results, validating the use of the method to select which loading and unloading technologies are more suitable for different turning conditions. The selection method proposed by this thesis will contribute to companies that uses these processes in their manufacture turning parts, in order to support for decision-making, providing information to improve actual processes and also to aid companies toward the acquisition of new equipment that will better suit for their needs.

Keywords: manufacture; turning; load and unload.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Contextualização do tema proposto para esta tese de doutorado	24
Figura 2.2 – Exemplos de automações para carga e descarga em centros de torneamento	26
Figura 2.3 – Operação de torneamento externo	27
Figura 2.4 – Principais tipos de operações de torneamento	28
Figura 2.5 – Tornos utilizados na antiguidade	29
Figura 2.6 – Famílias de peças cilíndricas usinadas em tornos	29
Figura 2.7 – Torno mecânico utilizado atualmente	31
Figura 2.8 – Principais características de um torno CNC	32
Figura 2.9 – Tipos de tornos CNC	33
Figura 2.10 – Centro de torneamento com e sem carenagem, em CAD 3D e físico	34
Figura 2.11 – Estrutura mecânica de um centro de torneamento	35
Figura 2.12 – Alimentador de barras e aparador de peças integrados a um centro de torneamento	38
Figura 2.13 – Aparador de peças e caixa coletora	39
Figura 2.14 – Aparadores de peças com e sem acúmulo de cavacos	40
Figura 2.15 – Exemplos de peças usinadas a partir de barras	40
Figura 2.16 – Magazine para armazenamento de barras	41
Figura 2.17 – Sistema tipo calha, demonstrando o avanço das peças pela ação da gravidade	42
Figura 2.18 – Exemplo de um magazine mecanizado combinado com um aparador de peças, onde a torre porta-ferramentas transfere a peça bruta do ponto de carga para a placa de fixação	43
Figura 2.19 – Ilustração de um sistema <i>poka yoke</i>	44

Figura 2.20 – Exemplos de magazines mecanizados para peças tipo eixos: a) Calha para carregamento; b) Descarregamento através do 2º cabeçote e c) Bandeja para descarregamento	44
Figura 2.21 – Alimentador vibratório integrado a um centro de torneamento	45
Figura 2.22 – Combinação de um alimentador vibratório com um sistema de calha, com carregamento das peças pela torre-porta ferramentas em um centro de torneamento	45
Figura 2.23 – Exemplo de um robô articulado vertical integrado a um centro de torneamento	47
Figura 2.24 – Robô articulado vertical com indicações dos elos e juntas que constituem a sua estrutura	47
Figura 2.25 – Célula de torneamento automatizada, com os periféricos necessários para o funcionamento do robô articulado vertical	48
Figura 2.26 – Exemplos de robôs articulados aplicados em: a) <i>Top Loader</i> ; b) <i>Track Motion</i> e c) Integrado na estrutura da máquina	49
Figura 2.27 – Exemplo de aplicação de um manipulador pórtico para uma linha de torneamento	51
Figura 2.28 – Ilustração do acesso do operador nos diferentes tipos de células automatizadas: a) Manipulador pórtico e b) Robô articulado vertical	51
Figura 2.29 – Estrutura de um manipulador pórtico integrado a um centro de torneamento duplo frontal	52
Figura 2.30 – Sistemas de garras para manipuladores pórticos: a) Garras para eixos e b) Garras para <i>blanks</i>	52
Figura 2.31 – Aplicações de manipuladores pórticos em centros de torneamento: a) com fuso horizontal e b) com fusos frontais	53
Figura 2.32 – Conceito construtivo de um centro de torneamento com trocador de placas	54
Figura 2.33 – Conceito funcional e construtivo do mecanismo trocador de placas	55
Figura 2.34 – Exemplos de automações integradas aos centros de torneamento com trocadores de placas	56
Figura 2.35 – Centro de torneamento horizontal com trocador de placas duplo	57

Figura 2.36 – Centro de torneamento vertical com trocador de placas duplo	57
Figura 2.37 – Parcelas que compõem o tempo de ciclo de usinagem	61
Figura 2.38 – Estrutura típica de custos em uma empresa de usinagem para produção de peças seriadas	67
Figura 3.1 – Resumo das parcelas que compõem o método seletivo proposto	68
Figura 3.2 – Tecnologias de carga e descarga analisadas	71
Figura 3.3 – Ilustração das possibilidades de operações consideradas	72
Figura 3.4 – Exemplos de peças torneadas e que são contempladas pelo método seletivo proposto	75
Figura 3.5 – Envelope de usinagem teórico para representar os tipos de peças contempladas pelo método seletivo proposto e o exemplo de uma peça compreendida pelo envelope de usinagem estabelecido	76
Figura 3.6 – Ilustração do eixo-árvore demonstrando as capacidades de torneamento consideradas	78
Figura 3.7 – Cálculos do tempo de ciclo e das capacidades produtivas, mostrando onde são utilizados os dados de entrada e os dados verificados experimentalmente	80
Figura 3.8 – Cálculos das necessidades de máquinas e de operadores, mostrando onde são utilizados os dados de entrada e os dados verificados experimentalmente	81
Figura 3.9 – Custos considerados pelo método seletivo proposto	82
Figura 3.10 – Cálculos do custo operacional e da tecnologia de manufatura, mostrando onde são utilizados os dados pesquisados nas empresas de usinagem e com os fabricantes	82
Figura 3.11 – Combinações das tecnologias de carga e descarga com as possibilidades de operações, que são calculadas automaticamente pelo método seletivo proposto	84
Figura 3.12 – Esquema do cálculo de custo por peça “parcial”, para demonstrar que a tecnologia de torneamento é a única constante nos cálculos realizados pelo método seletivo proposto	85
Figura 3.13 – Resultados de custos por peça “parciais”, ordenados para o tipo de operação selecionada	86

Figura 3.14 – Dados calculados e disponibilizados pelo método para a operação selecionada	86
Figura 4.1 – Gráfico comparativo para os tempos de carga e descarga das tecnologias analisadas, em cada uma das possibilidades de operações consideradas	91
Figura 4.2 – Gráfico comparativo para as eficiências produtivas das tecnologias analisadas, em cada uma das possibilidades de operações consideradas	94
Figura 4.3 – Resumo dos valores dos centros de torneamento para operação única	100
Figura 4.4 – Resumo dos valores dos centros de torneamento para operações 10 e 20 na mesma máquina	100
Figura 4.5 – Resumo dos valores dos centros de torneamento para operações 10 e 20 em máquinas distintas	101
Figura 4.6 – Gráfico comparativo com os valores menores, maiores e médios verificados para os centros de torneamento, nas possibilidades de operações consideradas	102
Figura 4.7 – Gráfico comparativo com os valores médios verificados para as tecnologias de carga e descarga analisadas e que foram considerados no método seletivo proposto	106
Figura 4.8 – Gráfico comparativo com o resumo dos valores para as tecnologias de manufatura analisadas	108
Figura 4.9 – Custos operacionais médios por estado	110
Figura 4.10 – Tela principal do <i>software</i> elaborado, junto com as considerações e premissas assumidas para o método seletivo proposto	111
Figura 4.11 – Tela para inclusão dos dados de entrada para o processo de torneamento em análise	112
Figura 4.12 – Tela com os parâmetros base <i>default</i> para as tecnologias de carga e descarga analisadas	112
Figura 4.13 – Tela para edição dos parâmetros base <i>default</i> , para cada uma das combinações consideradas	112
Figura 4.14 – Tela com os dados de câmbio <i>default</i> para as tecnologias de carga e descarga analisadas	113

Figura 4.15 – Tela para cadastramento das tecnologias de carga e descarga nas possibilidades de operações consideradas	113
Figura 4.16 – Tela com os parâmetros de ajuste a serem selecionados pelo usuário do método seletivo	115
Figura 4.17 – Resultados do Caso A: Alimentador de barras combinado com aparador de peças	116
Figura 4.18 – Resultados do Caso B: Magazines mecanizados combinados com aparadores de peças	117
Figura 4.19 – Resultados do Caso C: Robô articulado vertical integrado a uma célula automatizada	118
Figura 4.20 – Resultados do Caso D: Manipulador pórtico	119
Figura 4.21 – Resultados do Caso E: Centro de torneamento com trocador de placas	120

Lista de Quadros

Quadro 2.1 – Substituição dos atributos humanos conforme o grau de automação	25
Quadro 3.1 – Dados de entrada requeridos pelo método seletivo proposto	70
Quadro 3.2 – Capacidades de torneamento para os equipamentos considerados	78
Quadro 3.3 – Cálculos realizados pelo método seletivo proposto	79
Quadro 3.4 – Exemplo com resultados de custos por peça “parciais”, para cada uma das combinações possíveis	85
Quadro 4.1 – Tempos de carga e descarga obtidos durante os procedimentos experimentais	89
Quadro 4.2 – Resumo dos tempos de carga e descarga avaliados	90
Quadro 4.3 – Eficiências produtivas e quantidades de máquinas conduzidas por operador obtidas durante os procedimentos experimentais	92
Quadro 4.4 – Resumo dos eficiências produtivas avaliadas	94
Quadro 4.5 – Resumo das quantidades de máquinas conduzidas por operador avaliadas	95
Quadro 4.6 – Valores pesquisados para os centros de torneamento	99
Quadro 4.7 – Valores pesquisados para as tecnologias de carga e descarga, para as diferentes possibilidades de operações consideradas	103
Quadro 4.8 – Resumo dos valores verificados para os manipuladores p ^ó rticos	105
Quadro 4.9 – Resumo dos valores finais para as tecnologias de manufatura, considerados como dados <i>default</i> no método seletivo proposto	107
Quadro 4.10 – Custos operacionais anuais informados pelas empresas pesquisadas	109
Quadro 4.11 – Resumo dos resultados dos estudos de casos após a inclusão dos parâmetros de ajuste	121

Lista de Abreviaturas e Siglas

CAD – *Computer Aided Design*: Desenho Assistido por Computador

CNC – *Computer Numeric Control*: Controle Numérico Computadorizado

DIN – *Deutsche Institut für Normung*: Instituto Alemão de Normalizações

FOB – *Free on Board*: Termo internacional para comércio

NC – *Numerically Controlled*: Controlado Numericamente

ISO – *International Organization for Standardization*: Organização Internacional para Padronização

G0 – Código para deslocamento rápido da ferramenta em programação ISO

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	19
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	23
2.1 Sistemas de manufatura.....	23
Automação.....	25
2.2 Torneamento.....	27
2.2.1 Definições e histórico.....	27
2.2.2 Tipos de tornos.....	30
Torno mecânico.....	30
Torno CNC.....	31
Centro de torneamento.....	34
2.3 Tecnologias de carga e descarga para tornos.....	36
2.3.1 Alimentador de barras e aparador de peças.....	38
2.3.2 Magazine mecanizado.....	42
2.3.3 Robô articulado vertical.....	46
2.3.4 Manipulador pórtico.....	50
2.3.5 Trocador de placas.....	54
2.4 Tempos de usinagem.....	58
2.5 Custos de usinagem.....	63
3 MÉTODO.....	68
3.1 Dados de entrada.....	69
3.2 Premissas para as tecnologias de carga e descarga analisadas.....	70
3.2.1 Monitoramento das tecnologias de carga e descarga para obtenção de dados reais... 73	
3.2.2 Representação dos tipos de peças contemplados pelo método seletivo proposto	75
3.2.3 Características dos equipamentos referentes às suas capacidades de torneamento....	77

3.3 Definições e cálculos	78
3.4 Resultados apresentados pelo método seletivo proposto.....	84
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	87
4.1 Tempos, eficiências e condições de operação das tecnologias avaliadas.....	87
4.2 Custos das tecnologias de manufatura avaliadas.....	96
4.3 Custos operacionais	108
4.4 Estudos de casos com o método seletivo proposto.....	111
5 CONCLUSÃO.....	124
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

1 INTRODUÇÃO

Toda empresa tem como propósito principal gerar lucros para seus acionistas. Para isso, faz-se necessário promover continuamente aumentos de eficiência e de produtividade nos seus processos, de forma a contribuir com a redução dos custos de manufatura. Na busca da competitividade imposta pelo mercado de usinagem, cada vez mais faz-se necessário que o operador de máquinas dedique seu tempo a tarefas nobres, deixando de realizar atividades como o carregamento e descarregamento manual de peças em um torno CNC. Uma grande parte das empresas relacionadas ao setor metal mecânico, utiliza os processos de usinagem na manufatura dos seus produtos, justamente onde esta tese contribui com o método seletivo proposto.

Os tempos das operações que compõem o processo de manufatura, neste caso, os tempos de usinagem, são decompostos em: a) tempos efetivos de corte, onde ocorre o contato efetivo entre as ferramentas e a peça; b) tempos passivos das máquinas-ferramenta, para deslocamentos dos eixos controlados, inércias, trocas das ferramentas e acionamentos dos recursos tecnológicos muitas vezes requeridos; e c) tempos para carga e descarga, que são os tempos operacionais que ocorrem sempre com a máquina fora de funcionamento.

O tempo em que a máquina-ferramenta está produzindo é decomposto pelos tempos efetivos de corte e pelos tempos passivos, período em que a máquina-ferramenta permanece com a porta fechada, promovendo remoção de material por meio dos processos de usinagem. A parcela tempos efetivos de corte é certamente a mais explorada, sendo o principal foco dos estudos científicos e dos fabricantes de ferramentas de corte. Já os tempos passivos são basicamente explorados pelos fabricantes das máquinas-ferramenta. Comparando máquinas com o mesmo nível tecnológico, observam-se similaridades que pouco diferenciam umas das outras, e assim, não sugerem reduções expressivas nos tempos finais de usinagem. De forma independente têm-se os tempos para carga e descarga das máquinas-ferramenta, nos quais as máquinas permanecem com as portas abertas, logo, não produzindo. Por serem tempos totalmente improdutivos, as empresas de usinagem cada vez mais estão investindo em recursos tecnológicos para minimizá-los, sendo portanto o objeto de estudo desta tese de doutorado.

Esta tese de doutorado teve como objetivo propor um método para selecionar quais tecnologias de carga e descarga são mais adequadas, especificamente para o torneamento de peças seriadas, em diferentes condições de manufatura. O objeto de análise foram os tempos de carga e descarga dos processos de torneamento, que são tempos totalmente improdutivos e que

vêm sendo explorados pelas empresas de usinagem. O produto desta tese foi um *software* para simulação do método proposto, que possui um banco de dados *default* obtido durante os procedimentos experimentais realizados e que pode ser alterado pelo usuário caso julgue necessário, para melhorar os resultados pretendidos para o processo de torneamento em análise.

Na revisão da literatura, são apresentados os conceitos associados aos sistemas de manufatura, em relação à contextualização do tema e sobre às tecnologias de automação que podem ser empregadas. Em seguida, são apresentadas as definições do processo de torneamento e a evolução histórica dos tornos, desde a sua origem até os centros de torneamento atuais, que são utilizados para a produção de peças seriadas. Na sequência, são tratadas as tecnologias para carga e descarga mais utilizadas atualmente, onde são observadas as aplicações mais adequadas para cada tipo de manufatura, abordando as principais características funcionais e construtivas destas tecnologias. Então, são detalhados os tempos de usinagem, com definições sobre as parcelas que compõem o tempo total de ciclo de uma peça, assim como os respectivos cálculos para projeções de produtividade e de necessidades em termos de manufatura. Por fim, são apresentados os custos de usinagem, com definições e generalidades sobre o estudo dos custos.

No capítulo seguinte, é apresentado o método seletivo proposto por esta tese de doutorado. Inicialmente, são apresentados os dados de entrada requeridos e, em seguida, são apresentadas as tecnologias de carga e descarga consideradas, assim como as possibilidades de operações para cada uma delas. A seguir, é mencionada a parte experimental da tese, que consiste em monitorar em condições de produção reais as tecnologias de carga e descarga analisadas, para posteriormente aplicar os resultados obtidos como parâmetros base *default* no método seletivo proposto. Depois, são delimitados os cenários analisados para evitar distorções comparativas, sendo atribuídas premissas para o porte dimensional das peças e para as características dos equipamentos referentes às suas capacidades de torneamento. A partir disso, são apresentados os cálculos realizados pelo método seletivo, de forma a esclarecer as premissas assumidas, principalmente em relação aos custos com mão de obra e aos valores dos investimentos voltados para as tecnologias investigadas (pois sem estes dados não seria possível custear as peças para as análises de viabilidades). Sobre os resultados apresentados pelo método, é demonstrada a forma comparativa que o método seleciona as tecnologias de carga e descarga mais adequadas, mediante os custos por peça das tecnologias analisadas. Esta forma de apresentação dos resultados facilita a compreensão sobre os investimentos necessários, assim como as vantagens técnicas e financeiras dos cenários avaliados.

No capítulo resultados e discussões, são apresentados os resultados obtidos com a utilização do método seletivo proposto, com discussões sobre os dados verificados durante os procedimentos experimentais, realizados nas empresas de usinagem que possuem as tecnologias de carga e descarga avaliadas. No início, são apresentados os tempos de carga e descarga, as eficiências produtivas e as quantidades de máquinas que um operador consegue conduzir, conforme os dados verificados nos procedimentos experimentais realizados. Em seguida, são apresentados os custos das tecnologias de manufatura, com os valores das tecnologias de torneamento e das tecnologias de carga e descarga que foram pesquisados, por meio de propostas comerciais dos fabricantes destas tecnologias. Então, são apresentados os custos operacionais, obtidos em diversas empresas de usinagem de diferentes regiões do país, para a definição do valor de mão de obra que passou a ser considerado pelo método. Na sequência, são mencionadas considerações sobre os estudos de casos prévios realizados com o método seletivo, que foi aplicado nas empresas de usinagem, nas quais foram realizados os procedimentos experimentais. No entanto, parte dos resultados prévios destes estudos de casos apresentaram valores diferentes dos reais e, depois de observações e análises, foram verificados outros fatores que influenciavam os resultados previamente selecionados pelo método. Finalmente, são apresentados os resultados finais dos estudos de casos realizados, após a inserção dos parâmetros de ajuste e com a configuração definitiva do método seletivo proposto, que foram considerados aceitáveis para o propósito desta tese de doutorado.

Durante os procedimentos experimentais realizados, as empresas de usinagem que tiveram seus processos avaliados foram questionadas, sobre utilizarem *softwares* ou algoritmos similares para selecionar quais tecnologias de carga e descarga são mais adequadas para os seus processos de usinagem em análise, mas nenhuma delas disse utilizar esse tipo de recurso. Segundo três das empresas analisadas, todas sistemistas automotivas e multinacionais (duas americanas e uma alemã), elas possuem *softwares* para cálculos de custo por peça, contudo os dados referentes aos meios de manufatura devem ser inseridos pelo usuário para o processo em análise (não especificamente para torneamento, sendo aplicado para os processos de usinagem de uma forma geral). Tem-se conhecimento que alguns fabricantes das tecnologias de carga e descarga possuem *softwares* para realizar cálculos de custo por peça similares, entretanto para demonstrar a viabilidade de investimento somente nos seus equipamentos (de forma individual e somente para a tecnologia que fornece, portanto não comparando com outras tecnologias que poderiam apresentar melhores resultados).

O método proposto por esta tese possibilita realizar cálculos de custo por peça para diferentes condições de manufatura, com diferentes tecnologias de carga e descarga e em diferentes possibilidades de operações, apresentando os resultados calculados de forma ordenada e comparativa, juntamente com diversas informações técnicas sobre o processo de torneamento em análise. Como conclusão, tem-se que o método que resultou desta tese de doutorado contribui para as empresas de usinagem de peças torneadas com as características analisadas, no sentido de apoio para tomada de decisões, de forma a disponibilizar informações para melhorias dos processos atuais e também para análises de novos investimentos em máquinas-ferramenta.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, são apresentados os conceitos associados aos sistemas de manufatura, em relação à contextualização do tema e sobre às tecnologias de automação que podem ser empregadas. Em seguida, são apresentadas as definições do processo de torneamento e a evolução histórica dos tornos, desde a sua origem até os centros de torneamento atuais, que são utilizados para a produção de peças seriadas. Na sequência, são tratadas as tecnologias para carga e descarga mais utilizadas atualmente, onde são observadas as aplicações mais adequadas para cada tipo de manufatura, abordando as principais características funcionais e construtivas destas tecnologias. Então, são detalhados os tempos de usinagem, com definições sobre as parcelas que compõem o tempo total de ciclo de uma peça, assim como os respectivos cálculos para projeções de produtividade e de necessidades em termos de manufatura. Por fim, são apresentados os custos de usinagem, com definições e generalidades sobre o estudo dos custos.

2.1 Sistemas de manufatura

Toda ocupação lucrativa, denominada negócio, possui um sistema de manufatura com processos específicos para a fabricação dos seus produtos. Segundo Maximiano (2005), negócio é definido como a ocupação da atividade que se realiza com fins lucrativos. Nas últimas décadas, diante dos desafios globais das economias em busca da competitividade, cada vez mais as empresas estão investindo nos seus sistemas de manufatura. Para Rios (2002) *apud* Perroni (2011), caracteriza-se um sistema definindo os seus limites (o que está dentro dele e o que está fora) e os seus processos (o que ele faz).

De acordo com Groover (2007), a palavra manufatura é derivada de duas palavras do latim, *manus* (mão) e *factus* (fazer), que significa fazer com as mãos. Nos primórdios do uso da palavra, era aplicada para a produção de itens por processos manuais e, nos dias de hoje, além deste conceito, aplica-se na transformação e produção de itens por meio de processos automatizados com o auxílio de computadores. Para Agostinho (2012), a manufatura de bens pode ser definida como um sistema que integra seus diferentes estágios de produção,

necessitando para isso dados de entrada definidos para se obter os resultados esperados. Segundo Rajeev (1998), os produtos para serem fabricados dependem de tecnologias de manufatura específicas, podendo ser compostas por máquinas ou estações de trabalhos.

No caso desta tese de doutorado, as tecnologias de manufatura analisadas referem-se aos processos de torneamento de peças seriadas. Na Figura 2.1 é apresentada uma ilustração para contextualizar o tema proposto para esta tese de doutorado.

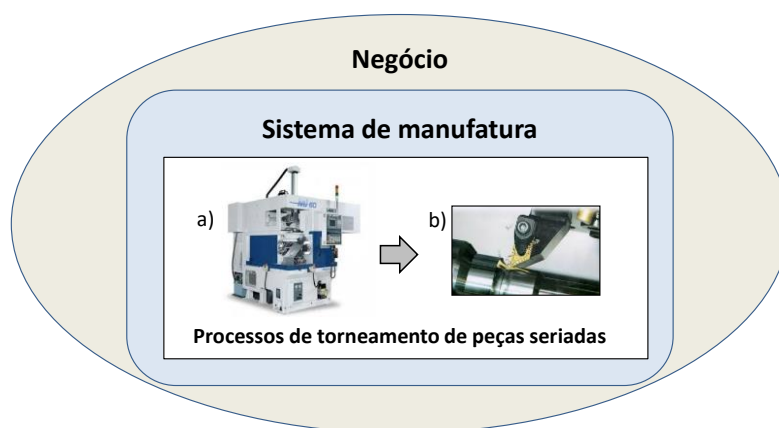


Figura 2.1 – Contextualização do tema proposto para esta tese de doutorado. Adaptado de: a) Murata Machinery, 2012 e b) Sandvik Coromant, 2009.

De acordo com Monden (2015), a produção seriada é um sistema baseado no princípio de produção em larga escala. Embora este conceito tenha sido introduzido por Adam Smith, foi Henry Ford, no início do século XX, quem o implementou na sua organização e o difundiu devido ao sucesso alcançado com esse conceito de fabricação. A produção seriada é um modelo produtivo em que se fabricam elevadas quantidades de produtos semelhantes, com máquinas e trabalho padronizado, aproveitando-se das economias de escala. Esta situação conduz à diminuição dos custos de produção, que por sua vez contribui para maior lucratividade do negócio. Na atualidade, existem tecnologias de manufatura específicas para os processos de torneamento de peças seriadas. Tecnologia é um termo que envolve o conhecimento técnico e científico, aplicado por meio de sistemas, mecanismos, processos e materiais. Agostinho, Batocchio e Silva (2012) definem tecnologia como um produto da ciência e da engenharia, que envolve um conjunto de instrumentos, métodos e técnicas que visam a resolução de problemas.

Para a presente tese de doutorado, as tecnologias de manufatura analisadas são os centros de torneamento com automações para carga e descarga das peças. A seguir, são apresentados os conceitos sobre automação e introduzidos os sistemas automatizados utilizados para o torneamento de peças seriadas.

Automação

Agostinho (2012) define automação (do latim *Automatus*, que significa ação própria), como um sistema automático de controle pelo qual os mecanismos verificam seu próprio funcionamento, sem a necessidade da interferência do homem. Para Säfssten, Winroth e Stahre (2007), a automação pode ser atribuída como base para a competitividade, com o objetivo principal de reduzir os custos de produção. Deve-se entender acima de tudo o que se espera e o que de fato precisa ser automatizado, antes de se investir em complexos modelos tecnológicos. Groover (2007) define automação como a aplicação mecânica, eletrônica e de sistemas computadorizados para operar e controlar a manufatura. Ela implica que atributos de percepção, de decisão e de esforços físicos do homem sejam substituídos por meios mecânicos ou eletrônicos. Em um sistema de automação na manufatura, as operações requeridas são realizadas com a redução da participação do homem, de forma a diminuir ou eliminar suas atividades físicas, que em muitos casos acarretam questões de saúde e segurança.

Segundo Agostinho (2012), deve-se diferenciar os conceitos de mecanização e automação. Mecanização é o conjunto de atributos tecnológicos destinados à substituição dos atributos físicos do homem (energia, sentidos, etc.), enquanto que automação é o conjunto de atributos tecnológicos destinados à substituição ou auxílio ao esforço mental humano. No Quadro 2.1 são apresentados os graus de automação e os atributos humanos compatíveis.

Quadro 2.1 – Graus de automação e os atributos humanos compatíveis (AGOSTINHO, BATOCCHIO e SILVA, 2011).

Grau de automação	Atributo humano mecanizado / automatizado	Exemplos
1. Ferramentas manuais e máquinas manuais	Nenhum (MEC)	Pá, alicates, garfos
2. Máquinas e ferramentas com fontes de energia	Energia (MEC)	Furadeira elétrica, pistola de pintura
3. Máquinas automáticas com ciclo de trabalho fixo	Destreza	Retificadora, torno paralelo, furadeira radial
4. Máquinas automáticas com ciclo de trabalho repetitivo	Diligência	Torno copiador, máquinas CNC sem auto-correção
5. Máquinas que incorporam controles retro-alimentados (auto-medição e auto-ajuste)	Julgamento	Controladores de processo, máquinas CNC com auto-correção
6. Controle por computador	Avaliação por algoritmo	Projeto assistido por computador, robôs para montagem programável
7. Auto-programação limitada	Aprendizado	Graus de automação ainda não alcançados, e portanto, sem exemplos para serem demonstrados
8. Relacionamento causa-efeito	Análise	
9. Originalidade	Criatividade	
10. Comando de outras	Domínio	

O CNC é um exemplo típico de automação (GROOVER, 2007). Contudo, o termo automação em máquinas-ferramenta refere-se às tecnologias destinadas a diminuir ou eliminar o uso de mão de obra operacional, principalmente para as atividades de carga e descarga, assim como realizar medições integradas ao processo de usinagem. De acordo com Agostinho (2012), a automação pode ser classificada como:

- ❑ Automação fixa ou rígida - Atributo humano decorrente ao seu esforço mental é substituído por equipamentos mecânicos;
- ❑ Automação programável - Atributo humano decorrente ao seu esforço mental é substituído por um programa de instruções residente em um computador.

Na Figura 2.2 são apresentados alguns exemplos de automações para carga e descarga de centros de torneamento, que serão chamadas de tecnologias de carga e descarga, como o manipulador pórtico (*gantry loader*), as células robotizadas, o alimentador de barras combinado com aparador de peças e o conceito com trocador de placas.



Figura 2.2 – Exemplos de automações para carga e descarga em centros de torneamento. Adaptado de: a) Murata Machinery, 2012; b) Indústrias Romi, 2007; c) Iemca, 2017 e d) Shimada Machinery, 2015.

Aumentar a produtividade e reduzir os custos operacionais são basicamente as principais vantagens da automação para os sistemas produtivos, pois são premissas comuns para todos os tipos de manufatura. Com a contextualização do tema proposto por esta tese e as definições sobre os conceitos abordados, a seguir é apresentado o processo de torneamento.

2.2 Torneamento

2.2.1 Definições e histórico

De acordo com a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015), o torneamento é definido como processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina, e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo. Para a Sandvik Coromant (2009), o torneamento é a combinação de dois movimentos: a rotação da peça e o movimento de avanço da ferramenta. No torneamento, uma peça sólida gira em torno do eixo da máquina-ferramenta, chamada torno, ao mesmo tempo em que uma ferramenta de corte lhe retira material periféricamente, executando o trabalho de usinagem, de modo a transformá-la numa peça bem definida, tanto em relação à forma como às dimensões. Na Figura 2.3 é demonstrado o movimento de avanço da ferramenta ao longo da peça, o que significa que o diâmetro da peça será torneado para um tamanho menor, caracterizando uma operação de torneamento externo.

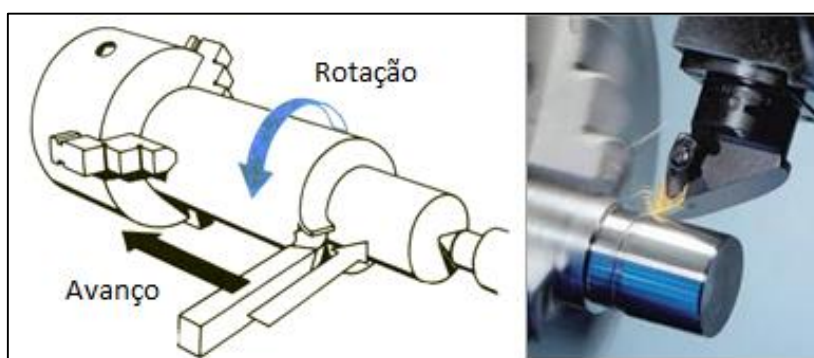


Figura 2.3 – Operação de torneamento externo (SANDVIK COROMANT, 2009).

Segundo Dumas *et al* (2018), o processo de usinagem continua sendo a principal forma para proporcionar acabamento em peças mecânicas, em especial por meio do processo de torneamento. O torneamento pode ser decomposto em diversos cortes básicos para a seleção de tipos de ferramentas, dados de corte e também para a programação de certas operações. Na Figura 2.4 são apresentados os principais tipos de torneamento, para operações externas e internas.

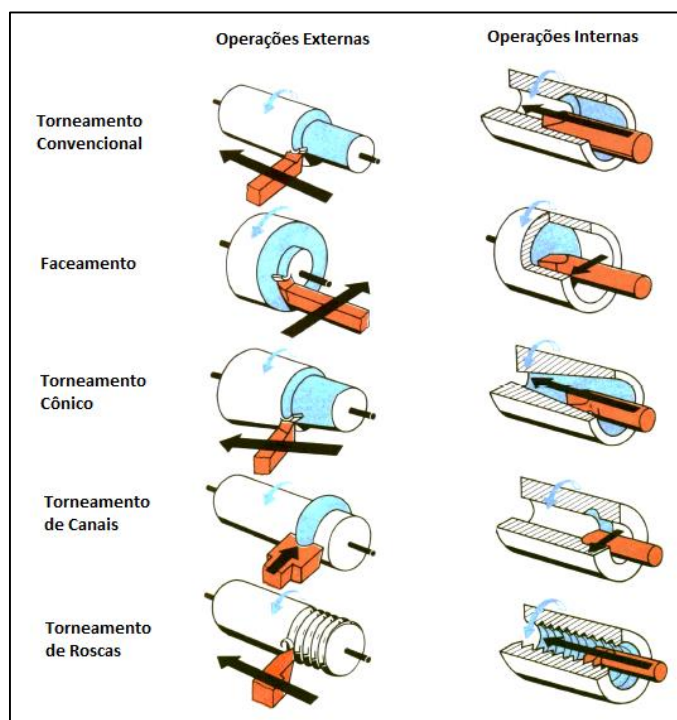


Figura 2.4 – Principais tipos de operações de torneamento. Adaptado de: Sandvik Coromant (2009).

Atualmente, o torneamento é um processo otimizado em vários aspectos, exigindo uma cuidadosa avaliação dos diversos fatores da aplicação. É um processo de usinagem muito utilizado e que mais facilmente permite desenvolvimentos (SANDVIK COROMANT, 2009). Segundo Chang (2006) *apud* Carrara (2011), o processo de fabricação de um produto pode ser definido como um fluxo de atividades coordenadas e padronizadas, executadas por pessoas ou máquinas. As peças usinadas dependem de uma ou mais fases de fabricação, chamadas de operações, que neste caso referem-se aos processos de torneamento. Se a peça for totalmente usinada em uma única fase de fabricação, esta condição é chamada de operação única. Caso a peça precise de operações complementares à primeira fase de fabricação, as operações subsequentes são comumente chamadas de operações 10, 20, 30, ... n (onde n é um múltiplo de 10), respectivamente. O foco desta tese de doutorado são peças que possuem uma ou duas fases de fabricação, portanto, serão chamadas de operação única e de operações 10 e 20.

A máquina-ferramenta utilizada para o processo de torneamento é o torno, amplamente utilizada no mundo. O torno desde antigamente vem sendo usado como meio de fabricar rodas, partes de bombas de água, cadeiras, mesas e utensílios domésticos. Sabe-se que antigas civilizações, a exemplo dos egípcios, assírios e romanos, já utilizavam tornos antigos como um meio fácil de fazer objetos com formas redondas (AFONSO, 2012). Na Figura 2.5 são apresentados alguns tipos de tornos utilizados na antiguidade.

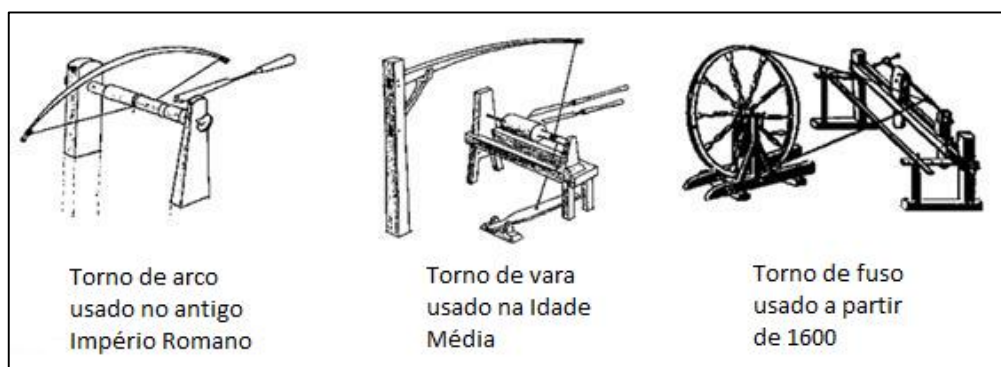


Figura 2.5 – Tornos utilizados na antiguidade (AFONSO, 2012).

Com a invenção da máquina a vapor por James Watt, os meios de produção como teares e afins foram adaptados à nova realidade daquela época. Então, o também inglês Henry Moudslay adaptou a nova máquina em um torno, criando desta forma o primeiro torno a vapor. Essa invenção não só diminuía a necessidade de mão de obra, uma vez que os tornos podiam ser operados por uma pessoa apenas, como também fazia com que a mão de obra se tornasse menos especializada. A medida que a manufatura se tornava mais mecânica e menos humana, as caras habilidades dos artesãos eram substituídas por mão de obra barata (ABIMAQ, 2006). Segundo Emag Maschinenfabrik (2009), os tornos representam aproximadamente um terço de todas as máquinas-ferramenta produzidas no mundo. Conforme apresentado na Figura 2.6, existem basicamente três tipos de famílias de peças cilíndricas usinadas nos tornos: as peças de placa, as peças tipo eixos e as peças com geometrias especiais.

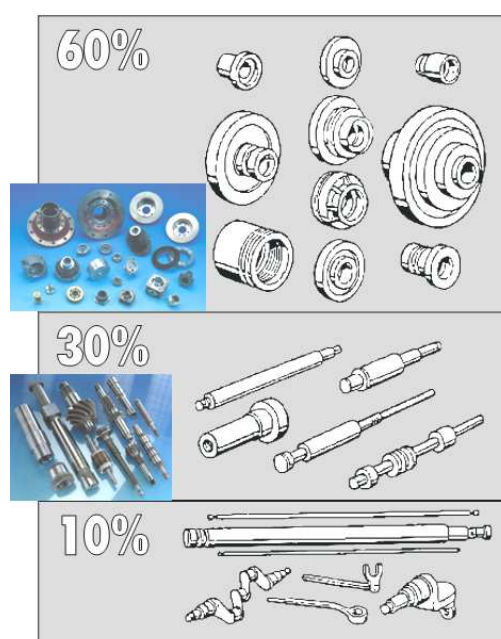


Figura 2.6 – Famílias de peças cilíndricas usinadas em tornos (EMAG MASCHINENFABRIK, 2009).

Desde a construção dos primeiros tornos até os modernos centros de torneamento, diversos tipos e conceitos de tornos foram utilizados pelas indústrias no mundo inteiro, sendo classificados de diferentes maneiras, diferenciados principalmente pela sua forma construtiva (AFONSO, 2012).

2.2.2 Tipos de tornos

De acordo com Ferrari (2009), existem diversos tipos de tornos para as mais diferentes necessidades de aplicações (automáticos, copiadores, com cabeçotes móveis, verticais, entre outros). Entretanto, para demonstrar a evolução tecnológica e contextualizar esta tese de doutorado, são abordados somente:

- ❑ Torno mecânico - ainda utilizado para atividades de manutenção e por ferramentarias, que demonstram os principais conceitos funcionais e construtivos da máquina-ferramenta definida como torno;
- ❑ Torno CNC - que demonstra claramente a integração da eletrônica de controle e as principais características que foram modificadas para utilização destas máquinas em condições de médios e altos volumes de produção;
- ❑ Centro de torneamento - que é a evolução do torno CNC para utilização em condições de produção seriada, integrando complementarmente outras tecnologias de manufatura e possibilitando diversas operações de usinagem no mesmo equipamento.

Torno mecânico

O torno mecânico, também conhecido como torno paralelo ou universal, é uma máquina-ferramenta que permite usinar peças de forma geométrica cilíndrica. Esta máquina-ferramenta possui um cabeçote que promove a rotação da peça, que está presa por uma placa com castanhas, enquanto a ferramenta de corte pressiona a superfície da peça por meio dos movimentos de avanço dos carros, promovendo desta forma, a remoção de material chamado cavaco, de acordo com as condições técnicas adequadas (INDÚSTRIAS ROMI, 2004).

Na Figura 2.7 é apresentado um torno mecânico utilizado nos dias atuais, que permite a usinagem de variados tipos de componentes mecânicos.



Figura 2.7 – Torno mecânico utilizado atualmente (INDÚSTRIAS ROMI, 2016).

Com este equipamento é possível confeccionar eixos, polias, pinos, qualquer tipo de roscas, peças cilíndricas internas e externas, além de cones, esferas e os mais diversos formatos de peças de revolução (INDÚSTRIAS ROMI, 2016). Pelo desenvolvimento do torno mecânico, a humanidade adquiriu as máquinas necessárias ao seu crescimento tecnológico, desde a medicina até a indústria espacial. O torno mecânico é a máquina que está na base da ciência metalúrgica, além de ser considerada a máquina-ferramenta mais antiga e importante ainda em uso (AFONSO, 2012).

Torno CNC

Segundo Maleki (1991), a era da automação teve início em 1952 com as máquinas CN (*Numerically Controlled* ou controladas numericamente), quando as empresas fabricantes de aeronaves necessitavam de peças cada vez mais complexas, com muita variedade de itens e baixos volumes de produção. Este modelo de manufatura era oposto à solução comum daquela época, onde as linhas eram dedicadas e sem flexibilidade. No início, estes equipamentos usavam relês eletromagnéticos, tubos de vácuo e complexas interfaces de controle. As instruções de comando eram enviadas ao controlador em passos por meio de cartões ou fitas perfuradas; ao ler tais instruções, este controlador fazia as conversões em sinais elétricos para os servomotores e outros elementos da máquina. Com o avanço da tecnologia eletrônica, os dados passaram a

ser armazenados em memórias e então surgiu o CNC (*Computer Numeric Control* ou comando numérico computadorizado), e tais instruções passaram a ser armazenadas diretamente nos computadores destas máquinas, aumentando velocidade e flexibilidade nos processos de produção.

Para Groover (2008), o CNC é um conjunto eletrônico de controle comandado por um computador, capaz de receber informações por meio da entrada de dados, compilar estas informações e transmiti-las em forma de comando à máquina-ferramenta, de modo que esta, sem intervenções do operador, realize uma sequência de operações programadas. O desenvolvimento dos motores, servomotores, *encoders* e fusos de esferas também contribuiu para a evolução das máquinas-ferramenta controladas pelo comando numérico computadorizado, entre elas, os tornos CNC. As principais vantagens do CNC em relação a aspectos de projeto e fabricação da máquina consistem na diminuição da quantidade de elementos mecânicos aplicados, tais como engrenagens, eixos, carcaças, e também na diminuição de custos de fabricação mecânica (ERGOMAT, 2003). As principais características de um torno CNC podem ser verificadas na Figura 2.8.

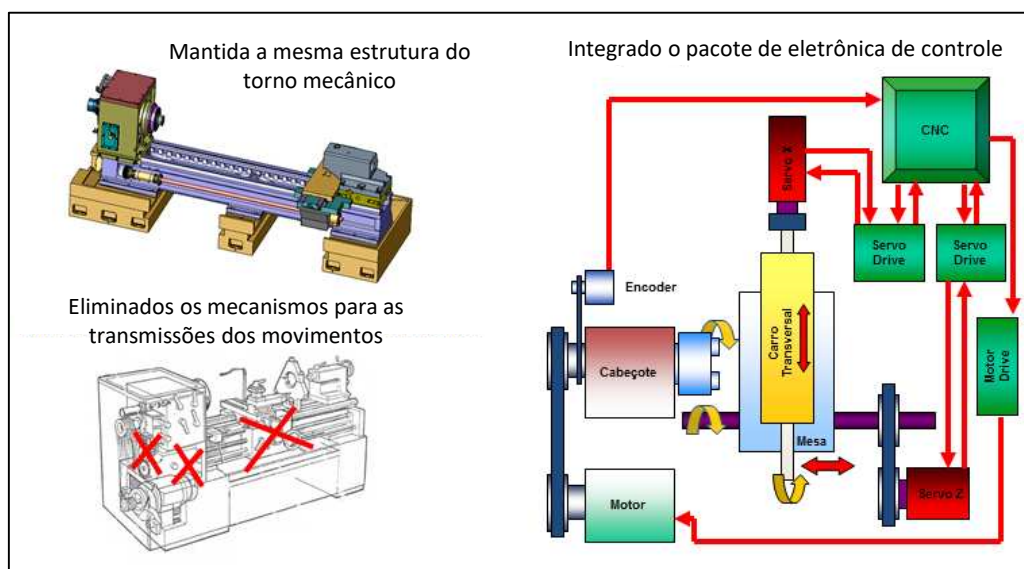


Figura 2.8 – Principais características de um torno CNC. Adaptado de: Indústrias Romi (2004).

De acordo com Indústrias Romi (2004), praticamente foi mantida a mesma estrutura de um torno mecânico (colunas, barramento, cabeçote, mesa, carro transversal e cabeçote móvel), foram eliminados os mecanismos para as transmissões dos movimentos (recâmbio, caixa de roscas e avanços e avental) e então integrado o pacote de eletrônica de controle (com motor principal independente, servomotores, *encoders* e acionamentos).

Existem diversos tipos de tornos CNC, como pode ser verificado na Figura 2.9, cada um estruturalmente adequado para as aplicações de usinagem pretendidas. No entanto, todas estas máquinas-ferramenta possuem o mesmo conceito funcional, com base na eletrônica de controle integrada.



Figura 2.9 – Tipos de tornos CNC (INDÚSTRIAS ROMI, 2004).

Para Ergomat (2003), as principais vantagens dos tornos CNC em relação aos aspectos operacionais são:

- ☐ Facilidade operacional por meio de programação;
- ☐ Aumento da versatilidade da máquina com ciclos “enlatados” de programação;
- ☐ Aumento de precisão geométrica de peças;
- ☐ Redução de peças refugadas;
- ☐ Aumento da produtividade;
- ☐ Maior segurança e menor interferência do operador;
- ☐ Facilidade de troca de informações entre os departamentos;
- ☐ Economia de ferramentas (controle das velocidades de corte e de avanço).

A partir dos tornos CNC foram criados os centros de torneamento, que são classificados como tornos voltados para produção de peças seriadas.

Centro de torneamento

O centro de torneamento é a evolução do torno CNC, com tecnologias que possibilitam trabalhar continuamente com repetibilidade e precisão em regimes de alta produção (INDÚSTRIAS ROMI, 2014). As principais características funcionais e construtivas são:

- ❑ Base monobloco para maior rigidez e estabilidade do equipamento;
- ❑ Carro transversal inclinado para facilitar o escoamento do cavaco pela ação da gravidade e evitar acúmulo do mesmo na estrutura mecânica (para minimizar as influências térmicas no processo de usinagem);
- ❑ Possibilidade de usinagens multifuncionais, pelo fato de integrar operações com ferramentas rotativas combinadas aos posicionamentos angulares do eixo árvore, por permitir usinagem deslocada da linha de centro (eixo Y), entre outras.

Na Figura 2.10 é apresentado o centro de torneamento com e sem carenagem, em CAD 3D e também físico (INDÚSTRIAS ROMI, 2007).



Figura 2.10 – Centro de torneamento com e sem carenagem, em CAD 3D e físico. Adaptado de: Indústrias Romi (2007).

Ferrari (2009) define o centro de torneamento, também denominado torno multitarefa, como uma máquina-ferramenta de alto rendimento, que conta com um elevado grau de automação, possibilitando controlar diversos eixos lineares e circulares, utilizar tanto ferramentas fixas como acionadas, com o objetivo de usinar peças complexas com elevada

precisão por completo. Os segmentos da indústria que fazem uso destes equipamentos são as indústrias de componentes automotivos, telecomunicações, aeroespacial, hidráulica e pneumática, ferramentarias e, cada vez mais, médico-hospitalar, onde são utilizadas para a produção de peças como próteses, parafusos ortopédicos e implantes dentários. Para Ergomat (2003), os principais motivos pelos quais os centros de torneamento vêm sendo utilizados são:

- ❑ Eliminação de operações posteriores;
- ❑ Realização de usinagens complexas;
- ❑ Aumento de precisão geométrica das peças;
- ❑ Obtenção de melhor precisão e maior produtividade;
- ❑ Produção de peças com custos menores.

No que diz respeito às particularidades construtivas, a estrutura com base monobloco é mais robusta e projetada para absorver vibrações, com geometria que facilita o escoamento de cavacos da área de usinagem (INDÚSTRIAS ROMI, 2014). A estrutura mecânica de um centro de torneamento pode ser verificada na Figura 2.11.

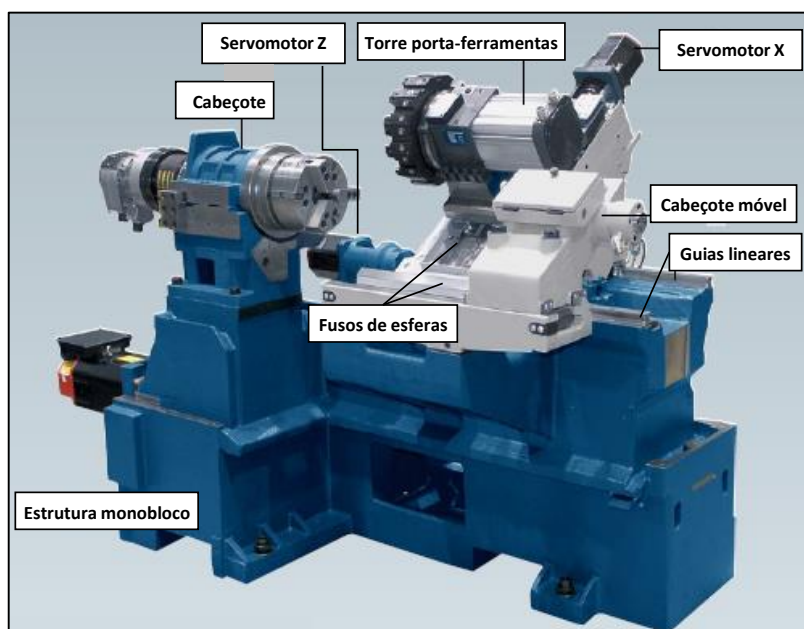


Figura 2.11 – Estrutura mecânica de um centro de torneamento. Adaptado de: Indústrias Romi (2014).

De acordo com Indústrias Romi (2014), o conjunto do cabeçote que contempla o eixo-árvore é mais preciso, dimensionado para suportar grandes esforços de usinagem e altas velocidades. Os fusos de esferas utilizados são de alta precisão, dimensionados para grandes

esforços de usinagem e, em conjunto com os servomotores que são diretamente acoplados, proporcionam melhores desempenhos de aceleração e velocidade aos eixos, com deslocamentos rápidos e precisos. Os deslocamentos rápidos são mais eficientes em função das classes de guias lineares utilizadas, devido ao baixo coeficiente de atrito entre os trilhos e as sapatas.

O método seletivo proposto por esta tese de doutorado terá como base justamente os centros de torneamento voltados para produção seriada, que utilizam tecnologias de carga e descarga para aumentar a eficiência e a capacidade produtiva dos processos de usinagem. As tecnologias de carga e descarga mais frequentemente utilizadas nos centros de torneamento são apresentadas a seguir.

2.3 Tecnologias de carga e descarga para tornos

Os procedimentos para carga da peça bruta e descarga da peça acabada são necessários em todos os tipos de máquinas-ferramenta, demandando para isso, tempos totalmente improdutivos que cada vez mais estão sendo explorados pelas empresas de usinagem, sendo dessa forma, o objeto de estudo analisado por esta tese. As reduções e padronizações dos tempos para a realização dos procedimentos de carga e descarga proporcionam:

- ❑ Reduções dos tempos de ciclo de usinagem e consequente aumento da capacidade produtiva;
- ❑ Cadência produtiva, com consequentes aumentos de eficiência e da capacidade produtiva.

As tarefas atribuídas ao procedimento de carga e descarga podem ser realizadas manualmente pelo operador ou automaticamente por meio de mecanismos ou de sistemas projetados para esta finalidade. Conforme previamente mencionado, os sistemas automatizados serão chamados de tecnologias de carga e descarga. De acordo com Sluga, Butala e Peklenik (2008), a movimentação de materiais nos sistemas de manufatura tem se tornado mais fácil e viável com os avanços das tecnologias, e as pesquisas têm se concentrado na flexibilidade e melhoria destes sistemas automáticos.

Durante as pesquisas bibliográficas realizadas (nas bases de dados *Science Direct* e Google Acadêmico até 30/07/2018), foram encontrados diversos trabalhos acadêmicos sobre

manipulações de peças, mas somente direcionados para os sistemas flexíveis de manufatura (FMS - *Flexible Manufacturing Systems*). Guerrero *et al* (1999) definem o FMS como um sistema automatizado para a fabricação de peças controlado por computador, com estações de trabalho semi-independentes, conectadas para manuseio de materiais e carregamento de máquinas automatizados. Contudo, as tecnologias para carga e descarga utilizadas nos centros de torneamento possuem outras características funcionais e construtivas, impossibilitando a utilização das referências bibliográficas mencionadas sobre o FMS.

Segundo Ferrari (2009), existem no mercado de máquinas-ferramenta diversos tipos de tornos dedicados aos trabalhos a partir de barras e outros que trabalham com placas de fixação para peças de maior porte. Pelas características de projeto, estas máquinas estão preparadas para integrar células de produção automáticas e flexíveis. Como as peças compreendidas por esta tese são torneadas e produzidas em condições seriadas, basicamente as peças brutas partirão de barras ou então de peças pré-formadas (fundidas, forjadas, sinterizadas ou ainda pré-cortadas de barras), podendo ser carregadas e descarregadas nos centros de torneamento por meio de sistemas mecanizados ou automatizados como:

- ☐ Alimentadores de barras combinados com aparadores de peças;
- ☐ Magazines mecanizados combinados com aparadores de peças;
- ☐ Robôs articulados verticais;
- ☐ Manipuladores pórticos (*Gantry loaders*);
- ☐ Trocadores de placas.

Esses sistemas mecanizados e automatizados são as tecnologias de carga e descarga mais frequentemente utilizadas pelas empresas de usinagem, para a produção de peças seriadas em tornos CNC e em centros de torneamento. Essas tecnologias possuem sistemas mecânicos projetados para alimentar um tipo de peça ou uma família de peças semelhantes. Dependendo do tipo de tecnologia de carga e descarga adotada, o centro de torneamento fica dedicado para um determinado tipo de peça, deixando de ser flexível. As tecnologias de carga e descarga podem ser mecanismos ou sistemas independentes, que são integrados nas máquinas-ferramenta já projetadas para tal finalidade e, em alguns casos, podem requerer modificações das carenagens ou ainda fazer parte do conceito construtivo e funcional da máquina-ferramenta.

A seguir são apresentadas as tecnologias de carga e descarga mencionadas e que foram consideradas no método seletivo proposto.

2.3.1 Alimentador de barras e aparador de peças

O sistema alimentador de barras combinado com um aparador de peças aumenta a eficiência dos meios de produção (INDÚSTRIAS ROMI, 2014). Integrados a um centro de torneamento, formam uma célula de usinagem automatizada como é mostrado na Figura 2.12, tornando-se um aliado importante para o aumento da capacidade de produção e para a qualidade das peças usinadas.



Figura 2.12 – Alimentador de barras e aparador de peças integrados a um centro de torneamento (INDÚSTRIAS ROMI, 2014).

O alimentador de barras é utilizado para carregar peças em forma de barras automaticamente e, após a realização das operações de usinagem, o descarregamento normalmente ocorre por um aparador de peças (INDÚSTRIAS ROMI, 2014).

De acordo com Indústrias Romi (2007), o aparador de peças é um mecanismo utilizado para remover as peças usinadas para fora da máquina, sem a necessidade da abertura da porta ao fim do ciclo de usinagem. Este mecanismo fica localizado dentro da área de usinagem da máquina e, após o término do ciclo de torneamento, posiciona-se abaixo da peça antes da sua segmentação do restante da barra. Então, a peça cai no aparador pela ação da gravidade, que posteriormente a descarrega em uma caixa coletora localizada fora da máquina. Na Figura 2.13 são apresentados um aparador de peças e uma caixa coletora, onde as peças são descarregadas após serem usinadas.

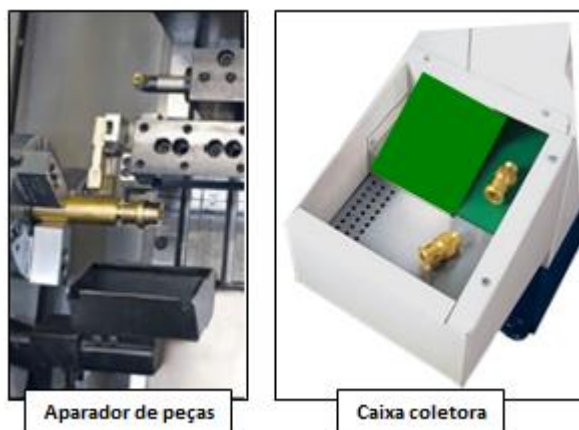


Figura 2.13 – Aparador de peças e caixa coletora (YAMAZAKI MAZAK, 2009).

Além dos aparadores de peças, existem outras tecnologias e maneiras utilizadas para realizar o descarregamento, como:

- ☐ Por um manipulador pórtico (*Gantry Loader*);
- ☐ Através da passagem central do segundo cabeçote para centros de torneamento com essa característica, onde as peças acabadas empurram umas às outras até serem descarregadas em uma bandeja fora da máquina;
- ☐ Permitindo que a peça acabada caia diretamente no transportador de cavacos, caso não haja tolerâncias críticas e/ou qualidade superficial exigidas nas peças.

O acúmulo de cavaco também é um fator crítico para todos os tipos de mecanizações e automações, principalmente no caso de peças usinadas a partir de barras, devido a necessidade do corte para segmentar a peça acabada do restante (FERRARI, 2009). Em tornos CNC ou centros de torneamento somente com o cabeçote principal para operações únicas, notam-se porções de cavaco consideráveis nos seus aparadores de peças, pois o cavaco inerente do processo de segmentação da barra cai juntamente com as peças no aparador. De acordo com Yamazaki Mazak (2007), os centros de torneamento com o segundo cabeçote proporcionam aumento de produtividade na fabricação de peças com usinagem nos dois lados, pois possibilitam usinar as operações 10 e 20 na mesma máquina. Nestes casos, o processo de corte e segmentação da barra acontece durante a transferência entre os cabeçotes e, deste modo, o descarregamento ocorre somente após a usinagem da peça completa, não gerando nestas circunstâncias cavacos no aparador de peças. Na Figura 2.14 são demonstradas as diferentes condições dos aparadores de peças em relação ao acúmulo de cavacos.

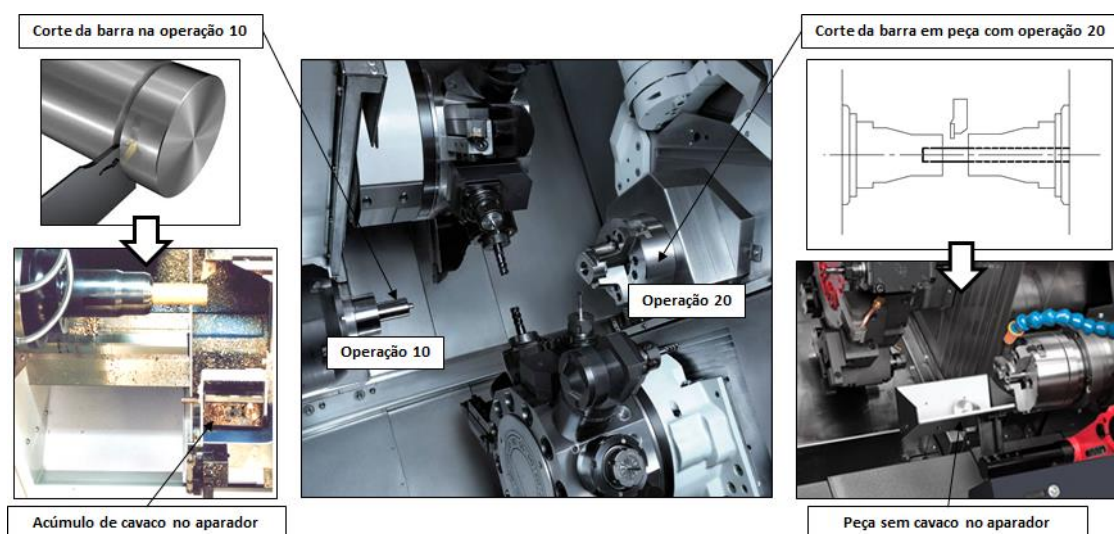


Figura 2.14 – Aparadores de peças com e sem acúmulo de cavacos. Adaptado de: Yamazaki Mazak (2007).

A usinagem de peças torneadas a partir de barras sempre foi tema de muita atenção e para se tomar muitos cuidados, principalmente quando se objetiva atingir o melhor rendimento do centro de torneamento. De acordo com Ferrari (2009), para os trabalhos de médias e grandes séries, trabalha-se com barras de 3 metros de comprimento e diâmetros até 60 mm. A partir deste diâmetro, em função do elevado tempo para a operação de corte, é recomendável usar as peças a partir de *blanks* pré-formados. Para a usinagem de pequenas e médias séries em tornos CNC, para diâmetros até 60 mm, também se utilizam barras curtas até 600 mm de comprimento. Na Figura 2.15 são apresentados alguns exemplos de peças usinadas a partir de barras.



Figura 2.15 – Exemplos de peças usinadas a partir de barras (INDÚSTRIAS ROMI, 2015).

Outro cuidado a se tomar quando se usina peças a partir de barras é com a retilidade delas. Barras não retílineas geram vibrações que variam com a velocidade de rotação do fuso principal, provocando variações de medidas, imperfeições no acabamento superficial das peças,

interferências no funcionamento da máquina e consequente diminuição da sua vida útil. A qualidade superficial das barras também é um fator de fundamental importância. De uma forma geral, os centros de torneamento utilizam pinças de fixação, podendo ser aplicadas para barras redondas ou para barras perfiladas, como sextavadas e quadradas. Como as barras deslizam sobre a superfície de fixação da pinça durante a fase de carregamento para se produzir uma nova peça, a qualidade superficial das barras deve ser tal que evite o desgaste da pinça e a quebra dos elementos mecânicos de fixação, garantindo assim, a precisão das peças usinadas. De uma forma geral, no setor de tornearia automática, utilizam-se barras trefiladas com tolerâncias entre h11 e h9. Peças precisas fabricadas em centros de torneamento com cabeçote móvel usam barras retificadas. Barras em más condições de uso fazem com que se limitem as rotações do fuso principal em níveis menores do que as consideradas ideais, acarretando em maiores tempos de ciclo de usinagem, maior desgaste das ferramentas de corte e prejuízo da qualidade superficial (FERRARI, 2009).

O primeiro alimentador automático de barras do mundo foi criado em Faenza, na Itália, em 1961. Sua autonomia de trabalho deve-se ao magazine integrado para o armazenamento das barras (IEMCA, 2016). Segundo Ergomat (2007), os magazines para alimentação de barras permitem o armazenamento de diversas barras e a colocação automática daquela a ser usinada, após a anterior ter sido consumida, aumentando significativamente a eficiência e a produtividade do torneamento automático. É recomendado para a usinagem de peças longas e de baixo tempo do ciclo, onde as barras são consumidas muito rapidamente e trocadas com grande frequência. De uma forma geral, os magazines de barras aumentam a produtividade do torneamento automático, diminuindo o número de operadores, possibilitando, muitas vezes, a máquina trabalhar turnos sem supervisão. Na Figura 2.16 é apresentado um magazine para armazenamento integrado a um alimentador de barras.

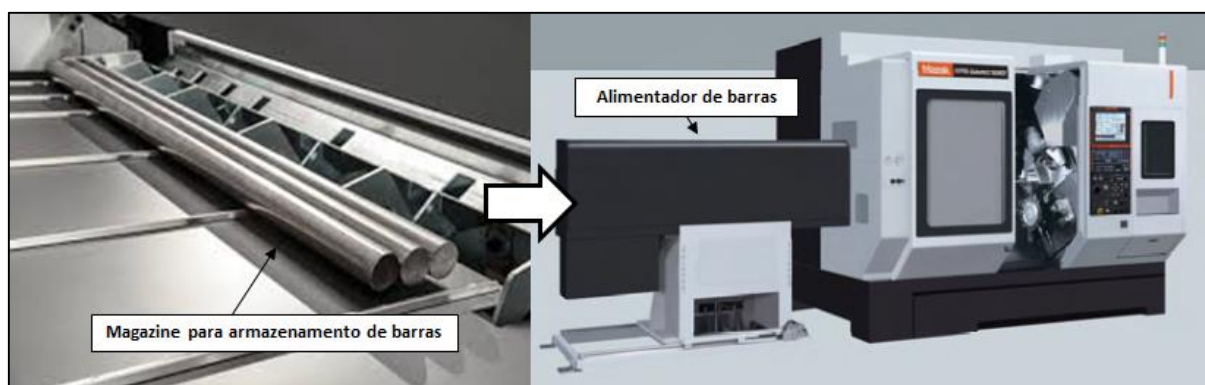


Figura 2.16 – Magazine para armazenamento de barras (YAMAZAKI MAZAK, 2007).

De acordo com Indústrias Romi (2014), as principais vantagens da utilização de um alimentador de barras combinado com um aparador de peças são:

- ☐ Menor intervenção do homem na preparação das peças brutas, que neste caso passam a ser barras;
- ☐ Barras com comprimento único, independente da peça a ser usinada;
- ☐ Menor estoque de peças brutas;
- ☐ Menor inventário para rastreamento de peças brutas;
- ☐ Áreas de estoque mais homogêneas (barras de 600 e 3000 mm);
- ☐ Possibilidade de mudanças na geometria das peças, inclusive no comprimento;
- ☐ Minimização dos tempos de carregamento e descarregamento;
- ☐ Minimização dos tempos passivos de máquina, implicando no aumento da eficiência dos tempos produtivos.

2.3.2 Magazine mecanizado

Os magazines mecanizados são sistemas “tipo calhas” que possibilitam o carregamento das peças brutas pela ação da gravidade. O comprimento da calha é que determina a autonomia de trabalho, pois em calhas mais longas consegue-se colocar mais peças, e portanto, trabalhar automaticamente por mais tempo. Na Figura 2.17 é mostrado um sistema tipo calha e o avanço das peças pela gravidade durante o procedimento de carga automática.



Figura 2.17 – Sistema tipo calha, demonstrando o avanço das peças pela ação da gravidade (METRA, 2013).

Na Figura 2.18 é apresentado um magazine mecanizado para carregamento de uma peça que parte de um *blank* pré-formado, sendo necessário modificar a carenagem da máquina para permitir a integração deste conjunto (ERGOMAT, 2007). Neste exemplo, o magazine mecanizado tem um ponto de carga dentro da área de usinagem, sendo necessário utilizar a torre porta-ferramentas para transferir a peça do sistema de carga para a placa de fixação. Tem-se ainda nesta aplicação um aparador de peças para realizar o descarregamento automático das peças acabadas, formando desta forma uma célula de usinagem automatizada.

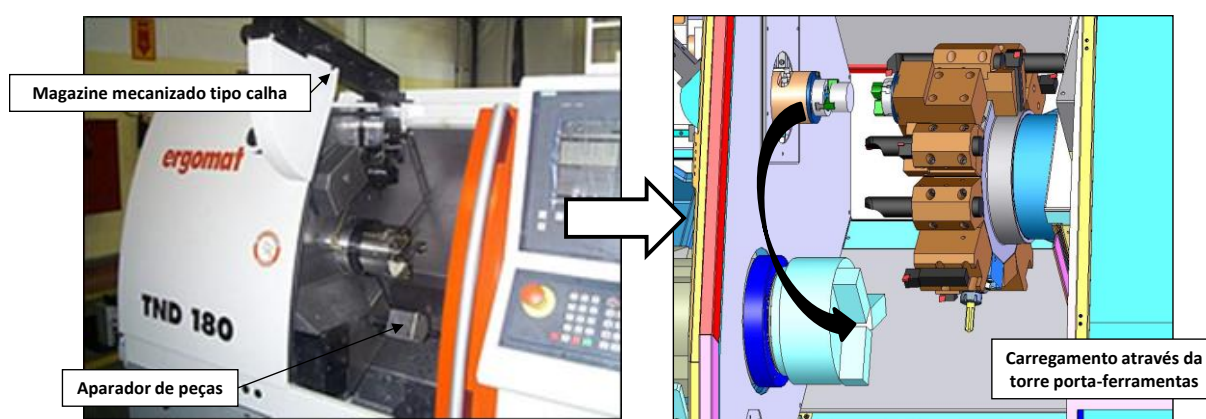


Figura 2.18 – Exemplo de um magazine mecanizado combinado com um aparador de peças, onde a torre porta-ferramentas transfere a peça bruta do ponto de carga para a placa de fixação. Adaptado de: Ergomat (2007).

Segundo Ferrari (2009), para diâmetros superiores a 60 mm recomenda-se usar as peças a partir de *blanks* pré-formados. Os magazines mecanizados representam uma tecnologia geralmente recomendada para lotes grandes de peças entre 60 e 80 mm de diâmetro. Estes magazines são frequentemente aplicados nos tornos automáticos clássicos de carros múltiplos a cames e a CNC. Contudo, na atualidade, muitas empresas de usinagem utilizam este tipo de tecnologia em tornos CNC e em centros de torneamento para produção seriada, de forma a reduzir a intervenção do operador nos procedimentos de carga e descarga.

O magazine mecanizado é a tecnologia de carga e descarga que requer menor investimento e geralmente é muito viável onde pode ser aplicado. Assim, como no caso da tecnologia com o alimentador de barras, possibilita que os trabalhos de usinagem ocorram automaticamente, sem a necessidade de abrir e fechar a porta da máquina entre um ciclo e outro de usinagem (FERRARI, 2009). Além da condição contínua de funcionamento, estes mecanismos muitas vezes contribuem para uma redução considerável dos tempos de carga e descarga, deste modo resultando em menores tempos de ciclo de usinagem e consequentemente em aumento de produtividade.

Na Figura 2.19 é ilustrado um sistema *poka yoke*, que é utilizado para garantir a orientação correta das peças brutas na calha de alimentação, e desta forma, eliminar possíveis falhas operacionais com a colocação das mesmas na posição incorreta.

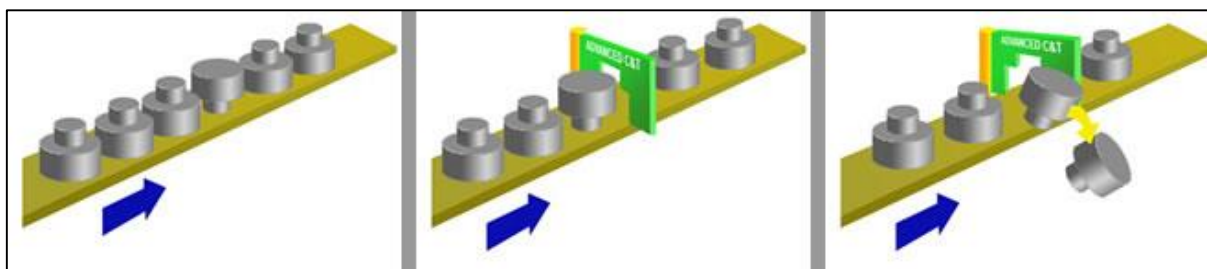


Figura 2.19 – Ilustração de um sistema *poka yoke* (MONDEN, 2015).

Para alimentação de peças tipo eixos, pode-se utilizar um magazine similar ao de barras, normalmente dedicado para um comprimento específico de peças, conforme é mostrado na Figura 2.20a (ERGOMAT, 2003). Neste magazine, as peças avançam igualmente pela ação da gravidade, porém o ponto de carga fica fora da máquina, onde um cilindro pneumático empurra a peça pela passagem do eixo árvore até a posição correta de usinagem. Na Figura 2.20b é apresentado um sistema de descarregamento para peças tipo eixos, onde as peças acabadas são empurradas para fora da máquina através do eixo-árvore do segundo cabeçote. Para que o funcionamento deste sistema ocorra continuamente, tem-se integrado uma bandeja fora da máquina para aumentar a autonomia operacional (Figura 2.20c), sendo as peças acabadas empurradas pelas peças acabadas subsequentes, até serem descarregadas (INDÚSTRIAS ROMI, 2014).

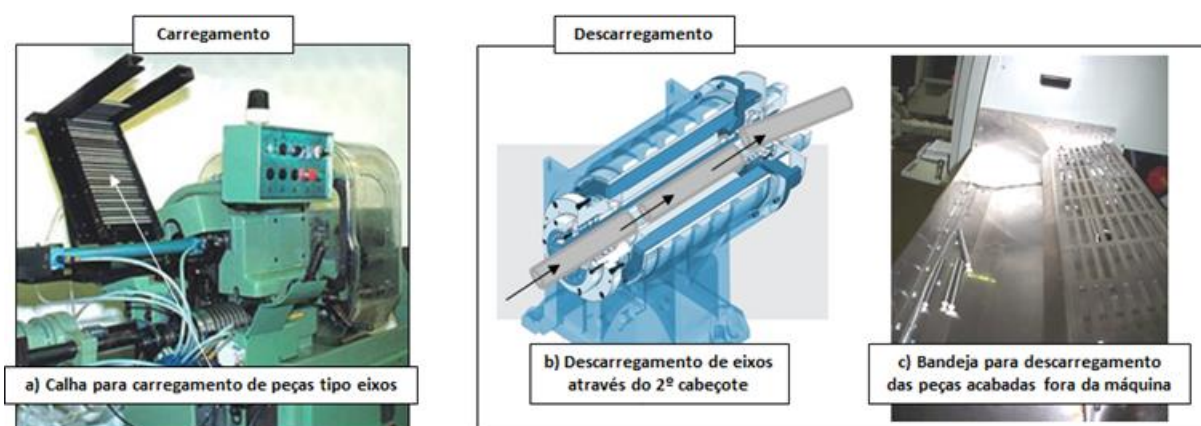


Figura 2.20 – Exemplos de magazines mecanizados para peças tipo eixos: a) Calha para carregamento (ERGOMAT, 2003); b) Descarregamento através do 2º cabeçote e c) Bandeja para descarregamento (INDÚSTRIAS ROMI, 2014).

De acordo com Norma Equipamentos (2017), para aumentar o grau de automação dos magazines mecanizados, podem ser integrados complementarmente os alimentadores vibratórios de peças. Além de aumentar a autonomia para funcionamento automatizado, os alimentadores vibratórios podem também separar, posicionar e carregar automaticamente os mais diversos tipos de peças, reduzindo a necessidade de intervenção do operador. Na Figura 2.21 é demonstrado um alimentador vibratório integrado a um centro de torneamento e na Figura 2.22 é ilustrado como as peças são movimentadas para dentro da máquina.



Figura 2.21 – Alimentador vibratório integrado a um centro de torneamento (SHIMADA MACHINERY, 2015).

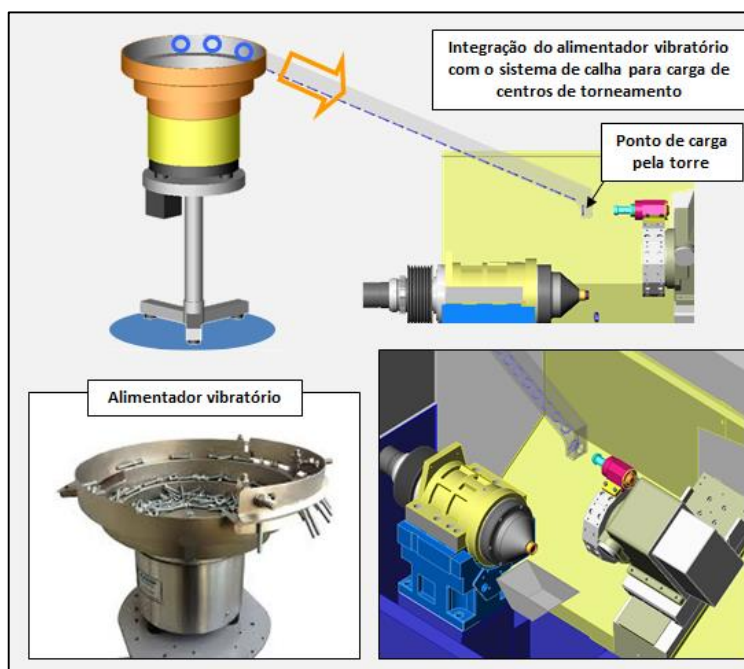


Figura 2.22 – Combinação de um alimentador vibratório com um sistema de calha, com carregamento das peças pela torre-porta ferramentas em um centro de torneamento. Adaptado de: Norma Equipamentos (2017).

Esse tipo de alimentador promove vibrações para posicionar as peças corretamente até as guias mecânicas. Então, as peças são conduzidas do alimentador vibratório até o sistema de calha apresentado, sendo posteriormente movimentadas de forma ordenada para dentro do centro de torneamento, que por sua vez, utiliza a torre porta-ferramentas para pegar a peça no ponto de carga e, em seguida, colocá-la no sistema de fixação (NORMA EQUIPAMENTOS, 2017). Os alimentadores vibratórios são projetados e fabricados de acordo com a geometria de cada peça a ser carregada, sendo praticamente inflexíveis para outros tipos de aplicações. Todo o procedimento apresentado para carga da peça ocorre sem a necessidade de abertura da porta da máquina, de forma a reduzir os tempos de carga e descarga e consequentemente o tempo de ciclo da peça, promovendo desta forma aumento da capacidade produtiva com este tipo de tecnologia. As tecnologias apresentadas a seguir realizam os procedimentos de carga e descarga completamente, não sendo necessariamente combinadas como as tecnologias apresentadas até o momento.

2.3.3 Robô articulado vertical

Os robôs utilizam os mesmos princípios do comando numérico para sua programação. Portanto, usam sistemas de movimentos tipo juntas (eixos) em sua definição, que neste caso são chamados de graus de liberdade (GROOVER, 2008). Os robôs articulados verticais, também conhecidos como braços robóticos, são geralmente utilizados para carga e descarga automática de peças com médios e grandes portes (pesos e dimensões), sempre a partir de *blanks* pré-formados, independentemente do tipo de geometria, em praticamente todos os tipos de máquinas-ferramenta.

De acordo com Fanuc (2017), os robôs articulados são classificados de acordo com a sua estrutura cinemática. Existem diversas classificações de robôs, sendo cada uma delas voltadas para aplicações específicas. A classificação dos robôs geralmente é dada por: robôs cartesianos, robôs cilíndricos, robôs esféricos ou polares e robôs articulados ou angulares. As classificações diferem-se entre si pelos tipos de movimentos que podem ser realizados pelos robôs, a partir dos tipos de juntas utilizadas e pelo envelope de trabalho formado pelos robôs de cada classe.

Os robôs articulados verticais são muito utilizados em células de trabalho, conforme apresentado na Figura 2.23, pois além da função de carga e descarga das peças na máquina-ferramenta, eles também transferem as peças para outras fases do processo de manufatura (tanto para outras máquinas para finalidades diversas quanto para estações de medição que também podem ser integradas).



Figura 2.23 – Exemplo de um robô articulado vertical integrado a um centro de torneamento (PRACTICAL MACHINIST, 2017).

Os robôs utilizados na indústria são também chamados de robôs manipuladores e são formados basicamente por uma série de corpos rígidos que não se deformam pela ação das forças aplicadas sobre eles. Se houver deformações, o robô perde sua precisão na movimentação e sua aplicação nos processos industriais fica comprometida. A estrutura de um robô é constituída por elos (ou *links* de acordo com a denominação em inglês) que são unidos por juntas. Na Figura 2.24 é ilustrado um robô articulado vertical com indicações dos elos e juntas que constituem a sua estrutura.

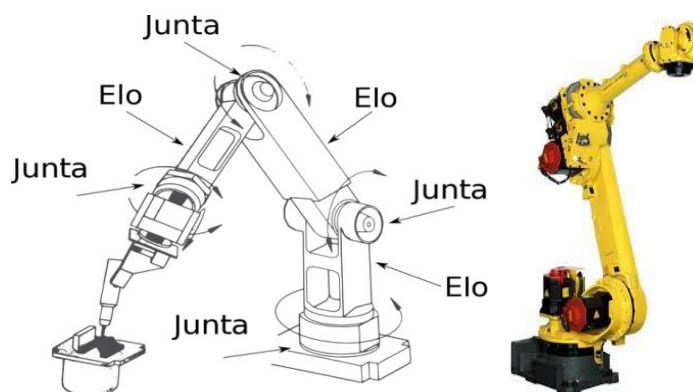


Figura 2.24 – Robô articulado vertical com indicações dos elos e juntas que constituem a sua estrutura. Adaptado de: Fanuc America (2017).

Os robôs articulados verticais são os mais conhecidos pela maioria das pessoas, pois o formato deles assemelha-se a um braço humano. Seus três elos principais são unidos por juntas de revolução, sendo que tal característica possibilita esses robôs a realizarem uma ampla gama de movimentos. Desse modo, eles podem ser utilizados para executar movimentações complexas que, de outra forma, só poderiam ser realizadas por seres humanos. O volume de trabalho desta classificação de robôs, a exemplo do que ocorre com os robôs esféricos, também é formado por uma esfera e qualquer parte deste volume pode ser facilmente alcançado pelo robô devido à sua grande flexibilidade de movimentação. A seleção do robô depende basicamente da capacidade de carga, da quantidade de eixos (normalmente 6 eixos simultâneos) e do alcance requerido para cada tipo de aplicação (FANUC AMERICA, 2017). Na Figura 2.25 é ilustrada uma célula de torneamento automatizada, com os periféricos necessários para o funcionamento do robô articulado vertical.

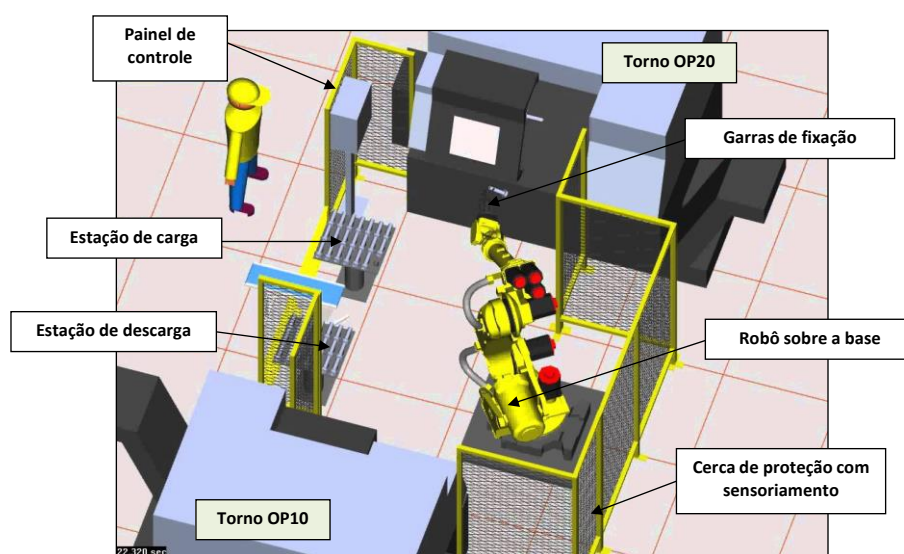


Figura 2.25 – Célula de torneamento automatizada, com os periféricos necessários para o funcionamento do robô articulado vertical. Adaptado de: Ellison Technologies (2017).

Para utilização dos robôs articulados em aplicações industriais, são necessários diversos periféricos para garantir uma condição de trabalho segura e confiável (KAS ENGENHARIA, 2013). É necessário isolar a área de atuação do robô com uma cerca de proteção, fixar o robô em uma base, fabricar as garras de fixação para as peças brutas e acabadas, integrar estações para carga e descarga das peças, integrar sensores e controles necessários, além de realizar a programação do robô.

De acordo com Ferrari (2009), a principal desvantagem deste conceito de célula automatizada diz respeito ao maior espaço requerido, pois o robô articulado precisa ser montado

na frente da máquina e todo o seu espaço de atuação deve ser isolado por cercas de proteção. Normalmente, a disposição da cerca de proteção possibilita que o operador acesse o painel de controle da máquina-ferramenta, pois assim, é possível realizar as correções de desgaste das ferramentas sem interromper o funcionamento completo da célula. Porém, os desgastes das ferramentas são inerentes aos processos de usinagem e, após determinados tempos efetivos de contato com as peças, as mesmas precisam ser substituídas, sendo necessário para isso interromper todo o funcionamento da célula automatizada para o operador realizar este procedimento. Muito frequentemente esses robôs são comunizados para mais de uma máquina que integra a célula automatizada. Portanto, quando uma das máquinas é interrompida para substituição das ferramentas, as demais máquinas integradas também deixam de funcionar, ocasionando uma redução da eficiência produtiva de toda a célula automatizada.

Além das células automatizadas apresentadas, existem outras aplicações para robôs em centros de torneamento. Na Figura 2.26 são apresentados exemplos de robôs articulados aplicados em *Track Motion*, *Top Loader* e integrado na estrutura da máquina.

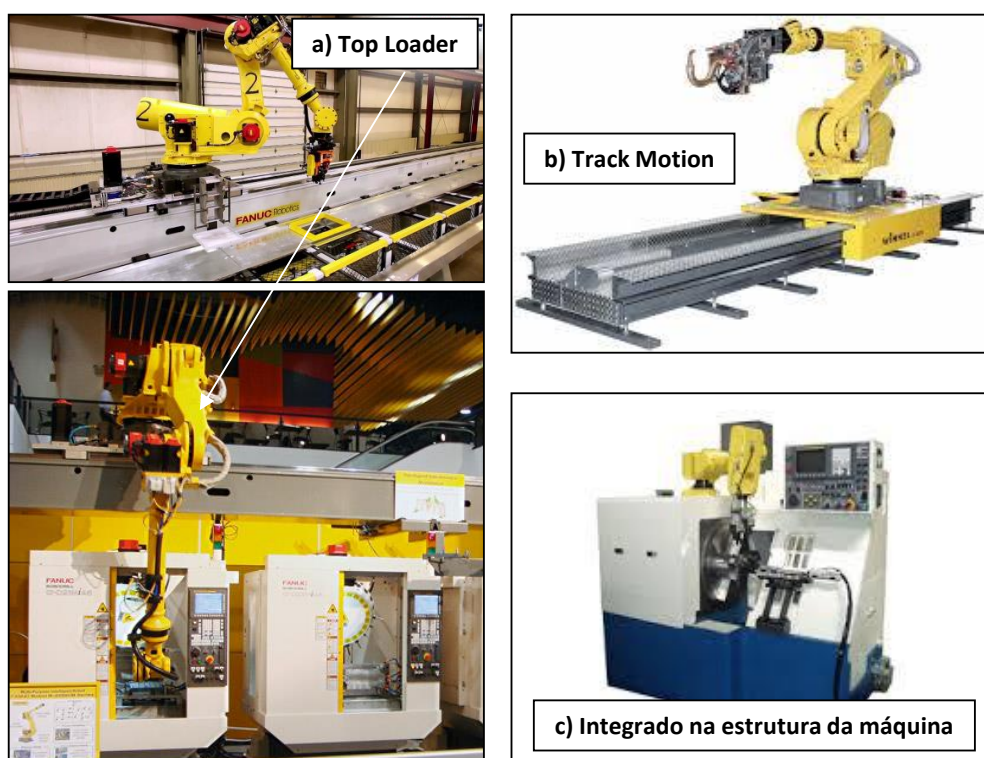


Figura 2.26 – Exemplos de robôs articulados aplicados em: a) *Top Loader*. Adaptado de: Fanuc (2017); b) *Track Motion* (FANUC AMERICA, 2017) e c) Integrado na estrutura da máquina (SHIMADA MACHINERY, 2015).

Para peças de grande porte dimensional e com altos tempos de ciclo são utilizados os robôs montados sobre trilhos, conhecidos como *Track Motion*, para possibilitar o deslocamento

do robô articulado vertical até as posições frontais das máquinas e assim realizar os procedimentos de carga e descarga (ELLISON TECHNOLOGIES, 2017). Para peças menores, os trilhos também podem ser montados acima das máquinas, de forma a reduzir o espaço de trabalho requerido. Este conceito chamado *Top Loader* possibilita que os operadores acessem as máquinas individualmente, não sendo necessário interromper o funcionamento de toda a célula automatizada, proporcionando aumento de eficiência e de produtividade (PRACTICAL MACHINIST, 2017). Em alguns casos, os robôs podem ser integrados na estrutura da própria máquina, de forma a reduzir os custos com periféricos e os deslocamentos dos robôs. Porém, as características construtivas do centro de torneamento devem ser projetadas para tal finalidade, a fim de evitar que a inércia dos movimentos do robô interfira na precisão da usinagem (SHIMADA MACHINERY, 2015).

Independentemente do tipo de aplicação, toda a flexibilidade de movimentos dos robôs articulados tem um custo, que está diretamente associado à complexidade de programação e aos periféricos necessários para o funcionamento. Os conceitos de aplicação podem variar também em função do tempo de ciclo da célula. Segundo Groover (2008), em muitas aplicações são viáveis os investimentos em robôs, pois eles podem atender a diversas tarefas industriais, devido às suas capacidades para responder a estímulos sensoriais, se comunicar com outras máquinas e até mesmo tomar decisões.

2.3.4 Manipulador pórtico

Os manipuladores de peças tipo pórtico, em geral, são aplicados para peças de médio porte, dos tipos *blanks* ou eixos (FERRARI, 2009). São classificados como robôs cartesianos e são conhecidos como *Gantry Loaders*. As classificações de robôs são definidas de acordo com os tipos de juntas utilizadas para conectar seus elos. No caso dos manipuladores pórticos, seus elos são conectados utilizando-se juntas prismáticas, de modo que seja possível obter-se movimentos lineares nos eixos x, y e z. O volume de trabalho formado pelo manipulador pórtico é um prisma retangular, onde pode-se observar que existem três elos conectados por três juntas prismáticas. Na Figura 2.27 é apresentada uma aplicação de manipulador pórtico em centros de torneamento integrados, onde pode-se observar as características descritas.

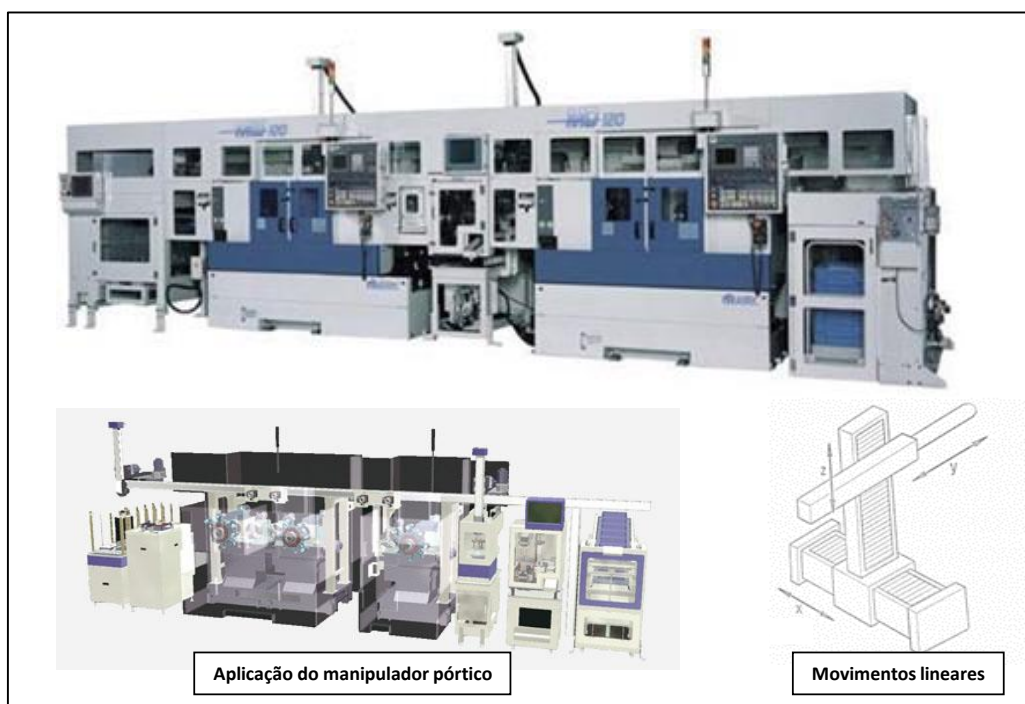


Figura 2.27 – Exemplo de aplicação de um manipulador pórtico para uma linha de torneamento. Adaptado de: Murata Machinery (2012).

Segundo Murata Machinery (2012), os manipuladores pórticos possibilitam planejamento de linha, permitindo fluxo de trabalho linear e maior produtividade no processo de torneamento. Assim como foi mencionado para o robô articulado aplicado no conceito *Top Loader*, os manipuladores pórticos possibilitam aos operadores acessarem as máquinas individualmente, como mostrado na Figura 2.28, não sendo necessário interromper o funcionamento de toda a célula automatizada, reduzindo desta forma, as ineficiências operacionais.

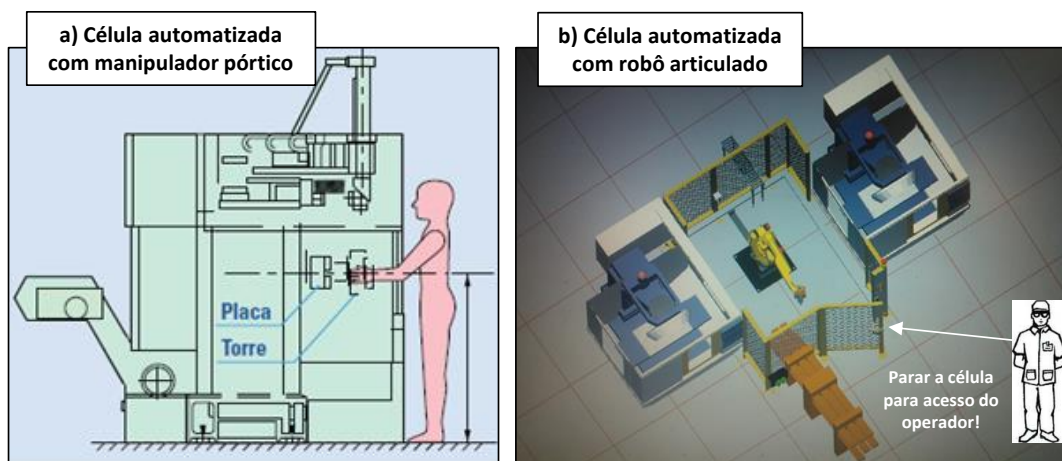


Figura 2.28 – Ilustração do acesso do operador nos diferentes tipos de células automatizadas: a) Manipulador pórtico (MURATA MACHINERY, 2012) e b) Robô articulado vertical. Adaptado de: Kas Engenharia (2013).

Normalmente, os manipuladores pórticos são utilizados em situações em que não são necessários movimentos muito complexos, sempre para peças a partir de *blanks* pré-formados, requerendo uma programação mais simples. Para aumentar a autonomia de trabalho para funcionamento automático, são integrados complementarmente magazines para armazenamento e orientação das peças (magazines de carga e descarga). Os manipuladores que realizam a carga e a descarga das peças movimentam-se linearmente em um trilho aéreo e possuem garras com características específicas para cada tipo de peça a ser manipulada. Na Figura 2.29 é apresentada a estrutura de um manipulador pórtico integrado a um centro de torneamento duplo frontal e na Figura 2.30 são demonstrados exemplos de sistemas de garras (MURATA MACHINERY, 2012).

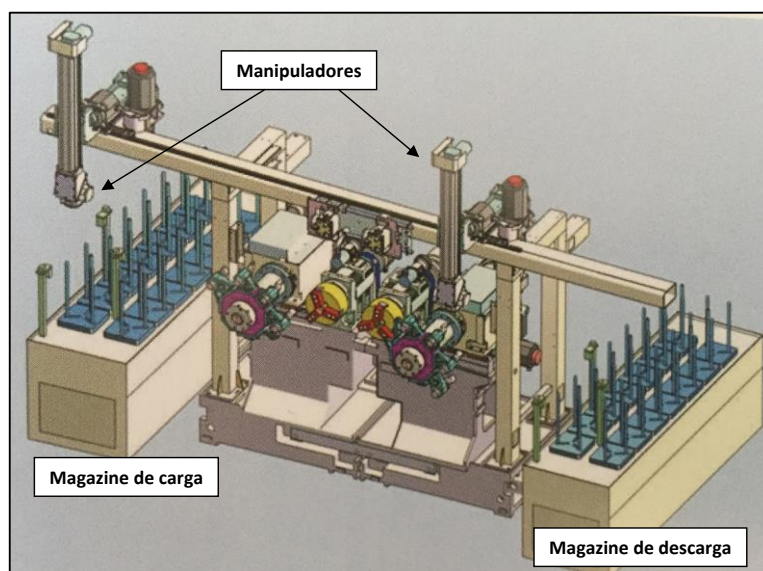


Figura 2.29 – Estrutura de um manipulador pórtico integrado a um centro de torneamento duplo frontal (MURATA MACHINERY, 2012).

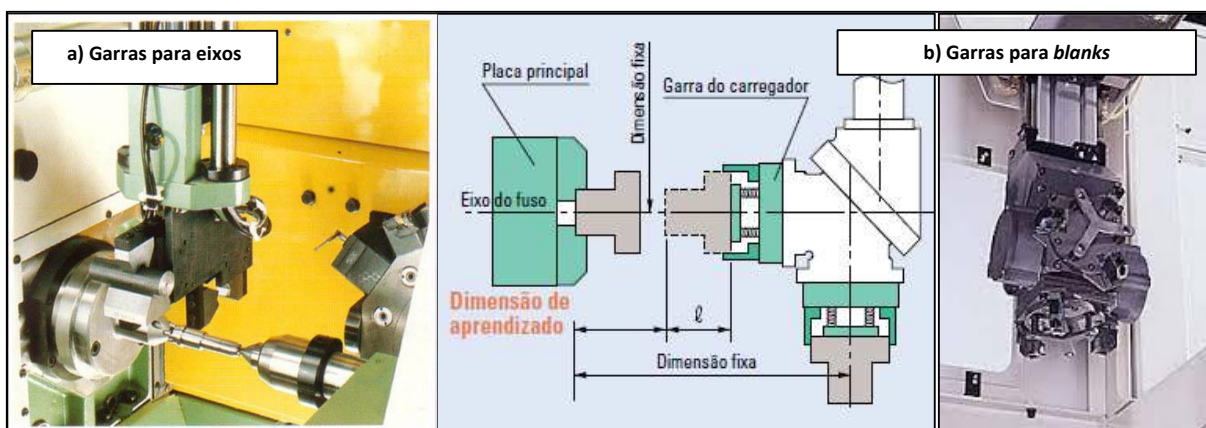


Figura 2.30 – Sistemas de garras para manipuladores pórticos: a) Garras para eixos (FERRARI, 2009) e b) Garras para *blanks* (MURATA MACHINERY, 2012).

Os sistemas de garras possuem um mecanismo duplo, primeiramente para retirar a peça usinada no ciclo de usinagem anterior e, em seguida, para colocar a próxima peça bruta que será usinada. Após o procedimento automático de carga e descarga da máquina, a peça acabada é transportada para um magazine de descarregamento ou mesmo para uma esteira mecânica, concluindo desta forma, o ciclo completo de usinagem (MURATA MACHINERY, 2012).

De acordo com DMG MORI (2016), os manipuladores pórticos são aplicados em centros de torneamento destinados para produção massiva, principalmente para peças automotivas e de componentes industriais diversos. Podem ser aplicados em centros de torneamento com fusos dispostos frontais ou horizontais, em ambos os casos com acesso superior do manipulador com as garras, conforme é mostrado na Figura 2.31.

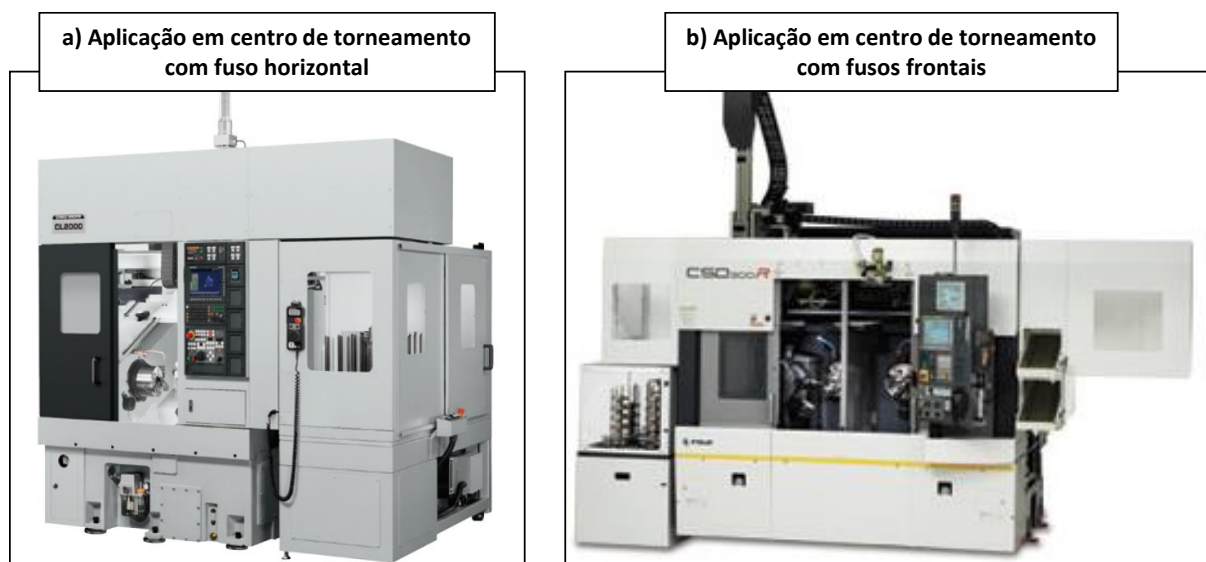


Figura 2.31 – Aplicações de manipuladores pórticos em centros de torneamento: a) com fuso horizontal (DMG MORI, 2017) e b) com fusos frontais (FUJI MACHINES, 2017).

Os manipuladores pórticos geralmente são aplicados em centros de torneamento, em centros de usinagem (principalmente os que possuem concepções horizontais) e em máquinas multitarefas. Segundo Fuji Machines (2017), são projetados para atender as formas e os requisitos dimensionais das peças pretendidas, tendo como objetivo o balanceamento entre as operações que compõem o processo de usinagem (*takt time*), favorecer o planejamento da linha devido à economia de espaço e integrar os demais equipamentos entre as fases de manufatura.

2.3.5 Trocador de placas

Alguns centros de torneamento possuem características construtivas que possibilitam trocar as placas automaticamente, contudo, trata-se de uma tecnologia aplicável somente em peças a partir de *blanks* pré-formados. De acordo com Shimada Machinery (2015), estes equipamentos integram dois fusos e uma torre porta-ferramentas, conforme é apresentado na Figura 2.32, combinando a alta produtividade de um torno multifuso com a flexibilidade de um torno CNC.

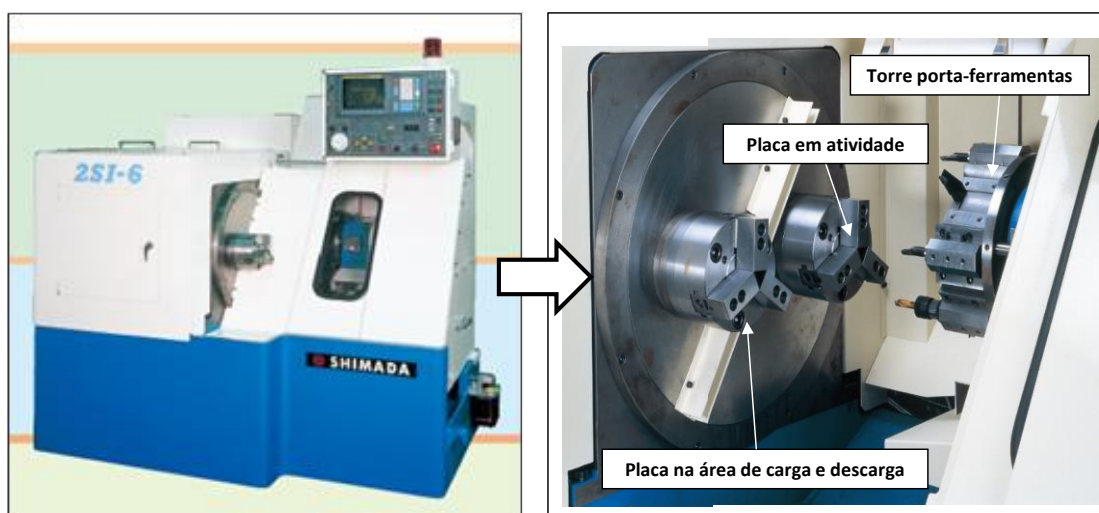


Figura 2.32 – Conceito construtivo de um centro de torneamento com trocador de placas (SHIMADA MACHINERY, 2015).

Nos centros de torneamento com trocadores de placas, a área para carga e descarga fica localizada do lado de fora da máquina, separada da área de usinagem por uma porta deslizante, possibilitando que o operador trabalhe de maneira segura e ergonômica em condições de carga e descarga manuais. O mecanismo tipo tambor que contempla os fusos e as placas é posicionado por um acoplamento cúbico de precisão, de forma a proporcionar uma indexação confiável, com longa vida útil e repetibilidade. Na Figura 2.33 é demonstrado o conceito funcional e construtivo do mecanismo trocador de placas, com a ilustração do sistema de indexação das placas (para indexações de 180 graus entre os fusos 1 e 2) e a imagem do acoplamento cúbico de precisão.

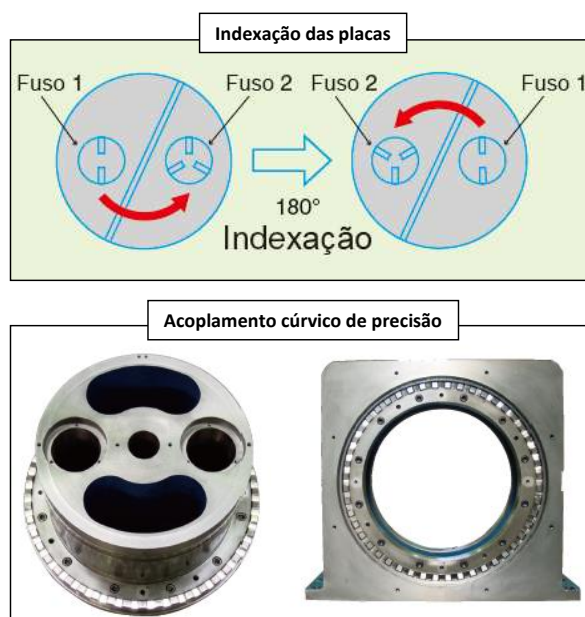


Figura 2.33 – Conceito funcional e construtivo do mecanismo trocador de placas (SHIMADA MACHINERY, 2015).

De acordo com Shimada Machinery (2015), os fusos dos trocadores de placas são indexados alternadamente entre a área de preparação (onde ocorre a carga e a descarga) e a área de usinagem. Após a finalização de um ciclo de usinagem, o mecanismo tipo tambor que contempla os fusos e as placas indexa 180 graus, trazendo uma nova peça para dentro da área de usinagem e, ao mesmo tempo, levando a peça finalizada para a área de preparação para realizar o descarregamento da peça usinada. Então, a placa na área de preparação é novamente carregada por uma peça bruta, para que o mecanismo tipo tambor seja indexado novamente, e assim, repetir todo este processo consecutivamente. Como o procedimento de carga e descarga ocorre paralelamente ao ciclo de usinagem de outra peça em operação, tem-se uma redução muito expressiva do tempo de carga e descarga que compõe o tempo de ciclo da peça, reduzindo o tempo de ciclo total e proporcionando aumento de produtividade.

Este conceito de centro de torneamento possibilita a realização de duas operações em uma única máquina, onde a cada dois ciclos tem-se uma peça acabada. Em função disso, além da redução do tempo de ciclo de usinagem devido à redução dos tempos de carga e de descarga, os trocadores de placas possibilitam eliminar os desbalanceamentos frequentemente encontrados entre as operações de torneamento em ambientes de produção seriada. Convencionalmente são utilizados dois tornos CNC ou dois centros de torneamento para realizar duas operações de torneamento, onde a operação com maior tempo de ciclo é dada como gargalo e, por esta razão, determina a cadência produtiva do processo. Neste conceito de

equipamento, tem-se somente um fuso ativo, porém, com duas placas para realizar duas operações de torneamento consecutivamente. Sendo assim, o tempo total de ciclo de uma peça passa a ser determinado pela somatória dos tempos de ambas as operações consecutivas, eliminando a operação gargalo e consequentemente o desbalanceamento entre as operações do processo de torneamento.

Nos centros de torneamento com trocadores de placas podem-se ainda integrar complementarmente outros tipos de automações, como magazines pórticos, robôs articulados e magazines mecanizados. Com o aumento do grau de automação dessas máquinas, tem-se uma diminuição da intervenção do operador para os procedimentos de carga e descarga das peças. Na Figura 2.34 são apresentados exemplos de automações integradas aos centros de torneamento com trocadores de placas.

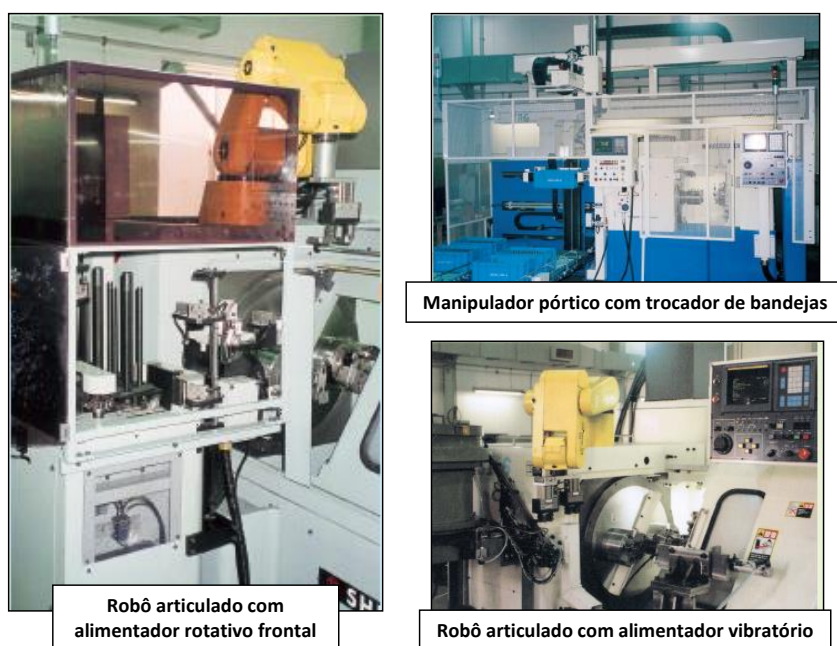


Figura 2.34 – Exemplos de automações integradas aos centros de torneamento com trocadores de placas (SHIMADA MACHINERY, 2015).

Existem centros de torneamento com tecnologia para troca das placas aplicável também em quatro fusos, dos quais dois deles são ativos e permanecem dentro da área de usinagem, enquanto que os outros dois permanecem na área de preparação para realização do procedimento de carga e descarga das peças (SHIMADA MACHINERY, 2012). Estes centros de torneamento podem ser horizontais para peças menores ou verticais para peças maiores, como apresentado nas Figuras 2.35 e 2.36. Contudo, os conceitos funcionais e construtivos de ambos são muito similares.



Figura 2.35 – Centro de torneamento horizontal com trocador de placas duplo (SHIMADA MACHINERY, 2012).



Figura 2.36 – Centro de torneamento vertical com trocador de placas duplo (SHIMADA MACHINERY, 2014).

De acordo com Maus Machine Utensili Speciali (2014), desde que o procedimento para carga e descarga das placas ocorra fora da área de usinagem da máquina-ferramenta, pode-se facilmente integrar mecanizações e automações customizadas para cada tipo de aplicação, sempre respeitando os requisitos de forma e dimensões das peças pretendidas. Os centros de torneamento com trocadores de placas e as demais tecnologias de carga e descarga apresentadas foram consideradas como premissas para o método seletivo proposto.

A seguir, são apresentados os tempos de usinagem, com definições sobre as parcelas que compõem o tempo total de ciclo de uma peça, assim como os respectivos cálculos para projeções de produtividade e necessidades em termos de manufatura.

2.4 Tempos de usinagem

Segundo Coppini (2015), tempos e custos são sinônimos de produtividade e competitividade, os quais são pontos fundamentais em qualquer atividade que envolva gestão de atividades lucrativas. Para elaborar qualquer processo de usinagem, faz-se necessário calcular o tempo de ciclo de usinagem, para dimensionar a capacidade produtiva em função da quantidade de peças requeridas e também possibilitar o cálculo do custo da peça. Os tempos das operações, neste caso, os tempos de usinagem, são compostos basicamente por tempos efetivos de corte, tempos passivos das máquinas-ferramenta e tempos para o procedimento de carga e descarga. De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013), o ciclo de usinagem de uma peça, pertencente a um lote de Z peças, é constituído diretamente pelas seguintes fases:

1. Colocação e fixação da peça;
2. Aproximação e posicionamento da ferramenta;
3. Corte;
4. Afastamento da ferramenta;
5. Inspeção (se necessário) e retirada da peça.

Além dessas fases, tomam parte indiretamente no ciclo de usinagem (para um lote de Z peças):

6. Preparo da máquina;
7. Remoção da ferramenta para sua substituição;
8. Recolocação e ajuste da nova ferramenta.

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) denotaram essas fases como segue:

T_T - Tempo total de usinagem de uma peça;

T_C - Tempo de corte (fase 3);

T_S - Tempo secundário (fases 1 e 5);

T_a - Tempo de aproximação e afastamento (fases 2 e 4);

T_p - Tempo de preparo da máquina (fase 6);

T_{ft} - Tempo de troca da ferramenta (fases 7 e 8).

O tempo total de usinagem de uma peça, para um lote de Z peças, é dado por:

$$T_T = T_c + T_s + T_a + \frac{T_p}{Z} + \left(\frac{N_t}{Z} \cdot T_{ft} \right) \quad (2.1)$$

N_t é número de trocas da ferramenta para a usinagem do lote de peças e Z é a quantidade de peças em um lote a ser usinado. Na equação 2.2 abaixo, tem-se Z_t como a quantidade de peças usinadas durante a vida T da ferramenta:

$$Z = (N_t + 1) \cdot Z_t = (N_t + 1) \cdot \frac{T}{T_c} \quad (2.2)$$

$$N_t = \left(Z \cdot \frac{T_c}{T} \right) - 1 \quad (2.3)$$

Substituindo a equação 2.3 na equação 2.1, tem-se:

$$T_T = T_c + \left(T_s + T_a + \frac{T_p}{Z} \right) + \left(\frac{T_c}{T} - \frac{1}{Z} \right) \cdot T_{ft} \quad (2.4)$$

Então,

$$T_T = T_c + \left(T_s + T_a + \frac{T_p}{Z} - \frac{1}{Z} \cdot T_{ft} \right) + \left(\frac{T_c}{T} \right) \cdot T_{ft} \quad (2.5)$$

Portanto, pode-se ver na equação 2.5 que o tempo total de usinagem de uma peça pode ser dividido em três parcelas, isto é:

$$T_T = T_c + T_1 + T_2 \quad (2.6)$$

Na qual:

T_c - Tempo de corte, que diminui com o aumento da velocidade de corte;

T_1 - Tempo improdutivo, referente à colocação, inspeção e retirada da peça, aproximação e afastamento da ferramenta, substituição da ferramenta e preparo da máquina para a usinagem de um lote, que é independente da velocidade de corte;

T_2 - Tempo relacionado com a troca da ferramenta. Quanto maior a velocidade de corte, menor a vida da ferramenta e maior é o número de paradas da máquina para substituição da mesma. Diante disso, maior também esta parcela.

Nesta condição apresentada por Diniz, Marcondes e Coppini (2013), o ciclo de usinagem de uma peça é calculado levando em consideração alguns fatores indiretos ao processo de usinagem, como preparação (*set up* da máquina e do processo), inspeção de peças e substituição de ferramentas, de forma a fracionar parte destes fatores proporcionalmente ao tamanho do lote de peças e integrá-los ao tempo de ciclo verificado na máquina-ferramenta em produção. Já os fabricantes de máquinas-ferramenta (tais como Romi, Mazak, DMG Mori, Makino, EMAG, Doosan, Murata, Shimada, Fanuc, Tsugami, entre outros), utilizam uma forma de cálculo mais simples e direta para o tempo de ciclo total de uma peça, sendo:

$$T_T = T_c + T_P + T_{LU} \quad (2.7)$$

Na qual:

$$T_c + T_P = T_M \quad (2.8)$$

Sendo:

T_T - Tempo de ciclo total, que representa a somatória de todas as parcelas;

T_C - Tempos efetivos de corte, onde existem contatos permanentes entre as ferramentas e a peça;

T_P - Tempos passivos da máquina-ferramenta, representados pelos deslocamentos rápidos em G0, pelas trocas de ferramentas, acelerações e desacelerações do fuso e da torre porta-ferramentas, leituras e processamentos de sinais, entre outros;

T_{LU} - Tempos de carga e descarga, para retirar a peça usinada e colocar uma nova peça bruta;

T_M - Tempos de máquina, em que a porta permanece fechada.

Pode-se observar que os fabricantes de máquinas-ferramenta consideram somente os fatores diretamente relacionados ao processo de usinagem para o cálculo do tempo de ciclo de uma peça, de forma que os fatores indiretos anteriormente mencionados, sejam considerados somente no apontamento da eficiência real de produção. Na Figura 2.37 são demonstradas as principais parcelas que compõem o tempo de ciclo de usinagem, conforme adotado pelos fabricantes de máquinas-ferramenta.

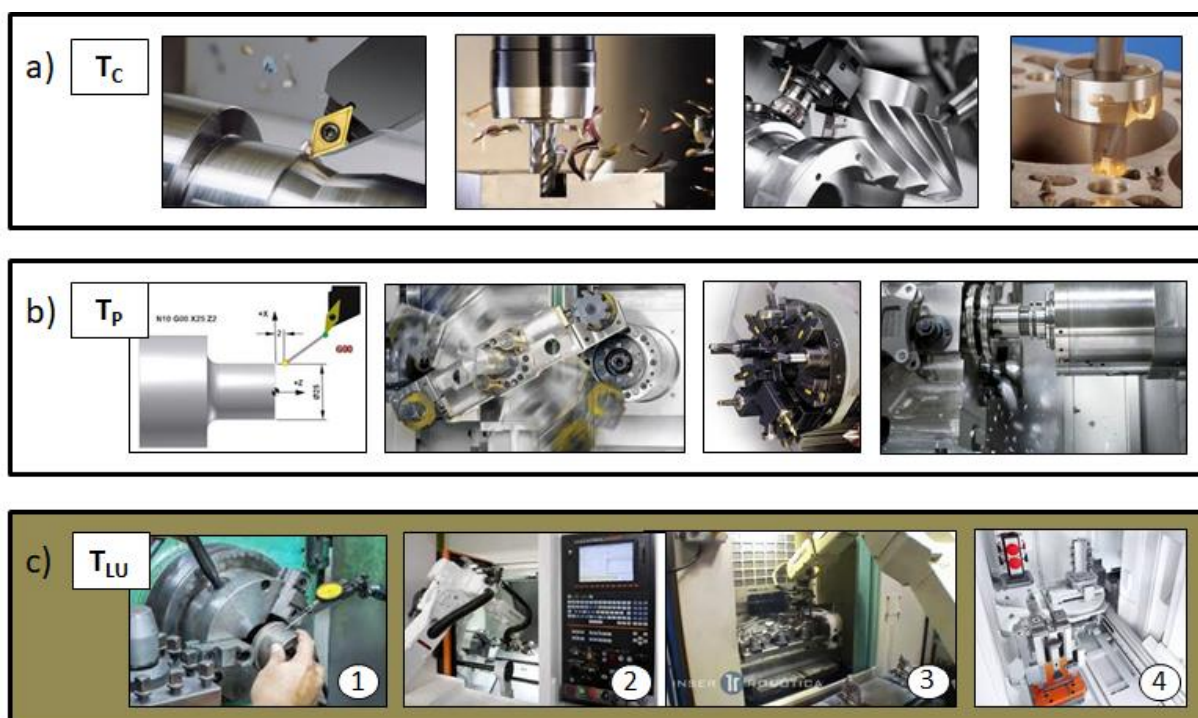


Figura 2.37 – Parcelas que compõem o tempo de ciclo de usinagem. Adaptado de: a) Sandvik Coromant, 2009; b) DMG Mori, 2014; c1) Afonso, 2012 e c2,3,4) Practical Machinist, 2017.

Slack, Chamberse e Jonhston (2009) definem produtividade como o resultado da capacidade de produzir, de gerar um produto, fruto do trabalho, associado à técnica e ao capital empregado. É a relação entre os meios, os recursos utilizados e a produção final. Mas a produtividade depende da eficiência de qualquer negócio. A capacidade de produzir, ou de produção, será denotada como capacidade produtiva no método seletivo proposto por esta tese.

O tempo de ciclo de uma peça é fundamental para o cálculo da capacidade produtiva que, por sua vez, depende da eficiência do processo. Segundo Mariano (2007), a eficiência de um sistema produtivo, chamada de eficiência produtiva, se refere à relação entre os *outputs* (saídas) e *inputs* (entradas) produzidos e utilizados por esse sistema. O índice de eficiência, seja ele qual for, é definido como sendo a divisão entre um indicador de desempenho desse sistema e o valor máximo que esse indicador poderia alcançar (MARIANO, ALMEIDA e REBELATTO, 2006). A eficiência produtiva é expressa de forma percentual (%).

Para dimensionar uma linha de manufatura para um processo de usinagem, deve-se inicialmente determinar o tempo de ciclo total por peça e em seguida realizar os cálculos das capacidades produtivas. Primeiro, tem-se o cálculo da capacidade produtiva horária teórica, dada em peças, dividindo-se o período de uma hora (em segundos) pelo tempo de ciclo total da peça em questão (em segundos por peça).

Capacidade produtiva horária teórica (peças)

$$= \frac{3600 \text{ (segundos)}}{\text{Tempo de ciclo total (segundos/peça)}} \quad (2.9)$$

Multiplicando a capacidade produtiva horária teórica (em peças) pela eficiência produtiva do processo de usinagem (em percentual), tem-se a capacidade produtiva horária real, dada em peças.

Capacidade produtiva horária real (peças)

$$= \text{Capacidade produtiva horária teórica (peças)} \quad (2.10) \\ \times \text{Eficiência produtiva (\%)}$$

Por fim, multiplicando a capacidade produtiva real (que passa a ser expressa em peças por hora) pela quantidade de horas trabalhadas pela empresa de usinagem (em horas por ano), tem-se a capacidade produtiva anual, dada em peças por ano. A quantidade de horas trabalhadas pela empresa de usinagem será denotada como disponibilidade fabril no método proposto.

Capacidade produtiva anual (peças/ano)

$$= \text{Capacidade produtiva real (peças/hora)} \quad (2.11) \\ \times \text{Disponibilidade fabril (horas/ano)}$$

Após os cálculos das capacidades produtivas, são dimensionadas as necessidades de máquinas-ferramenta e de mão de obra. Dividindo-se a quantidade de peças previstas para serem usinadas (em peças por ano) pela capacidade produtiva anual (em peças por ano), tem-se a quantidade de máquinas necessária (necessidade de máquinas), expressa em máquinas.

Necessidade de máquinas (máquinas)

$$= \frac{\text{Quantidade de peças previstas (peças/ano)}}{\text{Capacidade produtiva anual (peças/ano)}} \quad (2.12)$$

Para o cálculo da necessidade de operadores, dada em operadores, multiplica-se a necessidade de máquinas (em máquinas) pela quantidade de operadores requeridos para a condução das máquinas (em operador por máquinas) e pela quantidade de turnos trabalhados (em unidades). As quantidades de operadores requeridos para as conduções das máquinas dependem das tecnologias de manufatura adotadas (principalmente das tecnologias de carga e descarga), que foram analisadas durante os procedimentos experimentais realizados.

Necessidade de operadores (operadores)

$$\begin{aligned}
 &= \text{Necessidade de máquinas (máquinas)} \\
 &\times \text{Quantidade de operadores requeridos (operador/máquinas)} \quad (2.13) \\
 &\times \text{Turnos trabalhados (unidades)}
 \end{aligned}$$

Conforme informado, os cálculos das capacidades produtivas e das necessidades de manufatura (em termos de máquinas e operadores) são necessários para o dimensionamento de um processo de usinagem, mas, além disso, disponibilizam os dados necessários para os cálculos dos custos de usinagem, que são apresentados a seguir.

2.5 Custos de usinagem

O estudo de custos, de acordo com Leone (2008), surgiu nos Estados Unidos paralelamente ao surgimento das atividades industriais, sendo uma técnica independente e sistemática, que objetivava estudar os problemas de mão de obra e seu impacto no custo industrial. Com o passar do tempo, o estudo foi se tornando menos empírico, passando a ser considerado complementarmente os custos de material consumido nas operações, como as despesas de fabricação fixas e variáveis. Posteriormente, foram detectados métodos e critérios para solucionar e aprimorar esta prática.

A meta de toda e qualquer entidade sob qualquer sistema econômico, de acordo com Novaski (1991), é a produção de bens e serviços, os quais deverão satisfazer as necessidades dos consumidores inseridos ao seu redor. Portanto, assim como o consumidor procura produtos que lhe satisfaçam, a empresa procura fatores de produção ou recursos. Isso ocorre de modo que lhe proporcionam a possibilidade de produzir os bens desejados, com boa qualidade e custo adequado. Isso influencia diretamente a formação do preço de venda, bem como a determinação da margem de lucro que a empresa deseja obter na comercialização deste bem ou serviço.

Leone (2008) define custo como um conjunto de procedimentos adotados para a determinação do valor de determinado produto e das várias atividades relacionadas à sua fabricação e/ou produção. Isso objetiva auxiliar no planejamento e na mensuração de desempenho, e os classifica em diversas categorias de custos, sendo algumas destas: custos diretos e indiretos, custos imputados, custos próprios, custos rateados, custos comuns, custos

funcionais, custos estimados, entre outros. No entanto, os tradicionais custos apurados no controle de produção são os custos fixos e variáveis, diretos e indiretos. Quanto a classificação dos custos como diretos e indiretos, Leone (2008) faz uma simples definição, estabelecendo que o custo direto compreende todo e qualquer custo identificável de forma diretamente relacionado à produção. Já o custo indireto, compreende todo e qualquer custo que depende do emprego de recursos para ser identificado, dependendo de métodos de rateio, parâmetros e comportamentos.

Padoveze (2003) identifica a classificação dos custos diretos e indiretos como a mais utilizada e mais antiga forma de classificação relacionada ao objeto do custo. O custo direto é caracterizado por ter ligação direta com o produto final, sendo de fácil identificação e visualização. É um custo claro e específico do produto final, logo não se confunde com outros produtos. O custo indireto é identificado pela difícil alocação de forma direta aos produtos, e em consequência desta impossibilidade de identificação, os custos indiretos são rateados aos produtos por meio de critérios de distribuição, como rateios, alocação e apropriação.

Segundo Novaski (1991), os custos de fabricação se dividem em custos fixos e variáveis, os quais estão ligados com a parte produtiva da empresa. Os custos variáveis oscilam diretamente com a quantidade de material produzido. Este custo incide e se modifica com o processo de produção, cujos exemplos mais apropriados são a matéria prima e a mão de obra direta. Já os custos fixos não variam de acordo com a produção, permanecem iguais, independente de volume de produção. Esses podem ser também denominados de custos invariáveis. Os custos variáveis, de acordo com Cadore (2016), sempre serão custos diretos, e podem ser definidos de forma clara e diretamente ligado a unidade de produto, serviço ou atividade. Já os custos indiretos, são geralmente, custos fixos, e só se interligam aos custos dos produtos, mediante critérios de distribuição ou rateio.

Leone (2008) classifica os custos como dependentes de algum parâmetro ou comportamento que os defina. Nos custos variáveis tem-se um comportamento determinado em relação às unidades produzidas, por exemplo, o comportamento pelo material direto utilizado no processo de produção. Neste caso, considera-se um custo variável em função de que seu parâmetro está relacionado às unidades produzidas. A partir da definição do custo variável, sabe-se que os custos que não variam conforme o volume de produção são definidos como custos fixos, também determinados de custos constantes, como a depreciação que é definida por meio de um modelo fiscal de cálculo, contabilizada mensalmente a um valor fixo.

Para Diniz, Marcondes e Coppini (2013), diversos são os custos envolvidos na produção de uma peça. Pode-se dividi-los em 2 categorias: os custos associados ao processo propriamente dito (como custo das ferramentas e custo de ocupação das máquinas e dos operadores), e os custos não diretamente envolvidos com o processo (como custo de controle de qualidade, custo da matéria prima e custo da mão de obra indireta). Eles enfatizam somente a primeira categoria dos custos apresentados, portanto, os custos diretamente envolvidos com a produção de uma peça por usinagem são:

$$K_P = K_{us} + K_{um} + K_{uf} \quad (2.14)$$

Na qual:

K_P - Custo de produção por peça;

K_{us} - Custo da mão de obra de usinagem;

K_{um} - Custo da máquina (depreciação, manutenção, espaço ocupado, energia consumida, etc);

K_{uf} - Custo das ferramentas (depreciação, troca, afiação, etc).

É importante evidenciar que o custo de produção por peça deveria também envolver outros custos, mas para os objetivos da análise apresentada por Diniz, Marcondes e Coppini (2013), somente a somatória destas 3 parcelas seria suficiente. Logo, essas 3 parcelas citadas podem ser dadas por:

$$K_{us} = T_t \cdot \frac{S_h}{60} \quad (R\$/peça) \quad (2.15)$$

Sendo:

T_t - Tempo total de confecção por peça, em minutos;

S_h - Salário e encargos do operador, em R\$/hora.

$$K_{um} = \frac{T_t}{H.60} \cdot \left[\left(V_{mi} - V_{mi} \cdot \frac{m}{M} \right) \cdot j + \frac{V_{mi}}{M} + K_{mc} + E_m \cdot K_e \cdot j \right] \quad (R\$/peça) \quad (2.16)$$

Na qual:

V_{mi} - Valor inicial de aquisição da máquina, em R\$;

m - Idade da máquina, em anos;

M - Vida prevista para a máquina, em anos;

j - Taxa de juros, por ano;

K_{mc} - Custo anual de manutenção da máquina, em R\$/ano;

E_m - Espaço ocupado pela máquina, em m²;

K_e - Custo do m² ocupado pela máquina, em R\$/m².ano;

H - Número de horas de trabalho, por ano.

Assim o custo da máquina é dado por:

$$K_{um} = \frac{T_t}{60} \cdot S_m \text{ (R\$/peça)} \quad (2.17)$$

Onde:

S_m - Custo total da máquina, em R\$/hora;

No caso de se utilizar pastilhas intercambiáveis como ferramenta, o custo da ferramenta por vida é dado por:

$$K_{uf} = \frac{V_{si}}{N_{fp}} + \frac{K_{pi}}{N_s} \text{ (R\$/vida da ferramenta)} \quad (2.18)$$

Sendo:

N_{fp} - Vida média do porta-ferramentas, em quantidade de arestas de corte, até sua possível inutilização;

V_{si} - Custo de aquisição do porta-ferramenta;

N_s - Número de arestas de corte da pastilha intercambiável;

K_{pi} - Custo de aquisição da pastilha intercambiável.

O custo da ferramenta por peça é dado por:

$$K_{uf} = \frac{K_{ft}}{Z_t} \text{ (R$/peça)} \quad (2.19)$$

Na qual Z_t é o número de peças usinadas por vida T da ferramenta.

Kiritsis, Neuendorf e Xirouchakis (1999) estimam a importância do custo de uma atividade em um cálculo, considerando que este é capaz de prever o custo de determinado conjunto de atividades, em tempo anterior ao acontecimento do mesmo. Nas operações de usinagem ou de atividades associadas, geralmente, a estimativa do custo ocorre por um planejamento prévio à fabricação da peça, momento este em que pode ser determinado até 70% dos custos totais. Para obtenção do custo de produção, precisa-se classificar o custo das ferramentas, custo de ocupação das máquinas e dos operadores, e os custos indiretamente ligados ao processo. Segundo Taegutec (2014) e outros fabricantes de ferramentas, a estrutura típica de custos em uma empresa de usinagem para produção de peças seriadas é constituída de acordo como mostrado na Figura 2.38.

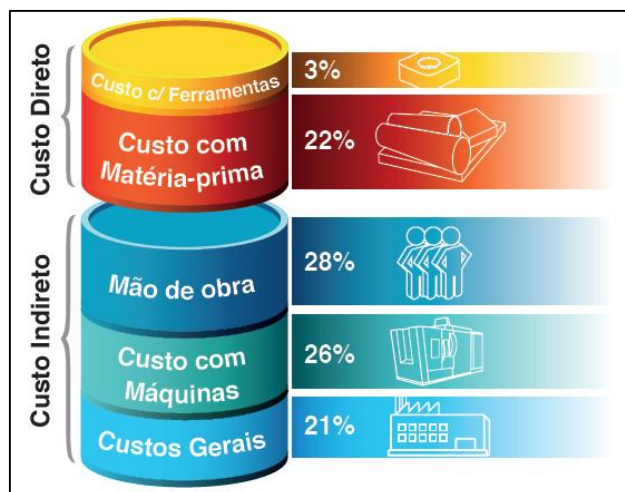


Figura 2.38 – Estrutura típica de custos em uma empresa de usinagem para produção de peças seriadas (TAEGUTEC, 2014).

Pode-se observar que mais da metade dos custos de usinagem estão associados à mão de obra e ao investimento na máquina-ferramenta, variáveis que estão associadas ao tipo de tecnologia de carga e descarga e que é o objeto de estudo desta tese. Com isso, conclui-se a revisão da literatura com os custos de usinagem apresentados. A seguir, é apresentado o Capítulo 3 com o método seletivo proposto, que é objetivo desta tese de doutorado.

3 MÉTODO

As reduções dos custos de manufatura são fundamentais para todo tipo de empresa, de forma a contribuir com melhores resultados e possibilitar aumento de lucratividade para os seus acionistas. Os tempos para carga e descarga das máquinas-ferramenta são tempos totalmente improdutivos, que podem ser explorados pelas empresas de usinagem e possibilitar os aumentos de produtividade e lucratividade pretendidos. Esta tese de doutorado propõe um método seletivo para indicar quais tecnologias de carga e descarga são mais adequadas, especificamente para torneamento de peças seriadas, em diferentes condições de manufatura. Na Figura 3.1 são apresentadas as quatro principais parcelas que compõem o método seletivo proposto: 1) Dados de entrada; 2) Premissas para as tecnologias de carga e descarga; 3) Definições e cálculos; 4) Resultados apresentados pelo método proposto.

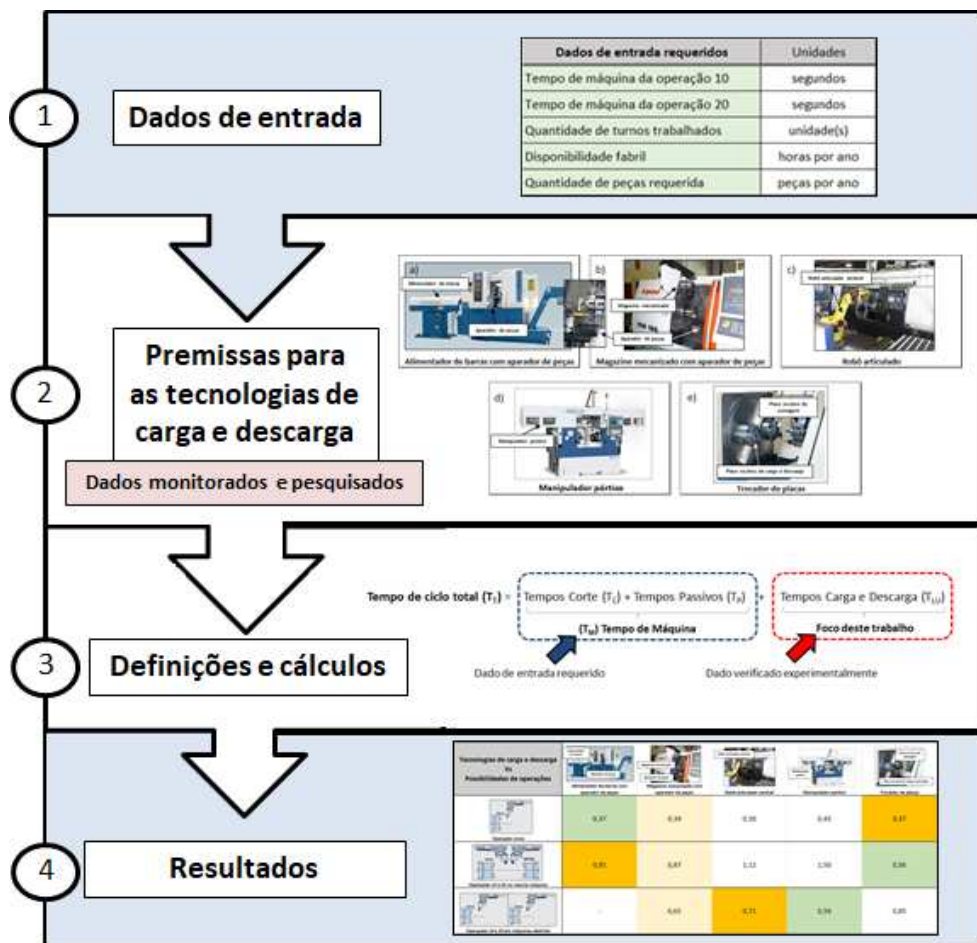


Figura 3.1 – Resumo das parcelas que compõem o método seletivo proposto.

Os dados de entrada referem-se ao processo de torneamento pretendido para análise. O método utiliza os tempos e as eficiências reais das tecnologias de carga e descarga investigadas experimentalmente, realiza automaticamente os cálculos de capacidades, necessidades e custos baseados em premissas assumidas, e por fim, seleciona quais tecnologias de carga e descarga são mais adequadas para cada tipo de aplicação.

Neste capítulo, é apresentado o método seletivo proposto por esta tese de doutorado. Inicialmente, são apresentados os dados de entrada requeridos e, em seguida, são apresentadas as tecnologias de carga e descarga consideradas, assim como as possibilidades de operações para cada uma delas. Na sequência, é mencionada a parte experimental da tese, que consiste em monitorar em condições de produção reais as tecnologias de carga e descarga analisadas, para posteriormente aplicar os resultados obtidos como parâmetros base no método seletivo proposto, gerando um banco de dados *default* que poderá ser alterado pelo usuário, caso julgue necessário. A partir disso, são delimitados os cenários analisados para evitar distorções comparativas, sendo atribuída premissas para o porte dimensional das peças e para as características dos equipamentos referentes às suas capacidades de torneamento. Então, são apresentados os cálculos realizados pelo método seletivo, de forma a esclarecer as premissas assumidas, principalmente em relação aos custos com mão de obra e aos valores dos investimentos para as tecnologias investigadas (pois sem estes dados não seria possível custear as peças para as análises de viabilidades). Sobre os resultados apresentados pelo método, é demonstrada a forma comparativa que o método seleciona as tecnologias de carga e descarga mais adequadas, mediante os custos por peça das tecnologias analisadas. Esta forma de apresentação dos resultados facilita a compreensão sobre os investimentos necessários, assim como as vantagens técnicas e financeiras dos cenários avaliados.

3.1 Dados de entrada

Os dados de entrada referem-se às variáveis básicas sobre o processo de usinagem pretendido para análise e devem ser inseridos no método seletivo. No Quadro 3.1 são apresentados os dados de entrada requeridos e as respectivas unidades de mensuração para a utilização no método seletivo proposto.

Quadro 3.1 – Dados de entrada requeridos pelo método seletivo proposto.

Dados de entrada requeridos	Unidades
Tempo de máquina da operação 10	segundos
Tempo de máquina da operação 20	segundos
Quantidade de turnos trabalhados	unidade(s)
Disponibilidade fabril	horas por ano
Quantidade de peças requerida	peças por ano

Primeiro, tem-se os tempos de máquina para as operações 10 e 20, que podem ser estimados por planilhas ou por *softwares* específicos para cálculos de tempos de usinagem, ou mesmo sendo cronometrados no caso de processos já existentes (são os tempos em que a máquina permanece com a porta fechada). Caso o processo em análise não possua a operação 20 (logo sendo operação única), o método desconsidera esta possibilidade de operação dos cálculos a serem realizados. Então, tem-se a quantidade de turnos trabalhados, conforme o regime de trabalho pretendido. Já a disponibilidade fabril, refere-se ao acumulado de horas efetivamente trabalhadas pelo período de um ano, calculada em função da quantidade de horas por turno, de turnos por dia, de dias por mês e de meses por ano. Caso a tecnologia de manufatura não seja dedicada para um único tipo de produto (sendo portanto necessária a realização de *set ups*), deve-se deduzir os tempos previstos para os *set ups* do tempo final a ser inserido no método seletivo. Enfim, tem-se a quantidade de peças requerida, que é a quantidade de peças que precisam ser produzidas de acordo com o processo em análise e que também deve ser projetada pelo período de um ano, para manter-se compatível com as demais unidades inseridas e consideradas pelo método seletivo.

3.2 Premissas para as tecnologias de carga e descarga analisadas

O método seletivo proposto por esta tese adotou como base as tecnologias de carga e descarga mais utilizadas atualmente (verificadas nas empresas de usinagem, voltadas para os processos de torneamento de peças seriadas), de forma que, de acordo com os dados de entrada requeridos para o processo em análise, o método venha a selecionar as tecnologias de manufatura mais adequadas, conforme cada tipo de aplicação. Sendo assim, as tecnologias de carga e descarga analisadas foram:

1. Alimentador de barras combinado com aparador de peças;
2. Magazine mecanizado combinado com aparador de peças;
3. Robô articulado vertical;
4. Manipulador pórtico “*Gantry loader*”;
5. Trocador de placas.

Outras tecnologias de carga e descarga poderão ser inseridas complementarmente no método seletivo proposto (assim como outras combinações delas com diferentes graus de automação), entretanto, somente as tecnologias mencionadas foram analisadas por esta tese de doutorado. Sobre os centros de torneamento com trocadores de placas, são máquinas ainda pouco utilizadas pelas empresas que usinam peças seriadas no Brasil, contudo mostram-se uma alternativa produtiva e adequada para peças com desbalanceamento de tempo de ciclo entre as operações 10 e 20. Esse conceito de equipamento cada vez mais vem sendo considerado para o torneamento de peças seriadas e, portanto, também foi considerado pelo método seletivo proposto. Na Figura 3.2 são ilustradas as tecnologias de carga e descarga analisadas e que são a base para o método seletivo proposto.

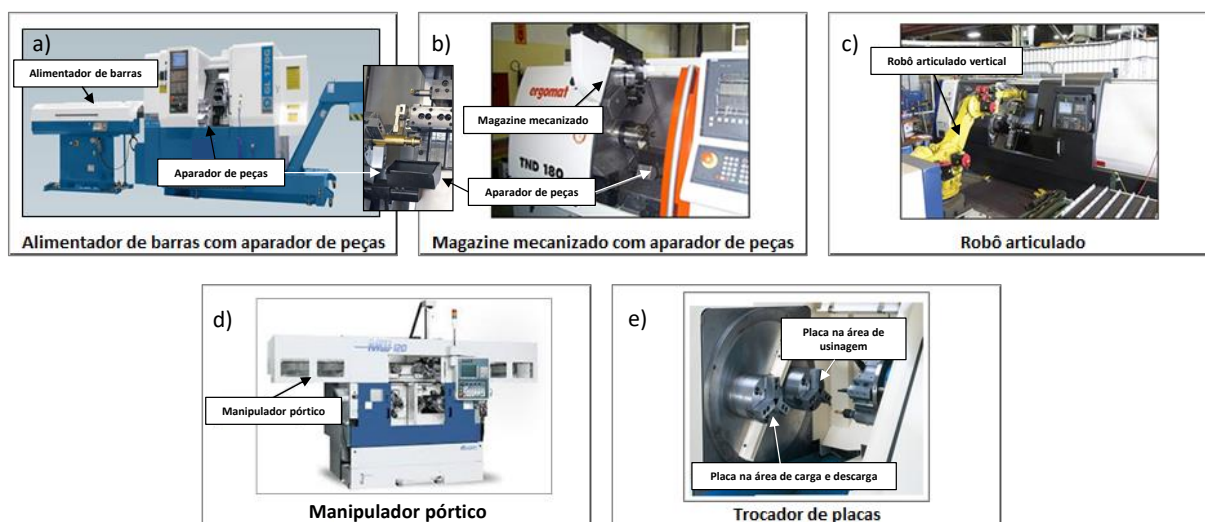


Figura 3.2 – Tecnologias de carga e descarga analisadas. Adaptado de: a) Indústrias Romi, 2014; b) Ergomat, 2007; c) Practical Machinist, 2013; d) Murata Machinery, 2012 e e) Shimada Machinery, 2015.

Além das tecnologias de carga e descarga, fez-se necessário considerar diferentes possibilidades de operações para os diferentes tipos de peças torneadas, sendo:

- ❑ **Operação única** – para peças totalmente torneadas em uma única fase de fabricação, em centros de torneamento com somente um cabeçote e uma torre porta-ferramentas;

- ❑ **Operações 10 e 20 na mesma máquina** – para peças que precisam ser torneadas em duas fases de fabricação e que, em razão de tolerâncias de posição requeridas, necessitam de centros de torneamento que possuem o segundo cabeçote, para transferência automática da peça entre as operações (atribuindo somente o desvio geométrico da máquina para a peça, para garantir as tolerâncias requeridas). Para esta condição, foram considerados centros de torneamento com fusos contrapostos e que possuem a segunda torre porta-ferramentas, para que após a transferência da peça entre as operações, ambos os fusos possam usinar de forma simultânea e independente;
- ❑ **Operações 10 e 20 em máquinas distintas** – para peças que precisam ser torneadas em duas fases de fabricação e que não possuem tolerâncias de posição entre as operações 10 e 20. Para esta condição, foram considerados centros de torneamento com somente um cabeçote e uma torre porta-ferramentas. Podem ser máquinas distintas ou máquinas que possuem fusos e torres porta-ferramentas independentes na mesma estrutura, como é o caso dos centros de torneamento duplo frontais (que também foram considerados pelo método seletivo proposto).

Na Figura 3.3 são ilustradas as três diferentes possibilidades de operações consideradas pelo método seletivo proposto.

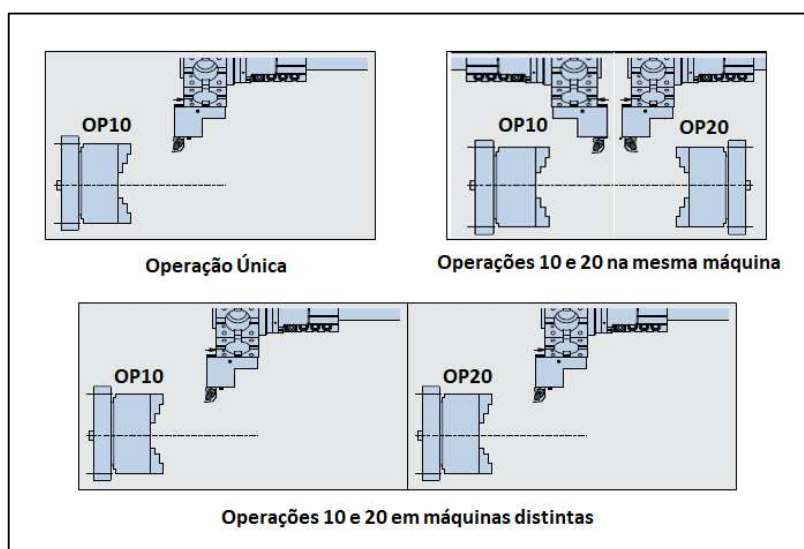


Figura 3.3 – Ilustração das possibilidades de operações consideradas.

Existem ainda peças que demandam mais de duas fases de fabricação para garantir as tolerâncias requeridas e a capacidade do processo. Porém, estes casos não foram considerados pelo método proposto, uma vez que tratam-se de processos específicos, e portanto, não muito utilizados. Deve-se levar em consideração o fator balanceamento na condição em que as peças são torneadas nas operações 10 e 20 em máquinas distintas. Caso uma operação requeira um tempo maior que a outra, tem-se um gargalo produtivo devido ao desbalanceamento e, consequentemente, um nível de utilização inferior do equipamento com menor tempo total de ciclo. As empresas de usinagem buscam constantemente otimizações nos seus processos para minimizar ao máximo os desbalanceamentos. Por este motivo, tem-se esta questão como um importante fator para os propósitos desta tese. É importante comentar que nas outras possibilidades de operações consideradas, tem-se um tempo de ciclo total único, então, nestes casos não ocorrerão desbalanceamentos. No caso das operações 10 e 20 serem usinadas na mesma máquina, o tempo de uma operação soma-se ao da outra, totalizando um único tempo de ciclo total.

3.2.1 Monitoramento das tecnologias de carga e descarga para obtenção de dados reais

A parte experimental da tese consiste no monitoramento das tecnologias de carga e descarga em condições reais de produção, para verificar os tempos de carga e descarga, as eficiências produtivas e as quantidades de máquinas que um operador consegue conduzir, para posteriormente aplicá-los como parâmetros base no método proposto. Os dados obtidos experimentalmente foram comparados com os dados informados pelos fabricantes das tecnologias de carga e descarga e, posteriormente, foram analisados para serem utilizados como um banco de dados *default*, no método seletivo proposto.

Os tempos de carga e descarga e as eficiências produtivas foram monitorados e analisados independentemente dos processos de usinagem, não levando em consideração as operações de usinagem e as tolerâncias praticadas, para manter em caráter confidencial o *know how* das empresas de usinagem que contribuíram para a elaboração desta tese de doutorado. Os tempos de carga e descarga foram dados facilmente verificados nos processos de usinagem avaliados, onde fez-se necessário observar todo o procedimento e cronometrar esta parcela durante o funcionamento da máquina-ferramenta.

De forma genérica, o tempo requerido para procedimento de carga e descarga é composto por:

- 1) Abrir a porta da máquina;
- 2) Soltar a peça usinada no ciclo anterior;
- 3) Retirar a peça usinada;
- 4) Limpar o sistema de fixação para o próximo ciclo de usinagem;
- 5) Colocar a nova peça bruta;
- 6) Fixar a nova peça bruta;
- 7) Fechar a porta da máquina para iniciar o próximo ciclo de usinagem.

A quantidade de máquinas que um operador consegue conduzir também foi verificada pontualmente, com as verificações das condições operacionais das tecnologias avaliadas.

Entretanto, não foi possível avaliar a eficiência produtiva de forma pontual. Para esta avaliação, foi necessário observar indiretamente as capacidades produtivas teóricas e reais das tecnologias consideradas (conforme verificado na revisão da literatura), para somente depois apurar os resultados das eficiências produtivas. Esta análise possibilita verificar as eficiências globais dos processos de torneamento investigados (que são as eficiências das tecnologias de manufatura), das quais também foram analisadas as ineficiências decorrentes das tecnologias de carga e descarga. Como a capacidade produtiva teórica depende do tempo de ciclo total por peça, durante os procedimentos experimentais foram verificados os tempos totais de ciclo das peças em usinagem (nas tecnologias de carga e descarga avaliadas), para possibilitar os cálculos conforme previamente estabelecido.

As capacidades produtivas reais foram os dados monitoramentos nas tecnologias de carga e descarga avaliadas, durante períodos contínuos de manufatura, por meio dos apontamentos das quantidades de peças produzidas por hora. Sendo assim, as capacidades produtivas reais de cada uma das tecnologias de carga e descarga analisadas foram monitoradas continuamente, durante horas, turnos, dias e semanas, totalizando o período de um mês para consolidar os dados obtidos e evitar conclusões pontuais. Basicamente foram utilizadas duas tabelas para os apontamentos das capacidades produtivas horárias reais, sendo: 1) tabela diária, onde, além da capacidade produtiva real, foram informados os motivos das ineficiências (tempos de máquina parada); 2) tabela mensal, onde foram resumidos os apontamentos reais para o cálculo da eficiência produtiva.

Os resultados dos tempos de carga e descarga, das eficiências produtivas e das quantidades de máquinas conduzidas por um operador foram analisados e posteriormente foram inseridos como parâmetros base no método seletivo proposto. Além disso, fez-se também necessário delimitar os tipos de peças e de equipamentos para evitar distorções comparativas. Por esta razão, a seguir são atribuídas premissas para o porte dimensional das peças e para as características dos equipamentos referentes às suas capacidades de torneamento.

3.2.2 Representação dos tipos de peças contemplados pelo método seletivo proposto

O método seletivo proposto aplica-se para um gênero de peças de pequeno porte dimensional, principalmente as que possuem baixos tempos de ciclo de usinagem e que são produzidas em regimes seriados, não sendo, portanto, aplicado a um tipo específico de peça, mas sim para o torneamento de diversos tipos de peças. Para isso, fez-se necessário adotar como premissa um envelope de usinagem teórico, de forma a determinar quais os tipos de peças que podem ser compreendidas dimensionalmente pelo método seletivo. Na Figura 3.4 são apresentados exemplos de peças torneadas que são contempladas pelo método seletivo proposto.



Anéis



Pinos



Engrenagens (blanks)



Buchas



Rolamentos (capas e anéis)



Conexões

Figura 3.4 – Exemplos de peças torneadas e que são contempladas pelo método seletivo proposto.

Tomando como base os tipos de peças apresentados e como exemplo muitos outros componentes automotivos com tais características, observam-se diferentes formas, dimensões e tolerâncias. Consequentemente, cada uma delas possui diferentes tempos de ciclo de usinagem.

O envelope de usinagem considerado pelo método seletivo compreende primeiramente as capacidades dos centros de torneamento considerados, mas, além disso, necessariamente também atende às capacidades dimensionais e de carga das tecnologias de carga e descarga investigadas, que geralmente são inferiores às capacidades das máquinas-ferramenta nas quais são integradas. Em uma análise prévia, o limitante em termos de capacidade dimensional e de carga foi o manipulador pórtico “*gantry loader*”, que para as condições estabelecidas, limitaria as peças que partem de *blanks* segmentados no diâmetro externo em 120 mm e no comprimento em 140 mm, sendo aplicado para peças de até 3 kg (desconsiderando peças a partir de barras, que dependem da passagem do cabeçote do centro de torneamento). Diante disso, na Figura 3.5 é apresentado o envelope de usinagem teórico para representar os tipos de peças contempladas pelo método seletivo proposto e ao lado o exemplo de uma peça compreendida pelo envelope de usinagem estabelecido.

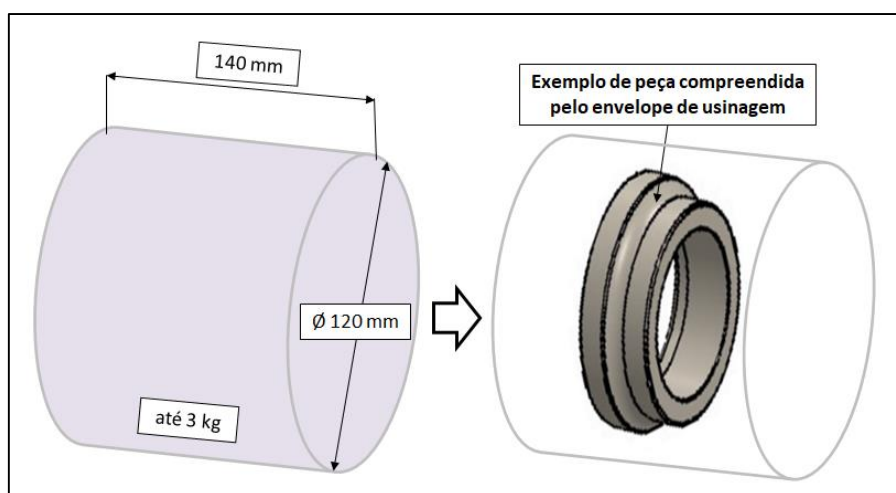


Figura 3.5 – Envelope de usinagem teórico para representar os tipos de peças contempladas pelo método seletivo proposto e o exemplo de uma peça compreendida pelo envelope de usinagem estabelecido.

Diversos tipos de peças, para os setores de máquinas e equipamentos, agrícolas e da construção civil, médicas e odontológicas e, principalmente do setor automotivo, também são representadas por este envelope de usinagem teórico, pois além destas características dimensionais e de carga, uma grande parte delas caracteriza-se também pelos baixos tempos de ciclo de usinagem e por regimes de produção seriada.

Definido o envelope de usinagem para as peças contempladas pelo método, o próximo tópico tratará as características técnicas dos equipamentos em relação às suas capacidades de torneamento.

3.2.3 Características dos equipamentos referentes às suas capacidades de torneamento

Após a definição do envelope de usinagem teórico, foi necessário equalizar as principais características dos equipamentos referentes às suas capacidades de torneamento, para evitar distorções nas comparações técnicas e também em relação aos investimentos necessários (pois influenciam diretamente o custo por peça final). Por exemplo, as máquinas com capacidades dimensionais superiores requerem investimentos com valores superiores e são mais lentas, nas quais, apesar da maior capacidade de remoção, disponibilizam nos seus fusos rotações inferiores. Rotações inferiores nos fusos muitas vezes limitam as velocidades de corte compatíveis com peças de pequeno porte dimensional.

Para esta equalização, foram considerados dados técnicos somente de equipamentos considerados como de alto desempenho pelas empresas de usinagem, sendo adotados basicamente centros de torneamento voltados para regimes de produção seriada. As principais capacidades de torneamento estão associadas às características do cabeçote, que contempla o eixo-árvore e que possibilita o acoplamento do sistema de fixação adotado. Independente da utilização de placas, aparelhos de pinças ou dispositivos de fixação especiais, todos estes sistemas são acoplados ao conjunto cabeçote pelo eixo-árvore, sendo considerado para as tecnologias de torneamento analisadas o padrão ASA A2-5". Cabeçotes com eixos-árvore padrão ASA A2-5" normalmente possuem motores com pelo menos 11 kW (15 cv), com rotações até 6.000 RPM e capacidades de barras até 51 mm. Estas especificações foram adotadas como premissas para o método seletivo, pois frequentemente são encontradas no mercado mundial de usinagem e normalmente são aplicadas para torneamento de peças com pequenas dimensões, com baixos tempos de ciclo de usinagem e produzidas em regimes seriados. Na Figura 3.6 e no Quadro 3.2 são apresentadas as capacidades de torneamento que foram consideradas pelo método seletivo, para a equalização técnica das propostas dos fabricantes de centros de torneamento apresentada no Capítulo 4.

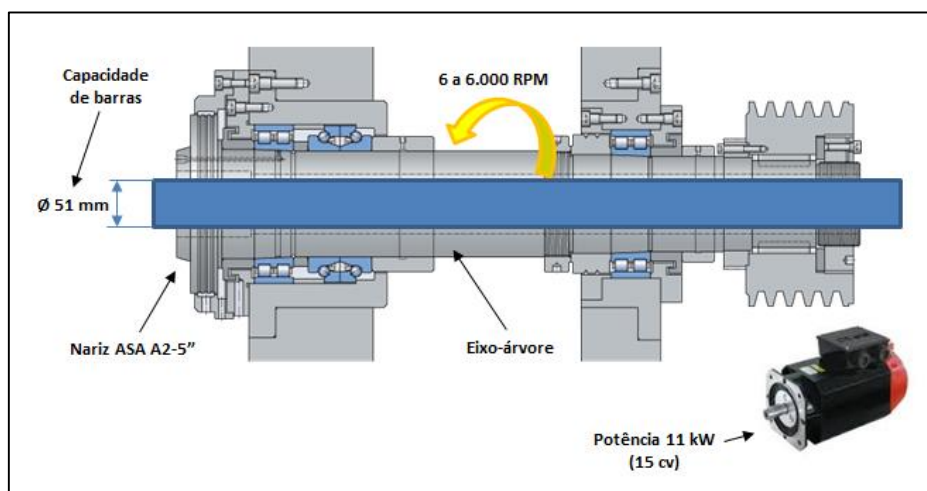


Figura 3.6 – Ilustração do eixo-árvore demonstrando as capacidades de torneamento consideradas. Adaptado de: Indústrias Romi, 2007.

Quadro 3.2 – Capacidades de torneamento para os equipamentos considerados (INDÚSTRIAS ROMI, 2014).

Capacidades de torneamento		
Nariz do eixo-árvore	ASA	A2-5"
Potência do motor principal	kW	11
Gama de velocidades	RPM	6 a 6.000
Capacidade de barras	mm	51

Fabricantes de centros de torneamento com altos níveis tecnológicos normalmente adotam tais capacidades de torneamento em suas máquinas, mais precisamente referindo-se aos fabricantes japoneses e alemães, que são as principais referências em termos de tecnologias de torneamento voltadas para regimes de produção seriada.

3.3 Definições e cálculos

Com a inserção dos dados de entrada referentes ao processo pretendido para análise e com os parâmetros extraídos das tecnologias de carga e descarga investigadas, o método seletivo passa a realizar automaticamente diversos cálculos de capacidades, necessidades e custos, tomando como base as premissas informadas na revisão da literatura. No Quadro 3.3 são apresentados os cálculos realizados pelo método seletivo proposto, com as respectivas unidades de mensuração consideradas.

Quadro 3.3 – Cálculos realizados pelo método seletivo proposto.

Cálculos realizados pelo método seletivo proposto	Unidades
Tempo de ciclo total por peça	segundos
Capacidade produtiva horária teórica	peças
Capacidade produtiva horária real	peças
Capacidade produtiva anual	peças por ano
Necessidade de máquinas	unidade(s)
Necessidade de operadores	unidade(s)
Custo operacional	Reais por ano
Custo da tecnologia de manufatura	Reais por ano
Custo por peça "parcial"	Reais por peça

Inicialmente, o método utilizará os tempos de máquina (que são dados de entrada) e os tempos de carga e descarga (que foram verificados experimentalmente, para serem utilizados no banco de dados *default*), cuja somatória representa o tempo de ciclo total por peça, dado em segundos. Caso a peça em análise possua operações 10 e 20 sem tolerâncias de posição entre elas, o método irá considerar somente o tempo da operação com maior ciclo de usinagem (tempo *Takt*, que prevalece sobre o menor tempo de ciclo e que determina a cadência do processo), sendo este utilizado para os cálculos posteriores das capacidades produtivas.

Em seguida, o método realiza os cálculos das capacidades produtivas, conforme previamente apresentado no item 2.4 da revisão da literatura. Primeiramente, o método calculará a capacidade produtiva horária teórica, dada em peças, dividindo-se o período de uma hora (em segundos) pelo tempo de ciclo total de usinagem da peça em análise (em segundos por peça). Depois, multiplicando a capacidade produtiva horária (em peças) pela eficiência produtiva verificada no procedimento experimental (que consta no banco de dados *default*, dado em percentual), tem-se a capacidade produtiva horária real, dada em peças. Por fim, multiplicando a capacidade produtiva real (que passa a ser expressa em peças por hora) pela disponibilidade fabril informada como dado de entrada (em horas por ano), tem-se a capacidade produtiva anual, dada em peças por ano.

Na Figura 3.7 são apresentados os cálculos do tempo de ciclo e das capacidades produtivas, mostrando onde são utilizados os dados de entrada e os dados verificados experimentalmente.

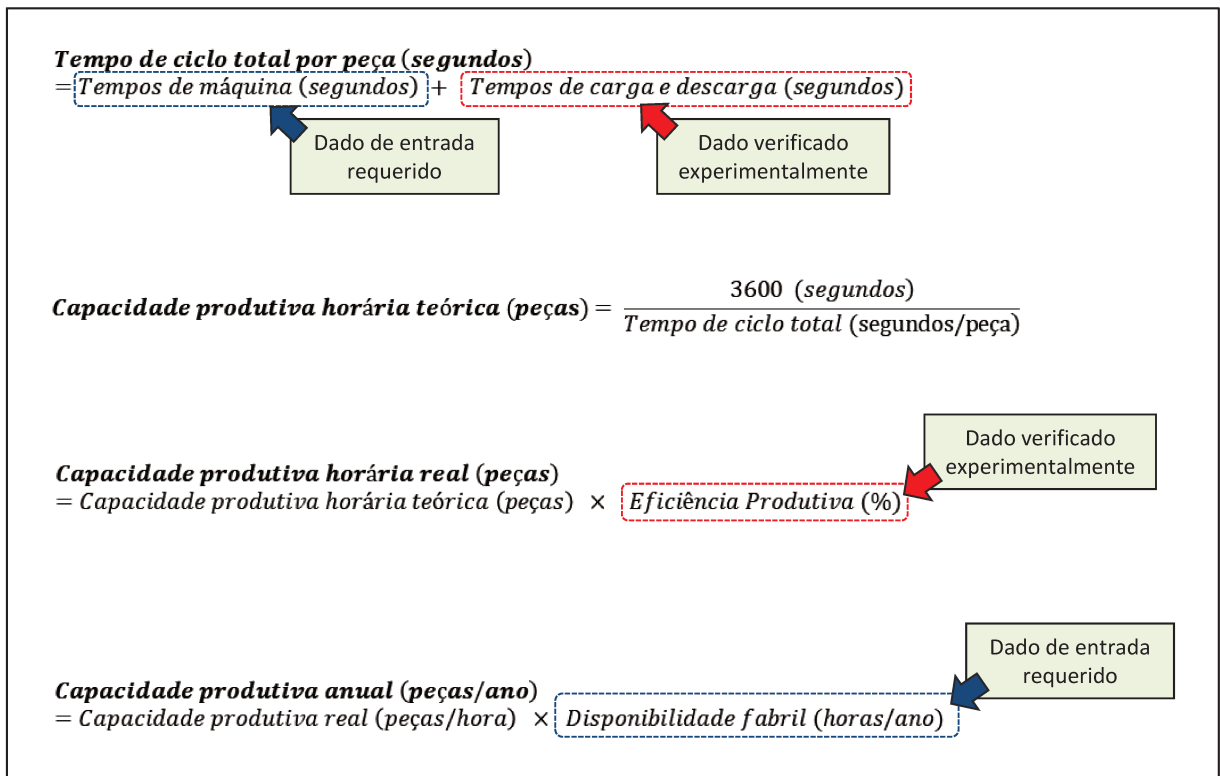


Figura 3.7 – Cálculos do tempo de ciclo e das capacidades produtivas, mostrando onde são utilizados os dados de entrada e os dados verificados experimentalmente.

Na sequência, o método passa a realizar os cálculos de necessidades, em termos de quantidade de máquinas e de operadores. Dividindo-se a quantidade de peças requerida informada como dado de entrada (em peças por ano) pela capacidade produtiva anual (em peças por ano), tem-se a quantidade de máquinas necessárias para o processo de torneamento em análise, expressa em unidades. O método apresenta este resultado de duas formas:

- 1) Apresentando o número fracionado, para o usuário verificar o quanto da capacidade de máquina está sendo requerida pelo processo em análise (por exemplo 0,95 máquina sugere a utilização quase plena de uma máquina);
- 2) Com um “arredondamento para cima”, para apresentar a quantidade de máquinas necessárias como um número inteiro e que passa a ser considerado pelos cálculos posteriores.

Já o cálculo da necessidade de operadores, em unidades, deve ser calculado multiplicando-se a necessidade de máquinas (em unidades) pela quantidade de máquinas conduzidas por operador (em unidades) e pela quantidade de turnos trabalhados (em unidades). Nos procedimentos experimentais foram verificadas as quantidades de máquinas que os

operadores eram capazes de conduzir nas tecnologias de carga e descarga avaliadas, para cada uma das possibilidades de operações, sendo que os resultados destes dados são apresentados no Capítulo 4. Na Figura 3.8 são demonstrados os cálculos de necessidades de máquinas e de operadores, mostrando onde são utilizados os dados de entrada e os dados verificados experimentalmente.

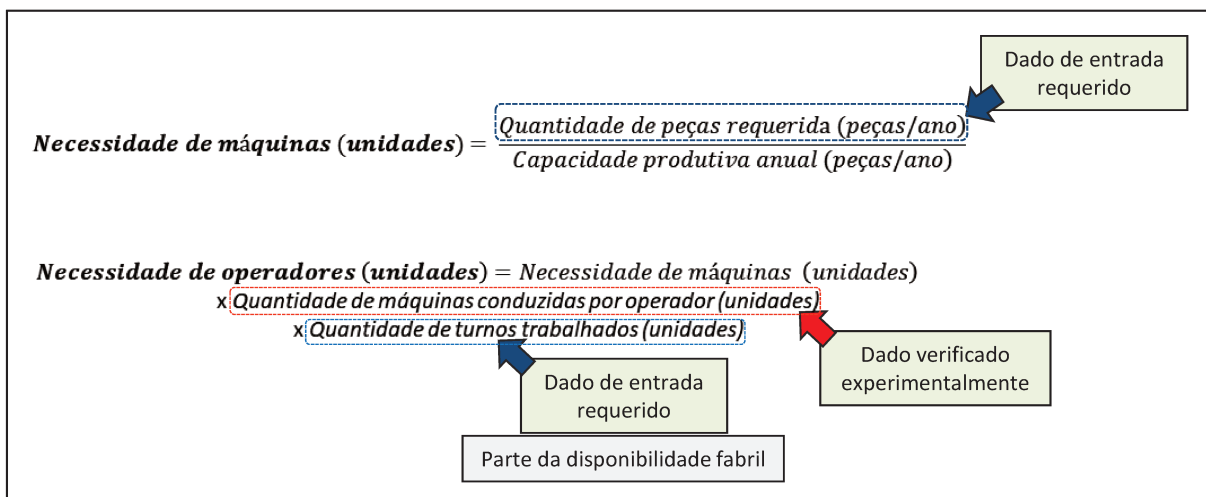


Figura 3.8 – Cálculos das necessidades de máquinas e de operadores, mostrando onde são utilizados os dados de entrada e os dados verificados experimentalmente.

Para traduzir os dados técnicos em apontamentos financeiros que sugerem lucratividade, faz-se necessário analisar o custo de torneamento para a peça em análise.

Conforme verificado na revisão da literatura, a estrutura de custos de uma empresa de usinagem é basicamente composta pelos custos com matéria prima, ferramentas de corte, mão de obra, máquinas e outros gerais. Como esta tese tem como objeto de estudo os tempos de carga e descarga que compõem os tempos de usinagem, nos cálculos de custo por peça são considerados somente os custos com máquinas (tecnologias de manufatura) e os custos com mão de obra (custos operacionais). Durante os procedimentos experimentais realizados nas empresas de usinagem, foram verificadas as estruturas de custo para as peças dos processos analisados (e também para outras peças de outros processos que possuem) e, de forma geral, os custos das tecnologias de manufatura (máquinas-ferramenta com as tecnologias de carga e descarga integradas) com os custos operacionais representam aproximadamente 50% do custo total de uma peça, no caso de usinagem de peças seriadas. Diante disso, os resultados dos cálculos de custo por peça realizados pelo método são parciais e representam aproximadamente 50% do custo total de usinagem, conforme é mostrado na Figura 3.9.

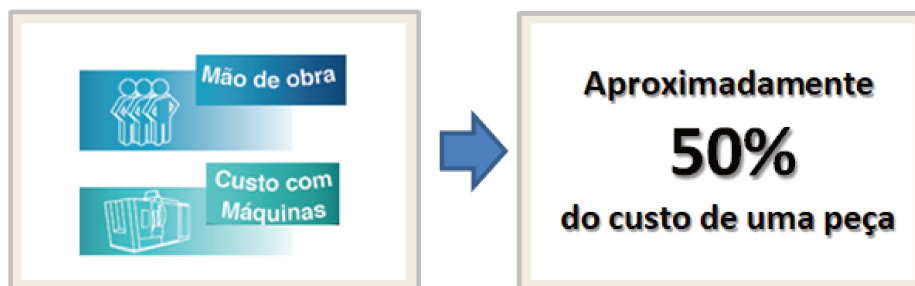


Figura 3.9 – Custos considerados pelo método seletivo proposto.

Os custos referentes ao procedimento de carga e descarga estão diretamente associados aos custos de mão de obra (custos operacionais) e aos custos com máquinas (custos das tecnologias de manufatura). Para o cálculo do custo operacional, dado em Reais por ano, deve-se multiplicar o custo operacional anual de um operador (em Reais por ano) pela necessidade de operadores (em unidades). O custo operacional foi verificado mediante uma pesquisa nas empresas de usinagem (salário mais encargos para um operador) e a necessidade de operadores foi verificada experimentalmente, cujos dados passaram a fazer parte do banco de dados *default* do método seletivo proposto (ambos apresentados no Capítulo 4).

O custo da tecnologia de manufatura, dado em reais, é a somatória do custo da tecnologia de torneamento (em Reais) com o custo da tecnologia de carga e descarga (em Reais). Os custos das tecnologias de torneamento e de carga e descarga estão associados aos investimentos em máquinas para os processos de torneamento em análise. Esses valores foram obtidos por meio de propostas comerciais dos fabricantes de máquinas-ferramenta e das tecnologias de carga e descarga, sendo também apresentados no Capítulo 4. Na Figura 3.10 são apresentados os cálculos do custo operacional e da tecnologia de manufatura, demonstrando onde são utilizados os dados pesquisados nas empresas de usinagem e com os fabricantes.

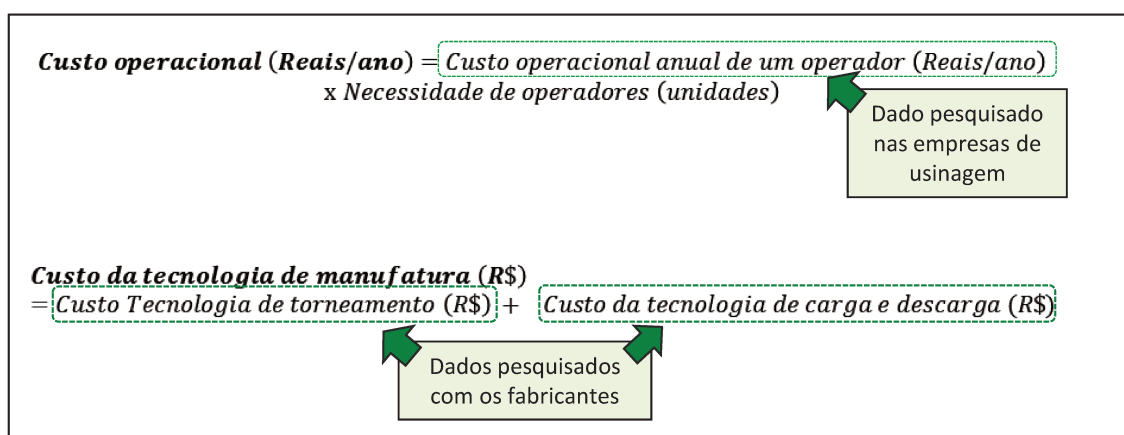


Figura 3.10 – Cálculos do custo operacional e da tecnologia de manufatura, mostrando onde são utilizados os dados pesquisados nas empresas de usinagem e com os fabricantes.

Por fim, tem-se o cálculo do custo por peça “parcial”, dado em Reais por peça, que representa aproximadamente 50% do custo total de uma peça torneada em condição seriada. Para calcular o custo por peça “parcial”, deve-se dividir o valor total dos recursos necessários pela quantidade de peças produzidas. Primeiro, multiplica-se o custo da tecnologia de manufatura (em Reais) pela necessidade de máquinas (em unidades). Sobre este cálculo deve-se considerar a depreciação do(s) equipamento(s), para diluir o investimento em máquina(s) ao longo dos anos. Para os fins do método seletivo proposto, foi considerado 10 anos para depreciação dos equipamentos considerados, sendo portanto necessário dividir o investimento total em tecnologia de manufatura (em Reais) por 10 anos, conforme segue:

Investimento em máquinas (R\$/ano)

$$= \frac{\text{custo da tecnologia de manufatura (R\$)} \times \text{Necessidade de máquinas (unid.)}}{10 \text{ anos}} \quad (3.1)$$

Então, soma-se ao investimento em máquinas (em Reais por ano) o custo operacional (em Reais por ano), para saber o valor total dos recursos necessários anual para o processo de torneamento em análise.

Já a quantidade de peças produzidas anualmente é calculada multiplicando a capacidade produtiva anual (em peças por ano) pela necessidade de máquinas (em unidades).

Logo, tem-se o custo por peça “parcial” sendo:

Custo por peça "parcial" (R\$/peça)

$$= \frac{[\text{Investimento em máquinas (R$/ano)} + \text{Custo operacional (R$/ano)}]}{[\text{Capacidade produtiva anual (peças/ano)} \times \text{Necessidade de máquinas (unid.)}]} \quad (3.2)$$

De forma complementar ao custo por peça “parcial” (utilizado para selecionar as tecnologias de carga e descarga mais adequadas para os processos de torneamento em análise), o método também calculará de forma independente o nível de utilização da tecnologia de manufatura. O nível de utilização demonstra para as empresas de usinagem o quanto cada tecnologia de manufatura efetivamente produz em relação ao capital que foi investido, que é obtido indiretamente, dividindo-se o tempo de máquina (em segundos) pelo tempo de ciclo total por peça (em segundos), dado em valor percentual:

$$\text{Nível de utilização (\%)} = \frac{\text{Tempo de máquina (segundos)}}{\text{Tempo de ciclo total (segundos)}} \times 100 \quad (3.3)$$

Com as definições dos cálculos de tempos de ciclo, capacidades, necessidades e custos estabelecidos, a seguir é demonstrada a forma comparativa que o método seletivo apresenta os resultados, para os processos de torneamento a serem analisados.

3.4 Resultados apresentados pelo método seletivo proposto

O método seletivo realizará automaticamente os cálculos apresentados anteriormente, para todas as tecnologias de carga e descarga analisadas, em todas as possibilidades de operações consideradas. Correlacionando as tecnologias de carga e descarga com as possibilidades de operações, têm-se 14 combinações que são calculadas automaticamente pelo método proposto, conforme é mostrado na Figura 3.11.


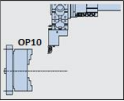
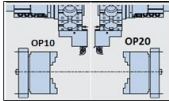

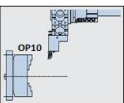
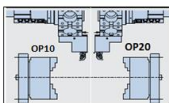
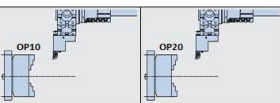

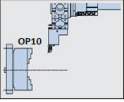
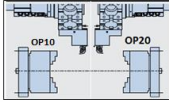
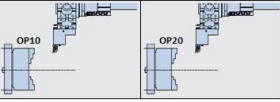

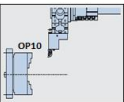
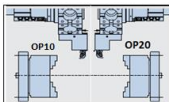
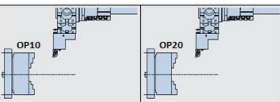

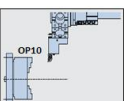
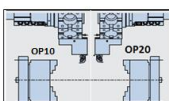
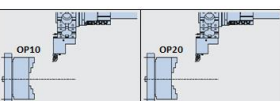
Tecnologias de carga e descarga	Possibilidades de operações		
 <p>Alimentador de barras com aparador de peças</p>	 <p>Operação Única</p>	 <p>Operações 10 e 20 na mesma máquina</p>	Não se aplica!
 <p>Magazine mecanizado com aparador de peças</p>	 <p>Operação Única</p>	 <p>Operações 10 e 20 na mesma máquina</p>	 <p>Operações 10 e 20 em máquinas distintas</p>
 <p>Robô articulado vertical</p>	 <p>Operação Única</p>	 <p>Operações 10 e 20 na mesma máquina</p>	 <p>Operações 10 e 20 em máquinas distintas</p>
 <p>Manipulador pórtico</p>	 <p>Operação Única</p>	 <p>Operações 10 e 20 na mesma máquina</p>	 <p>Operações 10 e 20 em máquinas distintas</p>
 <p>Trocador de placas</p>	 <p>Operação Única</p>	 <p>Operações 10 e 20 na mesma máquina</p>	 <p>Operações 10 e 20 em máquinas distintas</p>

Figura 3.11 – Combinações das tecnologias de carga e descarga com as possibilidades de operações, que são calculadas automaticamente pelo método seletivo proposto.

Como pode ser observado nas combinações apresentadas, a tecnologia alimentador de barras combinado com aparador de peças não pode ser aplicada em operações 10 e 20 em máquinas distintas, pois na usinagem da peça na operação 10 tem-se sua segmentação, logo não sendo possível carregá-la em forma de barras na operação 20. Na Figura 3.12 é apresentado de forma esquemática as variáveis que o método seletivo considera para o cálculo do custo por peça “parcial”, em função dos dados de entrada requeridos e das tecnologias de manufatura avaliadas, para cada uma das 14 combinações possíveis. Nesta figura, pode-se observar que o único dado constante para os cálculos é a tecnologia de torneamento, sendo todos os demais dados variáveis em função do processo de torneamento em análise.

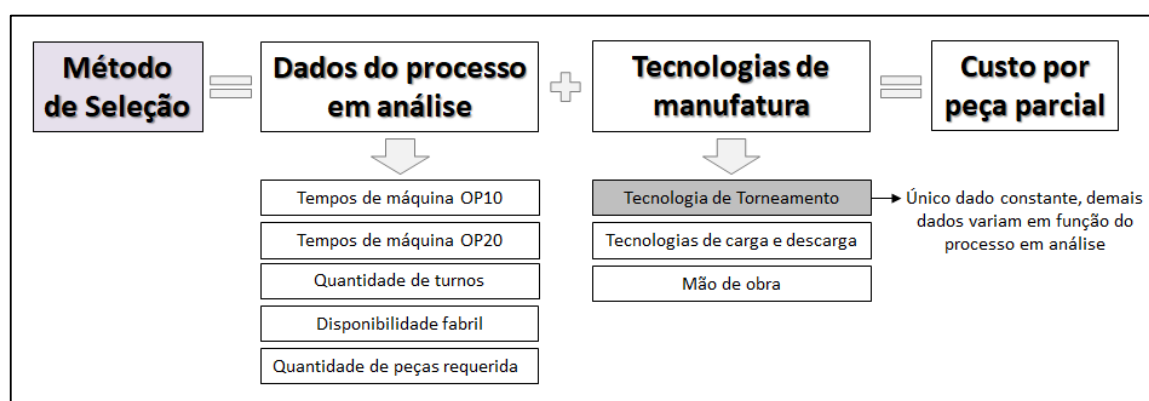


Figura 3.12 – Esquema do cálculo de custo por peça “parcial”, para demonstrar que a tecnologia de torneamento é a única constante nos cálculos realizados pelo método seletivo proposto.

Finalmente, o método seletivo realiza os cálculos para as 14 combinações possíveis de tecnologias de carga e descarga com as possibilidades de operações, apresentando os resultados dos custos por peça “parciais”, conforme o exemplo apresentado no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Exemplo com resultados de custos por peça “parciais”, para cada uma das combinações possíveis.

Tecnologias de carga e descarga Vs Possibilidades de operações	Alimentador de barras Aparador de peças Alimentador de barras com aparador de peças	Magazine mecanizado Aparador de peças Magazine mecanizado com aparador de peças	Robô articulado vertical	Manipulador pórtico	Trocador de placas Placa na área de usinagem Placa na área de carga e descarga
 Operação única	0,37	0,39	0,50	0,45	0,37
 Operações 10 e 20 na mesma máquina	0,91	0,87	1,12	1,50	0,56
 Operações 10 e 20 em máquinas distintas	-	0,65	0,71	0,59	0,85

Após a realização dos cálculos, deve-se selecionar o tipo de operação requerida para o processo de torneamento em análise. Então, o método seletivo ordena os custos por peça “parciais” para as tecnologias de carga e descarga, partindo dos valores menores para os maiores, para demonstrar de forma comparativa as melhores condições para os processos de torneamento em análise, conforme é mostrado na Figura 3.13.



Figura 3.13 – Resultados de custos por peça “parciais”, ordenados para o tipo de operação selecionada.

Nas situações em que os resultados do custo por peça apresentados forem iguais ou próximos, o usuário do método seletivo poderá analisar outros dados técnicos que também são disponibilizados, conforme é mostrado na Figura 3.14. Desta forma, o usuário do método terá outras informações para a sua tomada de decisão, no sentido de qual tecnologia de carga e descarga será mais viável para o processo de torneamento em análise.

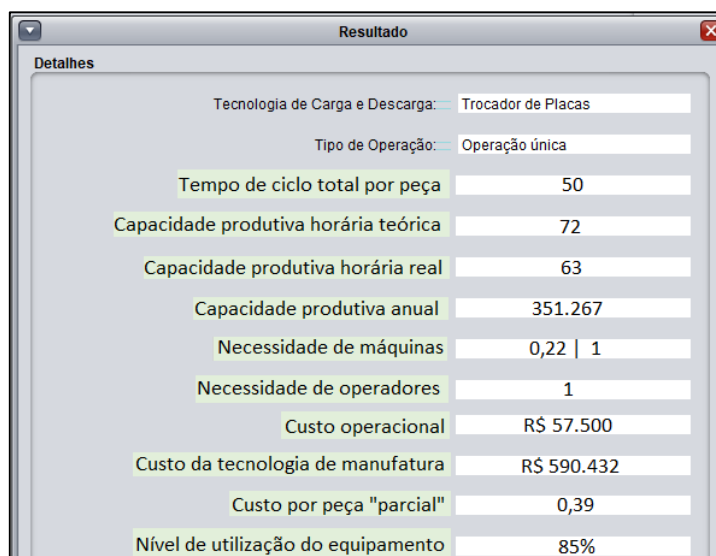


Figura 3.14 – Dados calculados e disponibilizados pelo método para a operação selecionada.

Foi elaborado um *software* específico para as finalidades do método seletivo proposto. Este *software* foi desenvolvido utilizando programação Java, sendo apresentado em detalhes a seguir no Capítulo 4, juntamente com os demais resultados que foram obtidos durante os procedimentos experimentais realizados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com a utilização do método seletivo proposto, com discussões sobre os dados verificados durante os procedimentos experimentais, realizados nas empresas de usinagem que possuem as tecnologias de carga e descarga avaliadas. No início, são apresentados os tempos de carga e descarga, as eficiências produtivas e as quantidades de máquinas que um operador consegue conduzir, conforme os dados verificados nos procedimentos experimentais realizados. Em seguida, são apresentados os custos das tecnologias de manufatura, com os valores das tecnologias de torneamento e das tecnologias de carga e descarga que foram pesquisados, por meio de propostas comerciais dos fabricantes destas tecnologias. Então, são apresentados os custos operacionais, obtidos em diversas empresas de usinagem de diferentes regiões do país, para a definição do valor de mão de obra que passou a ser considerado pelo método.

Na sequência, são mencionadas considerações sobre os estudos de casos prévios realizados com o método seletivo, que foi aplicado nas empresas de usinagem, nas quais foram realizados os procedimentos experimentais. No entanto, parte dos resultados prévios destes estudos de casos apresentaram valores diferentes dos reais e, depois de observações e análises, foram verificados outros fatores que influenciavam os resultados previamente selecionados pelo método. Finalmente, são apresentados os resultados finais dos estudos de casos realizados, após a inserção dos parâmetros de ajuste e com a configuração definitiva do método seletivo proposto, que foram considerados aceitáveis para o propósito desta tese de doutorado.

4.1 Tempos, eficiências e condições de operação das tecnologias avaliadas

Os tempos de carga e descarga foram obtidos de formas diferentes, variando de acordo com as tecnologias de carga e descarga e com as possibilidades de operações analisadas. Para os alimentadores de barras combinados com aparadores de peças, os tempos de carga foram considerados a partir das aberturas das pinças de fixação até os seus fechamentos (tempos em que ocorrem os carregamentos das barras para os próximos ciclos de usinagem), enquanto que

os tempos de descarga foram atribuídos para os movimentos dos aparadores de peças (primeiro abaixo das peças antes da segmentação e depois para descarregá-las nas caixas coletoras).

Nos casos com operações 10 e 20 na mesma máquina, adicionalmente foram considerados os tempos para transferências das peças entre os fusos (exceto para os trocadores de placas, que não possuem fusos contrapostos e, desta forma, não possibilitam as transferências das peças entre os fusos). Nestes casos, o tempo total de carga e descarga é dado pelo tempo de transferência da peça entre os fusos e o maior tempo verificado entre os procedimentos de carga e descarga (o menor tempo constatado é sobreposto pelo procedimento de carga ou descarga mais demorado). Nos magazines mecanizados, os tempos de carga foram obtidos pelas manipulações das peças dos pontos de carregamento até as placas de fixação (manipulações realizadas pela torre ou por empurradores, ambos comentados a seguir). Os tempos de descarga para os magazines mecanizados foram atribuídos aos movimentos dos aparadores de peças, da mesma forma comentada anteriormente, quando combinados com os alimentadores de barras.

Para operações 10 e 20 em máquinas distintas (ou em máquinas que possuem fusos e torres porta-ferramentas independentes na mesma estrutura, como por exemplo os centros de torneamento duplo frontais), ambas as operações ocorrem simultaneamente e, nestes casos, o método considera em seus cálculos o maior tempo de carga e descarga verificado entre as operações analisadas (denotado como tempo *Takt*, considerado entre operações analisadas).

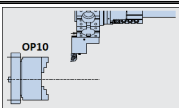
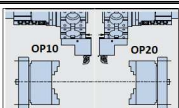
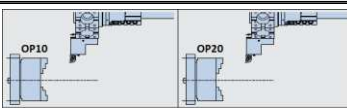





Nos casos dos robôs articulados, manipuladores pórticos e trocadores de placas, tem-se um tempo único para os procedimentos de carga e descarga. Entretanto, especificamente para os robôs articulados e os manipuladores pórticos nas situações com operações 10 e 20 na mesma máquina, todas as parcelas dos tempos de carga e descarga foram desmembradas (incluindo as transferências das peças entre os fusos), para possibilitar a correta interpretação dos dados.

Os tempos de carga e descarga dos robôs articulados referem-se aos tempos em que as máquinas permanecem com as portas abertas, para que sejam realizados estes procedimentos (nos casos com operações 10 e 20 na mesma máquina, são incluídos os tempos de transferências entre os fusos, que ocorrem com máquina em funcionamento e portanto com a porta fechada).

Nos manipuladores pórticos, os tempos de carga e descarga foram obtidos entre as aberturas e fechamentos das chapas deslizantes integradas sobre as portas das máquinas. Nos casos dos centros de torneamento com fusos contrapostos, têm-se chapas deslizantes independentes para cada fuso, possibilitando realizar os procedimentos de carga e descarga separadamente para cada operação.

Nos centros de torneamento com trocadores de placas, os tempos de carga e descarga verificados foram justamente os tempos de giro das placas entre os ciclos de usinagem, tanto para peças com operação única, quanto para peças com operações 10 e 20. No Quadro 4.1 são apresentados os tempos de carga e descarga obtidos durante os procedimentos experimentais (em segundos), realizados nas empresas de usinagem.

Quadro 4.1 – Tempos de carga e descarga obtidos durante os procedimentos experimentais.

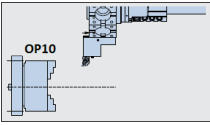
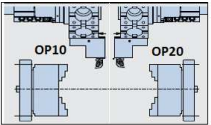
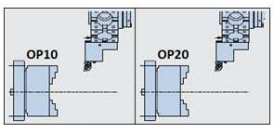
Tempos de carga e descarga (segundos)		Possibilidades de operações													
Tecnologias de carga e descarga	Empresas	 Operação única			Empresas	 Operações 10 e 20 na mesma máquina				Empresas	 Operações 10 e 20 em máquinas distintas				
		Carga	Descarga	Total		Carga	Transferência	Descarga	Total		Carga-1	Descarga-1	Carga-2	Descarga-2	Takt
 Alimentador de barras com aparador de peças	A	7,0	5,0	12,0	A	3,0	8,5	4,5	13,0	-	Não se aplica!				
	B	6,8	4,5	11,3	B	3,0	9,7	5,0	14,7	-					
	C	7,0	5,0	12,0	-	-	-	-	-	-					
	D	5,5	5,0	10,5	-	-	-	-	-	-					
	Média	6,6	4,9	11,5	Média	3,0	9,1	4,8	13,9	Média	-	-	-	-	-
 Magazine mecanizado com aparador de peças	A	3,5	6,0	9,5	A	6,0	9,5	5,0	15,5	A	5,2	4,5	6,1	4,8	10,9
	B	4,3	6,0	10,3	-	-	-	-	-	B	2,6	4,5	2,6	4,5	7,1
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Média	3,9	6,0	9,9	Média	6,0	9,5	5,0	15,5	Média	3,9	4,5	4,3	4,7	9,0
 Robô articulado	A	10,6	10,6	21,2	A	6,0	8,2	6,0	20,2	A	10,7	11,0	11,0	11,0	11,0
	B	11,0	11,0	22,0	-	-	-	-	-	B	10,3	10,8	10,8	10,8	10,8
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	10,2	11,1	11,1	11,1	11,1
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Média	10,8	10,8	21,6	Média	6,0	8,2	6,0	20,2	Média	10,4	11,0	10,7	10,7	10,7
 Manipulador pórtico	A	10,5	10,5	21,0	A	12,2	9,2	9,4	21,4	A	10,6	10,8	10,8	10,8	10,8
	B	8,6	8,6	17,2	B	13,8	10,3	9,0	24,1	B	7,3	8,0	8,0	8,0	8,0
	C	7,5	7,5	15,0	C	9,2	10,2	9,4	19,6	C	10,2	11,1	11,1	11,1	11,1
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D	10,5	10,7	10,7	10,7	10,7
	Média	8,2	8,9	17,1	Média	8,7	9,9	3,1	21,7	Média	9,4	10,0	9,9	9,9	9,9
 Trocador de placas	A	1,8	1,8	3,6	A	1,8	-	2,1	3,9	A	1,8	1,8	3,6	3,6	3,6
	-	-	-	-	B	1,6	-	1,8	3,4	B	1,5	1,5	3,0	3,0	3,0
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Média	1,8	1,8	3,6	Média	1,7	-	2,0	3,7	Média	1,7	1,7	3,3	3,3	3,3

Os tempos de carga dos alimentadores de barras variaram de 3 a 7 segundos, pois estavam relacionados diretamente aos comprimentos das peças carregadas para os próximos ciclos de usinagem. Já os tempos de descarga dos aparadores de peças variaram muito pouco, entre 4,5 a 6 segundos, para os casos combinados com alimentadores de barras e com magazines mecanizados. Em relação aos tempos para as transferências entre os fusos, estes variaram de 8,2 a 10,3 segundos entre os centros de torneamento avaliados (pois não dependem das

tecnologias de carga e descarga consideradas). Os tempos dos magazines mecanizados com as cargas realizadas pela torre porta-ferramentas variaram entre 3,5 e 6,1 segundos, porém, foi verificado em um caso a utilização de um empurrador pneumático com tempo de 2,6 segundos (neste caso, o ponto de carga da calha estava posicionado na direção da placa de fixação, possibilitando a carga da peça somente pelo avanço do empurrador pneumático).

Os tempos de carga e descarga dos robôs articulados variaram de 10,6 a 11,1 segundos para as operações únicas e para operações 10 e 20 em máquinas distintas. No caso com operações 10 e 20 na mesma máquina, o tempo verificado foi 20,2 segundos, devido à inclusão do tempo de transferência da peça entre os fusos. Para os manipuladores pórticos, os tempos de carga e descarga variaram de 7,5 a 11,1 segundos para as operações únicas e para operações 10 e 20 em máquinas distintas. No caso com operações 10 e 20 na mesma máquina, os tempos variaram entre 19,6 e 24,1 segundos, devido à inclusão do tempo de transferência da peça entre os fusos. Os centros de torneamento com trocadores de placa apresentaram tempos entre 1,5 a 2,1 segundos para os giros das placas entre os ciclos de usinagem, portanto no caso com operação única verificou-se 1,8 segundos e nos casos com operações 10 e 20 variação entre 3,0 e 3,9 segundos (pois considera-se um giro de placa para cada operação). No Quadro 4.2 é apresentado o resumo dos tempos de carga e descarga previamente apresentados.

Quadro 4.2 – Resumo dos tempos de carga e descarga avaliados.

Tempos de carga e descarga (segundos)	Possibilidades de operações								
Tecnologias de carga e descarga	 Operação única			 Operações 10 e 20 na mesma máquina			 Operações 10 e 20 em máquinas distintas		
	Fabricantes	Verificados	Considerados	Fabricantes	Verificados	Considerados	Fabricantes	Verificados	Considerados
Alimentador de barras com aparador de peças	11 a 13	10,5 a 12,0	11,5	13 a 15	13,0 a 14,7	13,9	Não se aplica!		
Magazine mecanizado com aparador de peças	-	9,5 a 10,3	9,9	-	15,5	15,5	-	7,1 a 10,9	9,0
Robô articulado vertical	10 a 12	10,6 a 11,0	10,8	18 a 22	20,2	20,2	10 a 12	10,2 a 11,1	10,7
Manipulador pórtico	7 a 11	7,5 a 10,5	8,9	18 a 20	19,6 a 24,1	21,7	7 a 11	7,3 a 11,1	9,9
Trocador de placas	2 a 3	1,8	1,8	4 a 6	3,4 a 3,9	3,7	4 a 6	3,0 a 3,6	3,3

Os tempos de carga e descarga verificados foram comparados com os tempos informados pelos fabricantes. Somente os fabricantes dos magazines mecanizados não informaram os tempos de carga e descarga, pois disseram que variam muito em função do tipo de máquina onde esses sistemas são integrados (dependem de modificações nas carenagens, da fixação da peça pela torre porta-ferramentas e dos tempos passivos de máquina).

Na Figura 4.1 é apresentado um gráfico comparativo para os tempos de carga e descarga das tecnologias analisadas, em cada uma das possibilidades de operações consideradas.

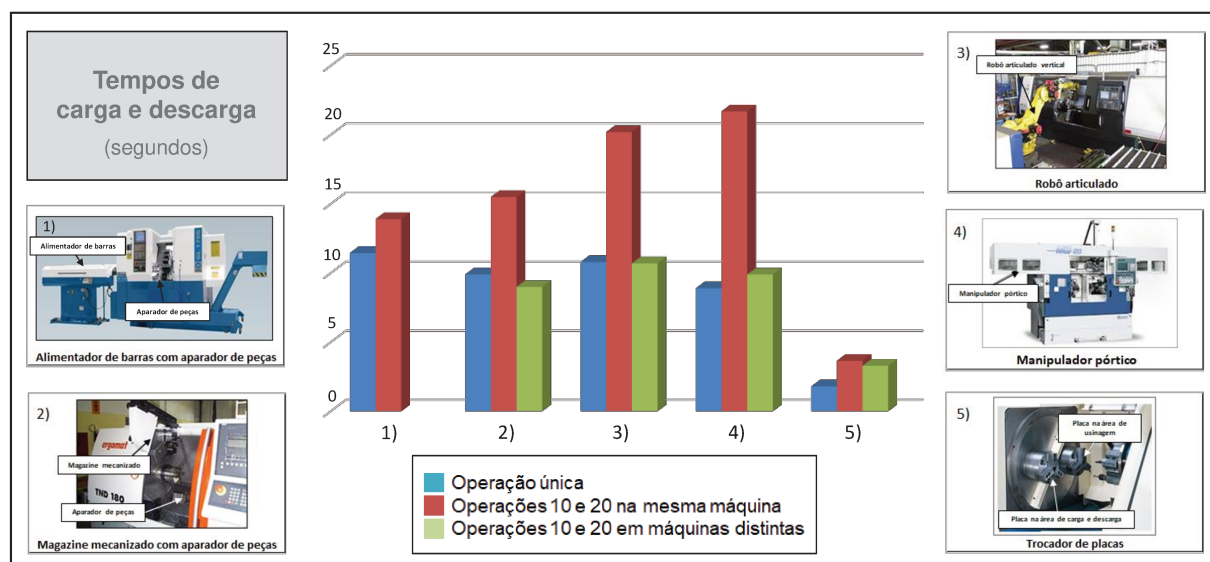


Figura 4.1 – Gráfico comparativo para os tempos de carga e descarga das tecnologias analisadas, em cada uma das possibilidades de operações consideradas.

Os únicos tempos de carga e descarga que foram superiores aos informados pelos fabricantes dizem respeito aos manipuladores pórticos, entretanto com diferenças abaixo de 10% e portanto não significativas. De uma forma geral, os tempos de carga e descarga médios variaram de 1,8 a 21,7 segundos, sendo que os centros de torneamento com trocadores de placas apresentaram os menores tempos (esta diferença significativa é atribuída ao conceito funcional deste equipamento). Desconsiderando os centros de torneamento com trocadores de placas, os tempos entre as demais tecnologias de carga e descarga apresentaram as seguintes variações:

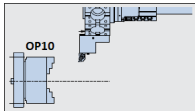
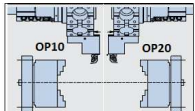
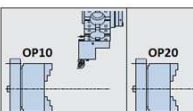

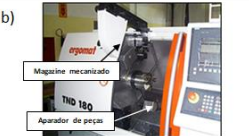



- ❑ Operações únicas - 8,9 a 11,5 segundos (variação de 22,6%);
- ❑ Operações 10 e 20 na mesma máquina - 13,9 a 21,7 segundos (variação de 36%);
- ❑ Operações 10 e 20 em máquinas distintas - 9,0 a 10,7 segundos (~15,9%).

Diante dos resultados analisados, as médias dos tempos de carga e descarga verificadas nos procedimentos experimentais foram consideradas como parâmetros base para as tecnologias de carga e descarga consideradas, compondo desta forma o banco de dados *default* utilizado pelo método seletivo proposto.

Na sequência são apresentadas as eficiências produtivas e as quantidades de máquinas conduzidas por operador verificadas durante os procedimentos experimentais.

Conforme estabelecido no Capítulo 3, as eficiências produtivas foram calculadas indiretamente, em função dos apontamentos das quantidades de peças produzidas pelas tecnologias de manufatura monitoradas. Por outro lado, as quantidades de máquinas conduzidas por operador foram verificadas pontualmente. No Quadro 4.3 são apresentadas as eficiências produtivas (em percentual) e as quantidades de máquinas conduzidas por operador (em unidades), obtidas durante os procedimentos experimentais realizados nas empresas de usinagem.

Quadro 4.3 – Eficiências produtivas e quantidades de máquinas conduzidas por operador obtidas durante os procedimentos experimentais.

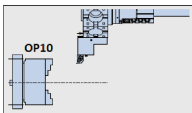
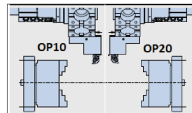
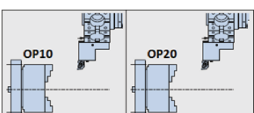
Eficiências produtivas (percentual) e Quantidades de máquinas conduzidas por operador (unidades)	Possibilidades de operações								
	Empresas	 Operação única		Empresas	 Operações 10 e 20 na mesma máquina		Empresas	 Operações 10 e 20 em máquinas distintas	
Eficiência produtiva		Máquinas conduzidas por operador	Eficiência produtiva		Máquinas conduzidas por operador	Eficiência produtiva		Máquinas conduzidas por operador	
Tecnologias de Manufatura									
 Alimentador de barras com aparador de peças	A	74,9%	3,0	A	88,7%	2,0	-	Não se aplica!	
	B	84,6%	2,0	B	78,1%	2,0	-		
	C	88,5%	2,0	-	-	-	-		
	D	79,8%	2,0	-	-	-	-		
	Média	82,0%	2,3	Média	83,4%	2,0	Média	-	-
	 Magazine mecanizado com aparador de peças	A	82,9%	2,0	A	87,6%	2,0	A	86,2%
B		85,3%	2,0	-	-	-	B	78,9%	1,0
-		-	-	-	-	-	-	-	-
-		-	-	-	-	-	-	-	-
Média		84,1%	2,0	Média	87,6%	2,0	Média	82,6%	1,5
 Robô articulado		A	84,8%	2,0	A	87,8%	2,0	A	84,1%
	B	83,3%	2,0	-	-	-	B	85,3%	2,0
	-	-	-	-	-	-	C	82,9%	2,0
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Média	84,1%	2,0	Média	87,8%	2,0	Média	84,1%	2,0
	 Manipulador pórtico	A	86,1%	2,0	A	91,2%	2,0	A	87,6%
B		84,8%	2,0	B	80,9%	2,0	B	89,2%	2,0
C		86,5%	2,0	C	92,7%	2,0	C	86,1%	2,0
-		-	-	-	-	-	D	80,9%	2,0
Média		85,8%	2,0	Média	88,3%	2,0	Média	86,0%	2,0
 Trocador de placas		A	88,1%	2,0	A	86,2%	2,0	A	87,1%
	-	-	-	B	86,5%	2,0	B	85,2%	2,0
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Média	88,1%	2,0	Média	86,4%	2,0	Média	86,2%	2,0

As eficiências produtivas dos alimentadores de barras combinados com os aparadores de peças variaram de 74,9 a 88,7% (variação de 15,5%), sendo observado que os operadores conduziam duas máquinas nas empresas analisadas. Em somente um caso foi verificado um operador conduzindo três máquinas, justamente onde foi constatado a menor eficiência produtiva verificada (74,9%). Para os magazines mecanizados, as eficiências variaram de 78,9 a 87,6% (variação de 9,9%) e, de forma geral, foram observados que cada operador conduzia duas máquinas. Em apenas um caso tinha um operador conduzindo uma única máquina (onde notou-se 78,9% como a menor eficiência), que de fato era necessário devido ao baixo tempo de ciclo da peça que estava em usinagem (mesmo caso com o empurrador pneumático anteriormente mencionado para a carga da peça).

Os robôs articulados avaliados estavam integrados em células de usinagem e apresentaram eficiências de 82,9 a 87,8% (variação de 5,6%). Em todos os casos havia um operador conduzindo cada célula de usinagem, portanto notou-se um operador para a condução de duas máquinas. Os manipuladores pórticos apresentaram eficiências de 80,9 a 92,7% (variação de 12,7%). Para operações 10 e 20 em máquinas distintas, foram avaliados manipuladores pórticos integrados em centros de torneamento duplo frontais (com eficiências superiores, entre 86,1 a 89,2%, nas empresas A, B e C) e em centros de torneamento independentes (resultando em eficiência inferior, de 80,9% na empresa D). Em todos os casos com manipuladores pórticos, um operador estava conduzindo dois fusos operativos (considerado assim, um operador para duas máquinas). Nos centros de torneamento com trocadores de placas foram verificadas eficiências produtivas de 85,2 a 88,1% (variação de 3,3%), sendo observado para os casos avaliados um operador conduzindo duas máquinas.

De uma forma geral, os dados verificados durante os procedimentos experimentais estão alinhados com as informações disponibilizadas pelos fabricantes. Pelos mesmos motivos informados para os tempos de carga e descarga, os fabricantes dos magazines mecanizados não informaram as eficiências produtivas e as quantidades de máquinas conduzidas por operador. Exceto o único caso com um operador conduzindo três máquinas (com eficiência de 74,9%), a menor eficiência encontrada foi 78,1% para o alimentador de barras combinado com aparador de peças (em operações 10 e 20 na mesma máquina). A maior eficiência encontrada foi 92,7% para o manipulador pórtico, em operações 10 e 20 na mesma máquina. No Quadro 4.4 é apresentado o resumo das eficiências produtivas apresentadas e na Figura 4.2 é demonstrado um gráfico comparativo destas eficiências para cada uma das possibilidades de operações.

Quadro 4.4 – Resumo dos eficiências produtivas avaliadas.

Eficiências produtivas (percentual)	Possibilidades de operações								
	 Operação única			 Operações 10 e 20 na mesma máquina			 Operações 10 e 20 em máquinas distintas		
	Fabricantes	Verificados	Considerados	Fabricantes	Verificados	Considerados	Fabricantes	Verificados	Considerados
Alimentador de barras com aparador de peças	85% a 88%	74,9% a 88,5%	82,0%	85% a 88%	78,1% a 88,7%	83,4%	Não se aplica!		
Magazine mecanizado com aparador de peças	-	82,9% a 85,3%	84,1%	-	87,6%	87,6%	-	78,9% a 86,2%	82,6%
Robô articulado vertical	85% a 90%	83,3% a 84,8%	84,1%	85% a 90%	87,8%	87,8%	85% a 90%	82,9% a 85,3%	84,1%
Manipulador pórtico	85% a 88%	84,8% a 86,5%	85,8%	85% a 88%	80,9% a 92,7%	88,3%	85% a 88%	80,9% a 89,2%	86,0%
Trocador de placas	85% a 88%	88,1%	88,1%	85% a 88%	86,2% a 86,5%	86,4%	85% a 88%	85,2% a 87,1%	86,2%

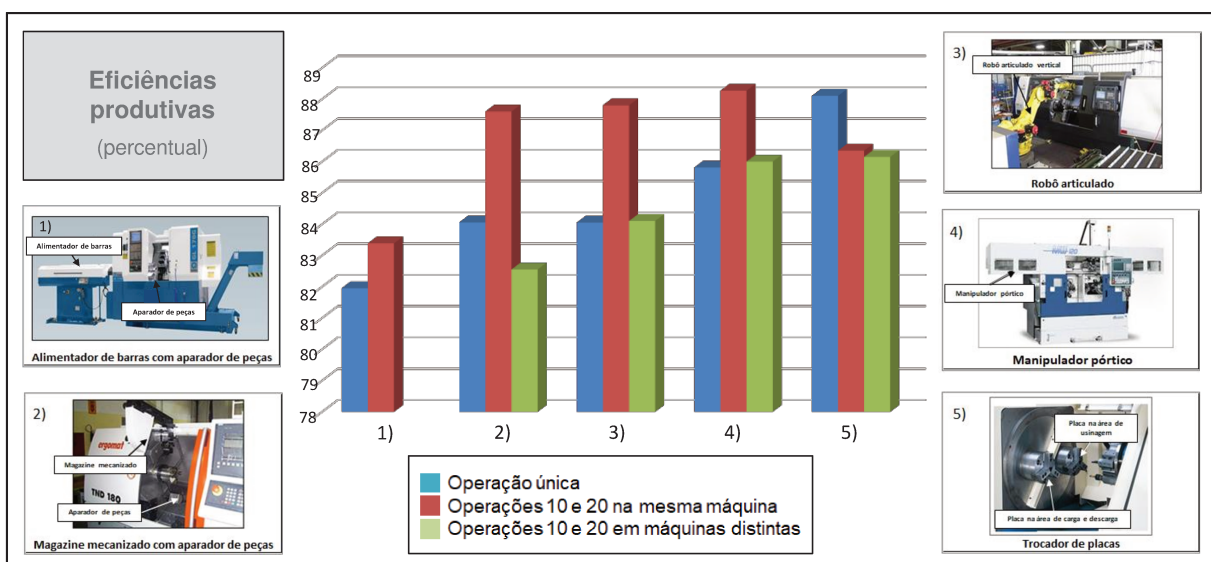


Figura 4.2 – Gráfico comparativo para as eficiências produtivas das tecnologias analisadas, em cada uma das possibilidades de operações consideradas.

Entre as tecnologias de manufatura analisadas, as menores eficiências foram atribuídas aos alimentadores de barras combinados com aparadores de peças (média geral de 82,4%), e as maiores aos centros de torneamento com trocadores de placas e integrados aos manipuladores pórticos (ambos com média geral de 86,6%). Assim como considerado para os tempos de carga e descarga, as médias das eficiências produtivas verificadas foram consideradas como parâmetros base para as tecnologias de carga e descarga consideradas, compondo desta forma o banco de dados *default* utilizado pelo método seletivo proposto.

De uma forma geral, os principais motivos para as paradas das tecnologias de manufatura durante os procedimentos experimentais foram:

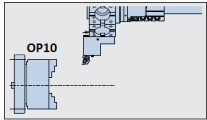
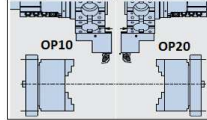
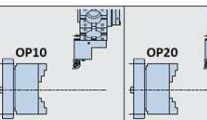
- ☐ Virar ou substituir os insertos de corte;
- ☐ *Set ups* (alteração para outro produto, normalmente similar);

- ☐ Paradas para limpeza de cavacos e para manutenção corretiva;
- ☐ Alarmes de máquinas (muitas vezes associados às leituras dos sinais dos sensores utilizados nas tecnologias de carga e descarga);
- ☐ Demora para colocar a máquina em funcionamento após as paradas mencionadas acima (falta de treinamento adequado para os operadores);
- ☐ Peças refugadas, principalmente quando os tempos de ciclo são baixos, quando as peças possuem tolerâncias críticas ou quando um operador conduz mais de duas máquinas;
- ☐ Falta de peças brutas.

Estes fatores refletem as eficiências globais dos processos de torneamento investigados, pois a maior parte deles são inerentes a todos os processos de manufatura. Contudo, notou-se que os tempos para as realizações destas ações demandam tempos superiores quando comparados aos torneamentos em máquinas sem tecnologias de carga e descarga, visto que os periféricos integrados dificultam o acesso e a ergonomia do operador, além de exigirem melhor qualificação técnica para a operação destas tecnologias de manufatura automatizadas.

Para as quantidades de máquinas conduzidas por um operador, em praticamente todos os casos, foi observado um operador conduzindo duas máquinas (exceto dois casos, um com um operador para uma máquina e outro com um operador para três máquinas, ambos comentados anteriormente). No Quadro 4.5 é apresentado o resumo dos dados referentes às quantidades de máquinas conduzidas por operador, para cada uma das possibilidades de operações consideradas.

Quadro 4.5 – Resumo das quantidades de máquinas conduzidas por operador avaliadas.

Máquinas conduzidas por operador (unidades)	Possibilidades de operações								
Tecnologias de Manufatura	 Operação única			 Operações 10 e 20 na mesma máquina			 Operações 10 e 20 em máquinas distintas		
	Fabricantes	Verificados	Considerados	Fabricantes	Verificados	Considerados	Fabricantes	Verificados	Considerados
Alimentador de barras com aparador de peças	1 a 3	2 a 3	2	1 a 3	2	2	Não se aplica!		
Magazine mecanizado com aparador de peças	-	2	2	-	2	2	-	1 a 2	2
Robô articulado vertical	1 a 3	2	2	1 a 3	2	2	1 a 3	2	2
Manipulador pórtico	1 a 4	2	2	1 a 4	2	2	1 a 4	2	2
Trocador de placas	1 a 4	2	2	1 a 4	2	2	1 a 4	2	2

Com a análise das quantidades de máquinas conduzidas por operador apresentada, o método seletivo irá considerar um operador para duas máquinas, para todas as tecnologias de manufatura, em todas as possibilidades de operações.

As quantidades máximas de máquinas conduzidas por operador informadas pelos fabricantes não foram observadas durante os procedimentos experimentais. Questionados sobre estas observações, os fabricantes informaram que pode-se aumentar o grau de automação das tecnologias de carga e descarga para obtenção dos dados informados. Além disso, informaram que a quantidade de máquinas conduzidas por um operador depende muito do tempo de ciclo de usinagem da peça (em condição manual, para peças com tempos de ciclo totais abaixo de 20 segundos, normalmente faz-se necessário um operador por máquina, para atender os tempos necessários para os procedimentos de carga e descarga). Para peças complexas e que precisam de diversas inspeções de controle, os fabricantes também recomendam um operador por máquina. Pode-se aumentar o grau de automação das tecnologias de manufatura para diminuir a necessidade operacional (existem células de usinagem que um operador controla até quatro máquinas), incluindo estações de carga e descarga para aumentar autonomia funcional das máquinas e sistemas de medição integrados ao processo em usinagem (que mede as características de controle e realiza automaticamente as correções necessárias).

Os tempos de carga e descarga, as eficiências produtivas e a quantidade de máquinas conduzidas por operador considerados foram utilizados no método seletivo proposto como base *default* (banco de dados), podendo ser alterados manualmente no *software* definitivo, caso seja conveniente para melhorar a acuracidade da simulação em análise. A seguir são apresentados os custos das tecnologias de manufatura.

4.2 Custos das tecnologias de manufatura avaliadas

Os custos das tecnologias de manufatura são compostos pelos custos das tecnologias de torneamento somados com os custos das tecnologias de carga e descarga, ou seja, são considerados os valores para aquisições das máquinas-ferramenta com as tecnologias de carga e descarga já integradas (não estão sendo considerados custos complementares com manutenção, espaço ocupado, energia elétrica, depreciação do equipamento e nem mesmo juros sobre operações financeiras).

Para as obtenções dos valores das tecnologias de manufatura avaliadas, foram pesquisados fabricantes tradicionais da Alemanha, Japão (principalmente), Coreia do Sul e do Brasil, por meio de propostas técnicas e comerciais. Por tratar-se de informações obtidas com fabricantes concorrentes de máquinas-ferramenta, os dados apresentados não foram atribuídos diretamente a nenhum deles, mantendo estas informações em caráter confidencial (pois tratam-se de dados estratégicos pertencentes a estas empresas).

Primeiramente, são apresentados os valores pesquisados para as tecnologias de torneamento, que possuem as capacidades previamente estabelecidas no Capítulo 3. Os centros de torneamento foram configurados com equipamentos e recursos básicos para produção seriada, conforme segue:

- ☐ Torre porta-ferramentas com suportes estáticos;
- ☐ Sistema de refrigeração com 20 bar e sistema de arrefecimento, para furações com brocas de alto desempenho (normalmente com pastilhas intercambiáveis) e para minimizar as influências térmicas no processo de torneamento;
- ☐ Placa Ø 200 mm, com 3 castanhas auto-centrantes (que no caso de trabalho com barras, o valor diverge pouco em relação a um aparelho de pinças com capacidade de barras Ø 51 mm);
- ☐ Sistemas automáticos de limpeza da placa, da torre porta-ferramentas e das proteções internas;
- ☐ Sensores para confirmação do assentamento da peça (*air check*);
- ☐ Transportador de cavacos, para remoção contínua para fora da máquina;
- ☐ Interfaces para a automação (no caso, para as tecnologias de carga e descarga);
- ☐ Lâmpada indicadora de *status* para supervisão visual;
- ☐ Pistolas de limpeza (*wash gun*), para o modo manual de preparação;
- ☐ Opcionais de *software*: monitoramento da vida da ferramenta, desligamento automático dos opcionais não utilizados e ciclos diversos.

Desta forma, os centros de torneamento considerados tiveram a mesma configuração básica e portanto todos os valores apresentados possuem a mesma base comparativa. Os valores totais dos centros de torneamento avaliados foram compostos pelas máquinas com as configurações básicas somadas aos equipamentos e recursos opcionais previamente definidos.

Foram utilizadas vinte e três propostas de onze fabricantes de centros de torneamento, totalizando nove máquinas para cada possibilidade de operação. Os valores foram apresentados em moeda brasileira (Reais), sendo que, no caso das máquinas importadas, foram considerados adicionalmente os custos de nacionalização para manutenção da mesma base comparativa.

Os fabricantes se responsabilizam em fornecer as máquinas embaladas e colocadas dentro dos navios (condição FOB - *Free on Bord*). A partir disso, a responsabilidade passa a ser do importador, com a incidência dos custos de nacionalização. O custo de nacionalização é composto basicamente pelo trânsito marítimo assegurado, despesas alfandegárias diversas, desembaraço aduaneiro, impostos e pelo frete terrestre assegurado para a planta do importador no Brasil. No caso dos centros de torneamento considerados (com pesos e dimensões definidas para os transportes marítimo e terrestre), o custo de nacionalização total varia entre 40 e 50% sobre o valor total da máquina, já convertido em Reais.

Os impostos representam a maior parte do custo de nacionalização (PIS 2,1%, COFINS 10,65%, ICMS 8,8% e o imposto de importação 14%), mas para máquinas-ferramenta sem similaridade nacional e com Ex-Tarifário publicados, a CAMEX (Câmara do Comércio Exterior, órgão integrante do Conselho da Presidência da República) zerou o imposto de importação. O regime de Ex-Tarifário consiste na redução temporária da alíquota do imposto de importação de bens de capital, de informática e telecomunicação, assim grafados na tarifa externa comum do Mercosul, quando não houver a produção nacional equivalente, ou seja, representa uma redução no custo do investimento/importação (SVSLOG, 2018). Empresas que se enquadram como Lucro Real podem recuperar os impostos PIS, COFINS e ICMS ao longo dos anos. Contudo, os créditos destes impostos não estão sendo considerados nos cálculos de nacionalização realizados. Assim sendo, foram adotados como índices de custo de nacionalização *default* para os centros de torneamento importados:

- ❑ 45% para as máquinas com similaridade nacional (média dos custos praticados);
- ❑ 31% para máquinas passíveis de Ex-Tarifário (dedução dos 14% do imposto de importação).

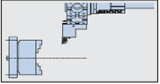









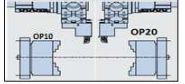









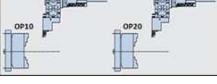









Para a conversão dos valores FOB das máquinas importadas, foi considerado o câmbio de 26/06/2018 para os cálculos dos valores das máquinas nacionalizadas, dados por:

Valor da máquina nacionalizada (R\$)

$$= \text{Valor da máquina FOB (convertido: R\$)} \times \text{Índice de nacionalização (4.1)}$$

Caso necessário, tanto os índices de nacionalização quanto os dados de câmbio podem ser alterados pelo usuário no método seletivo proposto. No Quadro 4.6 são apresentados os valores pesquisados para os centros de torneamento.

Quadro 4.6 – Valores pesquisados para os centros de torneamento.

Operação única 					
Centros de torneamento		R\$ 374.901	R\$ 369.652	R\$ 597.967	R\$ 471.979
Equipamentos e recursos opcionais		R\$ 132.100	R\$ 131.500	R\$ 138.250	R\$ 118.980
Valor total dos centros de torneamento		R\$ 507.001	R\$ 501.152	R\$ 736.217	R\$ 590.959
					
R\$ 320.000		R\$ 300.000	R\$ 340.000	R\$ 331.600	R\$ 690.776
R\$ 134.720		R\$ 128.730	R\$ 137.990	R\$ 133.400	R\$ 91.880
R\$ 454.720		R\$ 428.730	R\$ 477.990	R\$ 465.000	R\$ 782.656
Operações 10 e 20 na mesma máquina 					
Centros de torneamento		R\$ 1.497.424	R\$ 1.564.274	R\$ 1.817.145	R\$ 1.780.935
Equipamentos e recursos opcionais		R\$ 71.880	R\$ 83.220	R\$ 92.550	R\$ 87.820
Valor total dos centros de torneamento		R\$ 1.569.304	R\$ 1.647.494	R\$ 1.909.695	R\$ 1.868.755
					
R\$ 1.591.013		R\$ 1.258.612	R\$ 884.017	R\$ 951.311	R\$ 690.776
R\$ 72.220		R\$ 77.340	R\$ 88.550	R\$ 133.400	R\$ 91.880
R\$ 1.663.233		R\$ 1.335.952	R\$ 972.567	R\$ 1.084.711	R\$ 782.656
Operações 10 e 20 em máquinas distintas 					
Centros de torneamento		R\$ 1.195.878	R\$ 1.188.511	R\$ 1.195.934	R\$ 1.182.574
Equipamentos e recursos opcionais		R\$ 199.890	R\$ 236.550	R\$ 276.500	R\$ 237.960
Valor total dos centros de torneamento		R\$ 1.395.768	R\$ 1.425.061	R\$ 1.472.434	R\$ 1.420.534
					
R\$ 1.145.351		R\$ 600.000	R\$ 680.000	R\$ 987.152	R\$ 1.145.351
R\$ 208.300		R\$ 257.460	R\$ 275.980	R\$ 178.890	R\$ 273.440
R\$ 1.353.651		R\$ 857.460	R\$ 955.980	R\$ 1.166.042	R\$ 1.418.791

Os valores foram apresentados separadamente para cada uma das possibilidades de operações. Para operações únicas, foram consideradas oito propostas de centros de torneamento convencionais (com um fuso e uma torre porta-ferramentas) e uma proposta de um centro de torneamento com trocador de placas. Na Figura 4.3 é apresentado o resumo dos valores pesquisados para os centros de torneamento na condição de operação única.



Figura 4.3 – Resumo dos valores dos centros de torneamento para operação única.

No caso de operações 10 e 20 na mesma máquina, foram consideradas oito propostas de centros de torneamento com fusos contrapostos e duas torres porta-ferramentas, sendo mantida a mesma proposta para o centro de torneamento com trocador de placas mencionado. Os centros de torneamento com trocadores de placas podem ser utilizados tanto para operação única quanto para operações 10 e 20 (na mesma máquina ou em máquinas distintas), porém não possibilitam a transferência da peça entre os fusos e portanto não atendem peças com tolerâncias de posição entre as operações. Na Figura 4.4 é apresentado o resumo dos valores pesquisados para os centros de torneamento na condição de operações 10 e 20 na mesma máquina.



Figura 4.4 – Resumo dos valores dos centros de torneamento para operações 10 e 20 na mesma máquina.

Para operações 10 e 20 em máquinas distintas, foram consideradas três propostas de centros de torneamento convencionais que haviam sido consideradas para operações únicas (considerando duas máquinas de cada fabricante) e seis propostas de centros de torneamento duplo frontais, que equivalem a dois centros de torneamento convencionais (porém utilizando uma única base para dois fusos e duas torres porta-ferramentas independentes). Na Figura 4.5 é apresentado o resumo dos valores pesquisados para os centros de torneamento na condição de operações 10 e 20 em máquinas distintas.

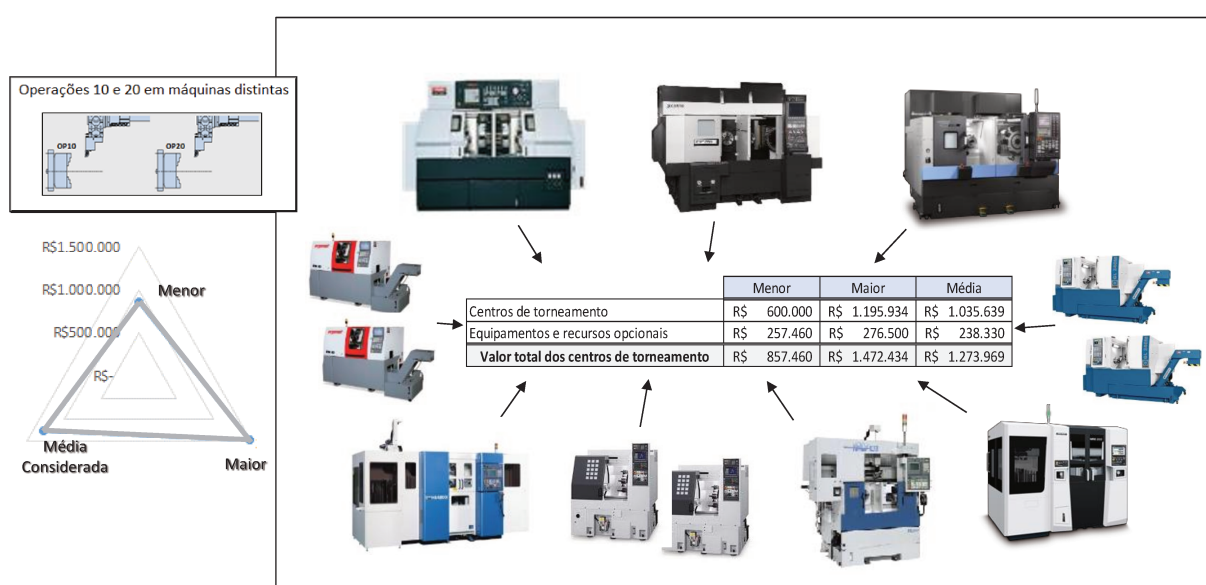


Figura 4.5 – Resumo dos valores dos centros de torneamento para operações 10 e 20 em máquinas distintas.

Os valores pesquisados para os centros de torneamento apresentaram variações consideráveis, principalmente em relação às máquinas básicas (os equipamentos e recursos opcionais apresentaram variações inferiores). Para operação única, a diferença entre os centros de torneamento com menor e maior valores foi 45,2%. Somente um dos centros de torneamento importados era passível de Ex-tarifário (o que possui trocador de placas), os demais possuem similaridade nacional, e dessa maneira, com 45% de custo de nacionalização sobre o valor da máquina FOB. O centro de torneamento mais caro apresentou um valor muito superior aos demais, sendo atribuída esta diferença à política de valores praticada pelo fabricante. Todos os valores apresentados referem-se aos valores iniciais praticados pelos fabricantes (valores de lista), não sendo portanto os valores finais negociados com as empresas de usinagem.

Para operações 10 e 20 na mesma máquina, a diferença entre os centros de torneamento com menor e maior valores foi 59,1%. Em relação ao centro de torneamento mais caro verificado, trata-se do mesmo fabricante que apresentou o maior valor para operação única.

Todos os centros de torneamento com fusos contrapostos possuem similaridade nacional (que possibilitam a transferência da peça entre os fusos), sendo assim, foi considerado 45% de custo de nacionalização para as máquinas importadas avaliadas.

Para operações 10 e 20 em máquinas distintas, a diferença entre os centros de torneamento com menor e maior valores foi 41,7% (menor diferença encontrada entre as possibilidades de operação). O menor e o maior dos valores pesquisados referem-se a utilização de dois centros de torneamento convencionais.

Para operações 10 e 20 em máquinas distintas, foram consideradas máquinas com e sem similaridade nacional (sendo ou não passíveis de Ex-tarifário), portanto, com diferentes custos de nacionalização. Os centros de torneamento duplo frontais apresentaram valores finais superiores comparados aos centros de torneamento convencionais (na média em torno de 18% superiores), mesmo considerando Ex-tarifário para estas máquinas. Entretanto, são máquinas que cada vez mais estão sendo utilizadas por empresas de usinagem de peças seriadas e por este motivo foram consideradas pelo método seletivo proposto.

Em função das variações de valores consideráveis verificadas para os centros de torneamento nas possibilidades de operação analisadas, foram consideradas no método seletivo as médias dos valores totais pesquisados como dados *default* (banco de dados). Estes valores podem ser alterados pelo usuário no *software* definitivo, caso seja conveniente para melhorar a acuracidade da simulação em análise. Na Figura 4.6 é apresentado um gráfico que resume de forma comparativa os valores menores, maiores e médios pesquisados para os centros de torneamento analisados, nas possibilidades de operações consideradas.

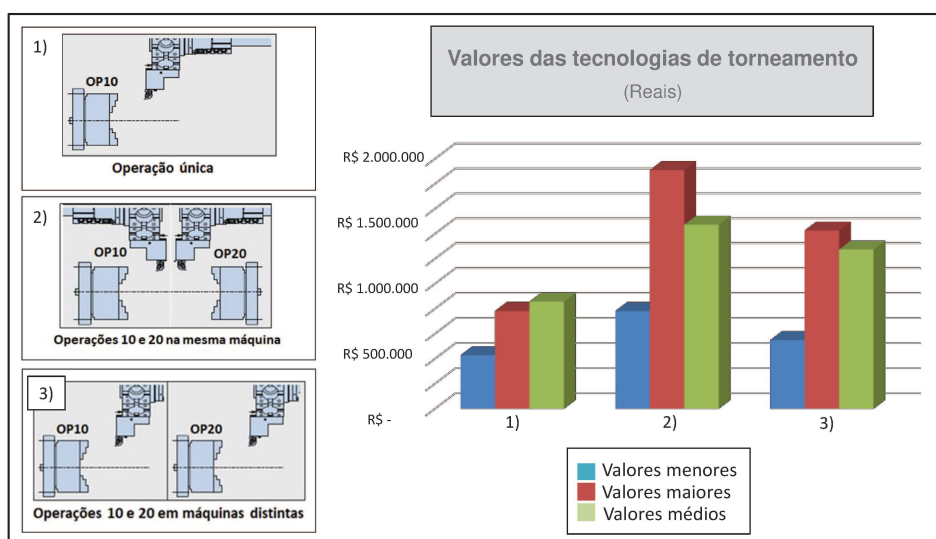
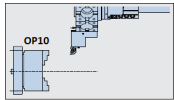
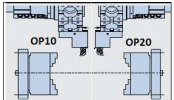
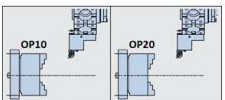








Figura 4.6 – Gráfico comparativo com os valores menores, maiores e médios verificados para os centros de torneamento, nas possibilidades de operações consideradas.

Em relação aos valores médios analisados entre as possibilidades de operações, verificou-se o maior valor para operações 10 e 20 na mesma máquina, sendo aproximadamente 10,6% superior ao valor verificado para operações 10 e 20 em máquinas distintas. As maiores diferenças de valores encontradas referem-se aos centros de torneamento com fusos contrapostos, para operações 10 e 20 na mesma máquina. Quanto a operação única e operações 10 e 20 em máquinas distintas, os valores médios analisados são próximos aos maiores valores verificados para estas condições. Todos os valores apresentados são orientativos e dependem da condição cambial. O *software* definitivo do método seletivo utilizará como base os valores nas moedas de cada fabricante, para atualizar os resultados automaticamente, de acordo com a data da consulta de câmbio. Com estas informações foi possível estabelecer a base de valores para as tecnologias de torneamento.

Em seguida, são apresentados os valores pesquisados para as tecnologias de carga e descarga. No Quadro 4.7 são apresentados os valores pesquisados para as tecnologias de carga e descarga, para as diferentes possibilidades de operações consideradas.

Quadro 4.7 – Valores pesquisados para as tecnologias de carga e descarga, para as diferentes possibilidades de operações consideradas.

Tecnologias de carga e descarga	Valores das tecnologias para as possibilidades de operações					
	 Operação única	 Operações 10 e 20 na mesma máquina	 Operações 10 e 20 em máquinas distintas			
	Fornecedor A	R\$ 105.700	Fornecedor A	R\$ 105.700	Não se aplica!	
	Fornecedor B	R\$ 194.170	Fornecedor B	R\$ 194.170		
	Fornecedor C	R\$ 138.880	Fornecedor C	R\$ 138.880		
	Valor considerado	R\$ 146.250	Valor considerado	R\$ 146.250	-	
	Fornecedor A	R\$ 71.500	Fornecedor A	R\$ 71.500	Fornecedor A	R\$ 143.000
	Fornecedor B	R\$ 46.845	Fornecedor B	R\$ 46.845	Fornecedor B	R\$ 93.690
	Fornecedor C	R\$ 68.940	Fornecedor C	R\$ 68.940	Fornecedor C	R\$ 137.880
	Valor considerado	R\$ 62.428	Valor considerado	R\$ 62.428	Valor considerado	R\$ 124.857
	Fornecedor A	R\$ 15.500	Fornecedor A	R\$ 15.500	Fornecedor A	R\$ 31.000
	Fornecedor B	R\$ 24.660	Fornecedor B	R\$ 24.660	Fornecedor B	R\$ 49.320
	Fornecedor C	R\$ 24.157	Fornecedor C	R\$ 24.157	Fornecedor C	R\$ 48.314
	Valor considerado	R\$ 21.439	Valor considerado	R\$ 21.439	Valor considerado	R\$ 42.878
	Fornecedor A	R\$ 401.250	Fornecedor A	R\$ 401.250	Fornecedor A	R\$ 557.738
	Fornecedor B	R\$ 414.830	Fornecedor B	R\$ 414.830	Fornecedor B	R\$ 568.317
	Fornecedor C	R\$ 339.760	Fornecedor C	R\$ 339.760	Fornecedor C	R\$ 441.688
	Valor considerado	R\$ 385.280	Valor considerado	R\$ 385.280	Valor considerado	R\$ 522.581
	Fornecedor A	R\$ 285.250	Fornecedor A	R\$ 414.504	Fornecedor A	R\$ 316.449
	Fornecedor B	R\$ 392.200	Fornecedor B	R\$ 380.412	Fornecedor B	R\$ 446.951
	Fornecedor C	R\$ 346.935	Fornecedor C	R\$ 378.999	Fornecedor C	R\$ 389.049
	Valor considerado	R\$ 341.462	Valor considerado	R\$ 391.305	Valor considerado	R\$ 384.150
	Não se aplica!		Não se aplica!		Não se aplica!	
Trocadores de placas	-		-		-	


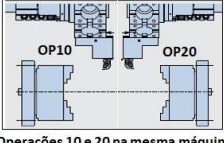

Foram consideradas diferentes quantidades de propostas técnicas, pois em alguns casos foi possível utilizar os valores das tecnologias mais de uma vez, para as diferentes possibilidades de operações analisadas. Foram consideradas propostas técnicas somente de fabricantes confiáveis (que garantem suas tecnologias trabalhando em regimes de produção seriada), totalizando vinte e quatro propostas de diferentes fabricantes.

Para os alimentadores de barras foram consideradas três propostas, que são comuns tanto para operação única quanto para operações 10 e 20 na mesma máquina, pois não divergem em termos de aplicação (o mesmo ocorre para os magazines mecanizados e para os aparadores de peças). Os valores variaram de R\$ 105.700,00 a R\$ 194.170,00 (variação de 45,6%), com valor médio de R\$ 146.250,00 para ambas possibilidades de operações. Para os magazines mecanizados, foram consideradas três propostas e os valores variaram de R\$ 46.845,00 a R\$ 71.500,00 (variação de 34,5%), com valor médio de R\$ 62.428,00 para ambas possibilidades de operações. No caso de operações 10 e 20 em máquinas distintas, os valores pesquisados foram considerados em dobro, por tratar-se de uma mecanização independente para cada centro de torneamento. Para os aparadores de peças, que são utilizados em conjunto com os alimentadores de barras e com os magazines mecanizados, foram consideradas três propostas e os valores variaram de R\$ 15.500,00 a R\$ 24.660,00 (variação de 37,1%), com valor médio de R\$ 21.439,00 para ambas possibilidades de operações. Da mesma forma para operações 10 e 20 em máquinas distintas, os valores pesquisados foram considerados em dobro, por tratar-se de um aparador de peças para cada centro de torneamento.

As propostas dos robôs articulados verticais referem-se ao fornecimento de células automatizadas, conforme apresentado na revisão da literatura. Foram consideradas três propostas que são comuns para operação única e operações 10 e 20 na mesma máquina, pois tem-se uma célula automatizada para somente um centro de torneamento. Os valores variaram de R\$ 339.760,00 a R\$ 414.830,00 (variação de 18,1%), com valor médio de R\$ 385.280,00. Nos casos de operações 10 e 20 em máquinas distintas, foram consideradas outras três propostas distintas, pois faz-se necessário um robô com alcance maior e aumentam-se os valores das integrações e dos periféricos, por tratar-se de dois centros de torneamento. Os valores variaram de R\$ 441.688,00 a R\$ 568.317,00 (variação de 22,3%), com valor médio de R\$ 522.581,00. No caso dos centros de torneamento com trocadores de placas, a tecnologia de carga e descarga faz parte do conceito construtivo e funcional do equipamento. Sendo assim, para essas máquinas não aplicam-se valores complementares para as suas tecnologias de carga e descarga.

Para os manipuladores pórticos, foram consideradas nove propostas diferentes, sendo três propostas para cada possibilidade de operação avaliada. No Quadro 4.8 são apresentados os resumos dos valores verificados para os manipuladores pórticos.

Quadro 4.8 – Resumo dos valores verificados para os manipuladores pórticos.

Manipuladores pórticos	Possibilidades de operações											
	 Operação única				 Operações 10 e 20 na mesma máquina				 Operações 10 e 20 em máquinas distintas			
Valores pesquisados (Reais)	Menor	Maior	Variação	Média	Menor	Maior	Variação	Média	Menor	Maior	Variação	Média
	R\$ 285.250	R\$ 392.200	27,3%	R\$ 341.462	R\$ 380.412	R\$ 414.504	8,2%	R\$ 391.305	R\$ 316.449	R\$ 446.951	29,2%	R\$ 384.150

Nas propostas analisadas, os manipuladores pórticos foram configurados com magazines de peças para proporcionar autonomia de trabalho (onde é realizado o procedimento de carga e descarga das peças) e com os manipuladores propriamente ditos. Os valores das propostas verificadas variam em função do tipo de aplicação, principalmente devido ao porte das peças (peso e dimensões). As principais diferenças encontradas estão associadas aos paletes para orientação das peças nos magazines e aos sistemas de garras dos manipuladores, que são dimensionados de acordo com as geometrias e as tolerâncias das peças. Apesar das variações de valores consideráveis verificados nas propostas dos fabricantes (27,3% para operação única e 29,2% para operações 10 e 20 em máquinas distintas), a variação total entre os valores médios das possibilidades de operações foi 12,7%, sendo portanto, a menor variação encontrada entre as tecnologias de carga e descarga analisadas. Pode-se concluir desta forma que os valores verificados para os manipuladores pórticos são muito próximos, independente de serem integrados em um ou dois centros de torneamento. Ainda assim, os manipuladores pórticos requerem maiores cuidados referentes às peças a serem manipuladas, devido à limitação de espaço para acesso do manipulador na área de usinagem e a possíveis interferências do sistema de garra durante os procedimentos de carga e descarga.

Comparando os valores das tecnologias de carga e descarga avaliadas, os menores valores verificados foram para os aparadores de peças e em seguida para os magazines mecanizados. Somando os valores médios de ambos (que são utilizados em conjunto), tem-se o menor valor analisado entre as tecnologias de carga e descarga. Os alimentadores de barras combinados com aparadores de peças representam valores superiores aos magazines mecanizados combinados com aparadores de peças, porém, inferiores aos das células

automatizadas com robôs articulados e aos dos manipuladores pórticos. De uma forma geral, os valores analisados para as células automatizadas com robôs articulados e para os manipuladores pórticos são próximos, contudo para operações 10 e 20 em máquinas distintas, as células automatizadas com os robôs articulados apresentaram valores superiores nesta possibilidade de operação. Na Figura 4.7 é apresentado um gráfico comparativo com os valores médios verificados para as tecnologias de carga e descarga analisadas e que foram considerados no método seletivo proposto.

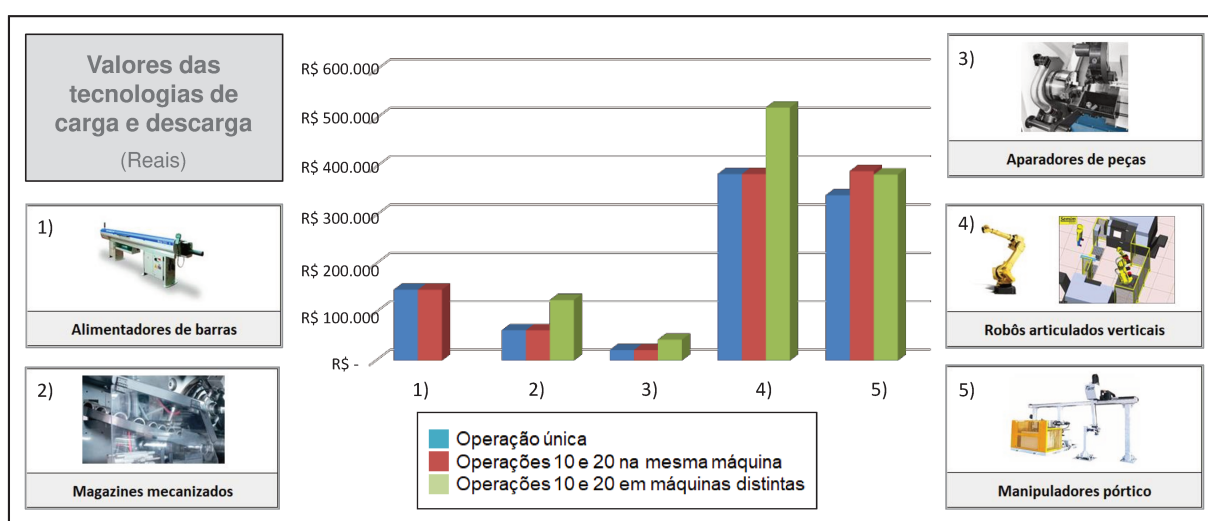
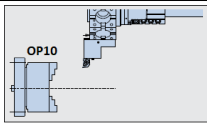
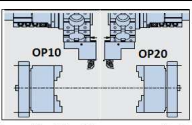
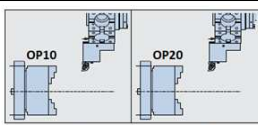
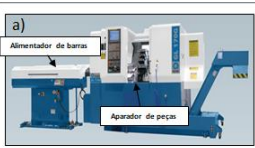






Figura 4.7 – Gráfico comparativo com os valores médios verificados para as tecnologias de carga e descarga analisadas e que foram considerados no método seletivo proposto.

Foram pesquisadas somente propostas de tecnologias de carga e descarga importadas, portanto com incidências dos custos de nacionalização, considerando o câmbio de 26/06/2018 nos cálculos dos valores apresentados. Desta forma, têm-se os valores das tecnologias de carga, que foram utilizados como parâmetros base no método seletivo proposto.

Correlacionando os valores médios totais analisados para os centros de torneamento e para as tecnologias de carga e descarga, têm-se os custos das tecnologias de manufatura, que foram considerados pelo método seletivo. Da mesma forma considerada para os tempos de carga e descarga, para as eficiências produtivas e para a quantidade de máquinas conduzidas por operador, os valores das tecnologias de manufatura analisados foram utilizados como base *default* no método seletivo, podendo ser alterados manualmente no *software* definitivo, caso seja conveniente para melhorar a acuracidade da simulação em análise. No Quadro 4.9 são apresentados os resumos dos valores das tecnologias de manufatura nas possibilidades de operações analisadas, considerados como dados *default* pelo método seletivo proposto.

Quadro 4.9 – Resumo dos valores finais para as tecnologias de manufatura, considerados como dados *default* no método seletivo proposto.

Valores das tecnologias de manufatura (Reais)	Possibilidades de operações					
	 Operação única		 Operações 10 e 20 na mesma máquina		 Operações 10 e 20 em máquinas distintas	
 Alimentador de barras com aparador de peças	Tecnologia torneamento	Tecnologias carga e descarga	Tecnologia torneamento	Tecnologias carga e descarga	Não se aplica!	
	R\$ 549.381	R\$ 167.689	R\$ 1.426.041	R\$ 167.689		
	Tecnologia Manufatura	R\$ 717.070	Tecnologia de Manufatura	R\$ 1.593.730		
 Magazine mecanizado com aparador de peças	Tecnologia torneamento	Tecnologias carga e descarga	Tecnologia torneamento	Tecnologias carga e descarga	Tecnologia torneamento	Tecnologias carga e descarga
	R\$ 549.381	R\$ 83.867	R\$ 1.426.041	R\$ 83.867	R\$ 1.273.969	R\$ 167.735
	Tecnologia Manufatura	R\$ 633.248	Tecnologia Manufatura	R\$ 1.509.908	Tecnologia Manufatura	R\$ 1.441.704
 Robô articulado	Tecnologia torneamento	Tecnologia carga e descarga	Tecnologia torneamento	Tecnologia carga e descarga	Tecnologia torneamento	Tecnologia carga e descarga
	R\$ 549.381	R\$ 385.280	R\$ 1.426.041	R\$ 385.280	R\$ 1.273.969	R\$ 522.581
	Tecnologia Manufatura	R\$ 934.661	Tecnologia Manufatura	R\$ 1.811.321	Tecnologia Manufatura	R\$ 1.796.550
 Manipulador pórtico	Tecnologia torneamento	Tecnologia carga e descarga	Tecnologia torneamento	Tecnologia carga e descarga	Tecnologia torneamento	Tecnologia carga e descarga
	R\$ 549.381	R\$ 341.462	R\$ 1.426.041	R\$ 391.305	R\$ 1.273.969	R\$ 384.150
	Tecnologia Manufatura	R\$ 890.842	Tecnologia Manufatura	R\$ 1.817.346	Tecnologia Manufatura	R\$ 1.658.119
 Trocador de placas	Tecnologia torneamento	Tecnologia carga e descarga	Tecnologia torneamento	Tecnologia carga e descarga	Tecnologia torneamento	Tecnologia carga e descarga
	R\$ 782.656	R\$ 0	R\$ 782.656	R\$ 0	R\$ 1.565.312	R\$ 0
	Tecnologia Manufatura	R\$ 782.656	Tecnologia Manufatura	R\$ 782.656	Tecnologia Manufatura	R\$ 1.565.312

Os valores verificados para operação única são os menores para todas as tecnologias de manufatura analisadas, com variação de 32,2% entre os valores médios analisados. Para os centros de torneamento com trocadores de placas, verificou-se o mesmo valor para operação única e para operações 10 e 20 na mesma máquina, pois trata-se da mesma máquina aplicada em possibilidades de operações diferentes. Para operações 10 e 20 na mesma máquina e exceto a tecnologia com trocador de placas, as demais tecnologias avaliadas apresentaram valores relativamente próximos (variação total de 16,9%), devido principalmente ao valor médio atribuído aos centros de torneamento com fusos contrapostos. Para operações 10 e 20 em máquinas distintas e novamente desconsiderando os centros de torneamento com trocadores de placas (que também podem ser utilizados nesta possibilidade de operação), os valores médios

verificados para as tecnologias de manufatura apresentaram variação total de 19,7%. Na Figura 4.8 é apresentado um gráfico comparativo com o resumo dos valores para as tecnologias de manufatura analisadas, para as diferentes possibilidades de operações.

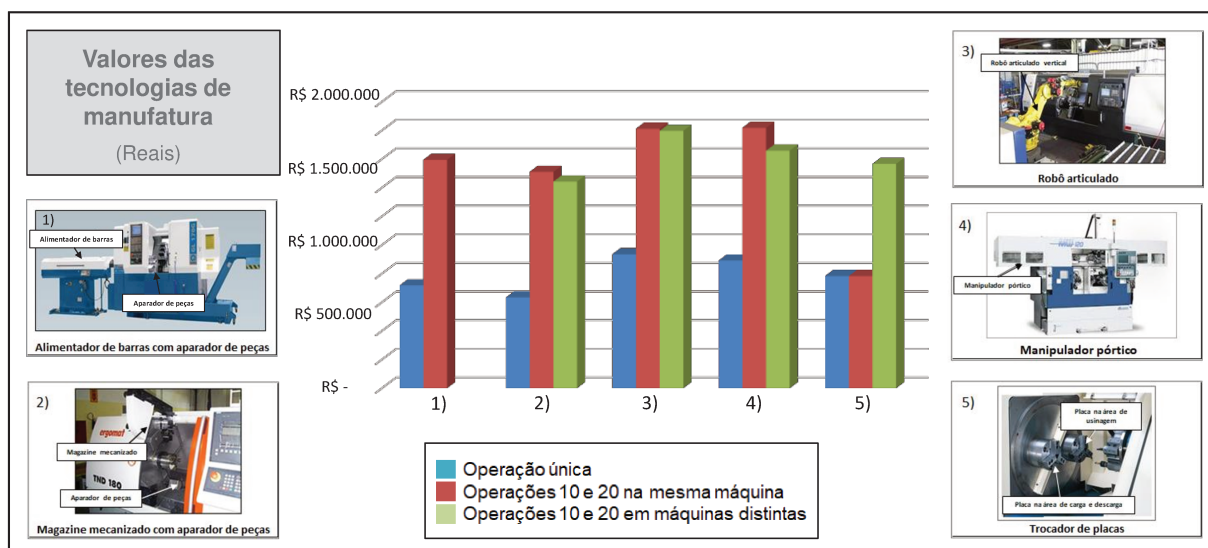


Figura 4.8 – Gráfico comparativo com o resumo dos valores para as tecnologias de manufatura analisadas.

Foram consideradas diferentes tecnologias de torneamento e para carga e descarga, cujos valores são proporcionais aos recursos técnicos que cada tipo oferece. As variações de valores entre as mesmas tecnologias devem-se principalmente à política de valores adotada pelos seus fabricantes, visto que todas as propostas analisadas são consideradas adequadas de acordo com o escopo técnico definido. Tem-se dessa forma os valores das tecnologias de manufatura, que são orientativos em função da condição cambial e que foram considerados como custos das tecnologias de manufatura conforme previamente estabelecido. Com a definição dos custos orientativos para as tecnologias de manufatura (para as possibilidades de operações avaliadas), restam ser estabelecidos os custos de mão de obra, tratado a seguir em custos operacionais.

4.3 Custos operacionais

Os custos operacionais foram obtidos por meio de uma pesquisa realizada com doze empresas de usinagem, de diferentes regiões do país e com diferentes capacidades produtivas.

Algumas das empresas pesquisadas são multinacionais, que possuem entre 300 a 1000 funcionários, com contratos de fornecimentos para montadoras ou então para sistemistas automotivos. Outras empresas são nacionais, que possuem entre 70 a 1000 funcionários, algumas com produtos próprios e outras que fornecem para sistemistas automotivos (duas delas também direto para montadoras). As empresas de usinagem pesquisadas estão presentes nos estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (estados onde se concentra a maior quantidade dos centros de torneamento de alto desempenho no Brasil), sendo que todas elas possuem alguma das tecnologias de carga e descarga analisadas. São empresas com regimes de dois e/ou três turnos de trabalho (dependendo da linha de manufatura), que praticam custos operacionais compatíveis com os requeridos pelo método seletivo proposto. A pedido de algumas das empresas pesquisadas, os dados apresentados a seguir não foram atribuídos diretamente a nenhuma delas, de forma a manter estas informações em caráter confidencial. No Quadro 4.10 são apresentados os custos operacionais anuais informados pelas empresas pesquisadas.

Quadro 4.10 – Custos operacionais anuais informados pelas empresas pesquisadas.

Empresas pesquisadas	Estados	Custos operacionais (R\$/ano)
Empresa 1	São Paulo	54.000,00
Empresa 2	São Paulo	58.000,00
Empresa 3	São Paulo	60.000,00
Empresa 4	São Paulo	60.000,00
Empresa 5	Paraná	55.000,00
Empresa 6	Paraná	58.000,00
Empresa 7	Paraná	60.000,00
Empresa 8	Santa Catarina	55.000,00
Empresa 9	Santa Catarina	60.000,00
Empresa 10	Santa Catarina	60.000,00
Empresa 11	Rio Grande do Sul	52.000,00
Empresa 12	Rio Grande do Sul	56.000,00

Os custos operacionais anuais pesquisados são totais, ou seja, além dos salários dos funcionários, estão considerados todos os impostos e encargos sociais que compõem o custo operacional. O custo operacional médio foi aproximadamente R\$ 57.500,00 por ano, sendo este considerado como parâmetro base para o método seletivo proposto.

Considera-se o custo do posto operativo como sendo o custo da quantidade de operadores requeridos por posto de trabalho e pelo período de um ano, ou seja, no caso de uma empresa que opera em três turnos, seriam necessários três funcionários para atender as diferentes jornadas, totalizando em R\$ 172.500,00 o custo do posto operativo médio anual (3 funcionários x R\$ 57.500,00). Os custos operacionais pesquisados variaram para os diferentes estados avaliados. Na Figura 4.9 são apresentados os custos operacionais médios pesquisados por estado.

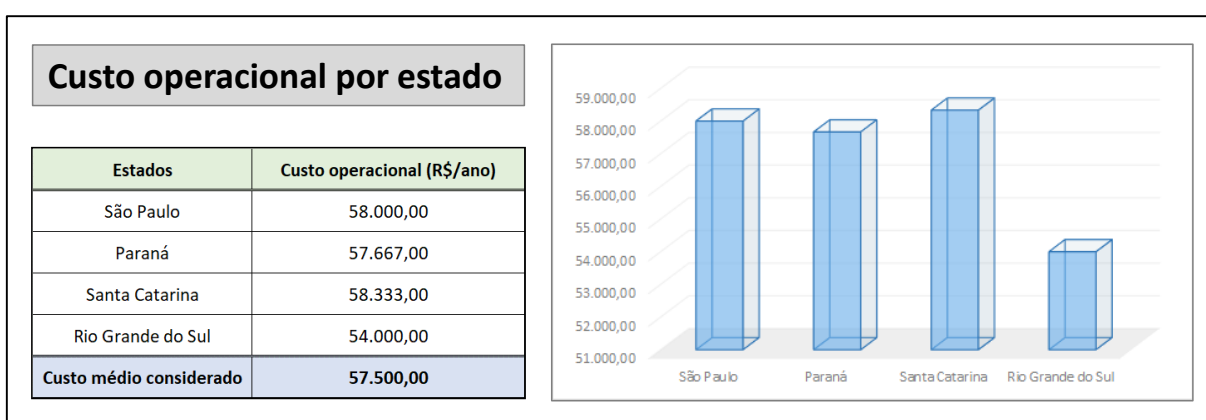


Figura 4.9 – Custos operacionais médios por estado.

Os menores custos operacionais pesquisados são praticados no Rio Grande do Sul, sendo na média 6,1% inferior ao custo operacional médio. Já os custos operacionais verificados para os estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina, variaram muito pouco entre si, estando todos próximos ao custo operacional médio considerado pelo método seletivo. O custo operacional considerado poderá ser alterado pelo usuário do método seletivo caso necessário, de forma a ajustar os resultados pretendidos para o processo de torneamento em análise. O método proposto apresentaria diferentes resultados se aplicado em outros países, pois quanto maior o custo operacional, maior seria a necessidade de utilizar tecnologias de carga e descarga, visando sempre a redução do custo por peça.

Com a definição dos dados obtidos nos procedimentos experimentais realizados, os custos das tecnologias de manufatura analisadas e o custo operacional considerado, o método seletivo passa a ter todos os dados necessários para realizar os cálculos e simulações para os processos de torneamento a serem analisados. A seguir são apresentados os estudos de casos realizados com a utilização do método seletivo proposto.

Dados de Entrada

Dados de entrada

Tempo de Máquina OP 10: segundos ?

Tempo de Máquina OP 20: segundos ?

Quantidade de turnos: unidades

Disponibilidade Fabril: horas/ano

Quantidade de peças requerida: peças/ano

Figura 4.11 – Tela para inclusão dos dados de entrada para o processo de torneamento em análise.

Na Figura 4.12 é apresentada a tela com os parâmetros base *default* adotados para as tecnologias de carga e descarga analisadas. Se for necessário alterar os parâmetros base *default*, o usuário deve clicar sobre a combinação da tecnologia com a possibilidade de operação desejada, visando abrir uma tela de edição específica para cada condição, conforme é mostrado na Figura 4.13.

Parâmetros Base

Tecnologias

	Operação Única	Operações 10 e 20 na Mesma Máquina	Operações 10 e 20 em Máquinas Distintas
Tecnologias			
	<p>Tempo LU: 11,50</p> <p>Eficiência: 8200,00 %</p> <p>Máqs. por Operador: 2,00</p> <p>Custo Tecnologia: R\$ 717.070,00</p>	<p>Tempo LU: 15,00</p> <p>Eficiência: 8340,00 %</p> <p>Máqs. por Operador: 2,00</p> <p>Custo Tecnologia: R\$ 1.593.730,00</p>	Não se aplica!
	<p>Tempo LU: 8,20</p> <p>Eficiência: 8580,00 %</p> <p>Máqs. por Operador: 2,00</p> <p>Custo Tecnologia: R\$ 890.843,00</p>	<p>Tempo LU: 21,70</p> <p>Eficiência: 9830,00 %</p> <p>Máqs. por Operador: 2,00</p> <p>Custo Tecnologia: R\$ 1.817.345,00</p>	<p>Tempo LU OP10: 9,95</p> <p>Eficiência OP10: 8780,00 %</p> <p>Tempo LU OP20: 9,95</p> <p>Eficiência OP20: 8780,00 %</p> <p>Máqs. por Operador: 2,00</p> <p>Custo Tecnologia: R\$ 1.858.118,99</p>
	<p>Tempo LU: 9,95</p> <p>Eficiência: 8410,00 %</p> <p>Máqs. por Operador: 2,00</p> <p>Custo Tecnologia: R\$ 533.248,00</p>	<p>Tempo LU: 15,50</p> <p>Eficiência: 8750,00 %</p> <p>Máqs. por Operador: 2,00</p> <p>Custo Tecnologia: R\$ 1.509.908,00</p>	<p>Tempo LU OP10: 8,65</p> <p>Eficiência OP10: 8290,00 %</p> <p>Tempo LU OP20: 8,65</p> <p>Eficiência OP20: 8290,00 %</p> <p>Máqs. por Operador: 2,00</p> <p>Custo Tecnologia: R\$ 1.441.704,00</p>

* Clique em uma célula para editar os valores dos parâmetros de uma tecnologia

Figura 4.12 – Tela com os parâmetros base *default* para as tecnologias de carga e descarga analisadas.

Gantry Loader - Operações 10 e 20 em máquinas distintas

Valores Mensurados

Tempo de Carga e Descarga OP10: s.

Tempo de Carga e Descarga OP20: s.

Eficiência Produtiva: (%)

Quantidade de Máquinas por Operador: un.

Custos

Tecnologia de Torneamento

Moeda:

Índice de Nacionalização: (%)

Custo Tecnologia Torneamento: R\$

Tecnologia de Carga e Descarga

Moeda:

Índice de Nacionalização: (%)

Custo Tecnologia Carga e Descarga: R\$

Figura 4.13 – Tela para edição dos parâmetros base *default*, para cada uma das combinações consideradas.

Conforme informado previamente, os parâmetros base *default* podem ser alterados manualmente (tanto para os dados das tecnologias analisadas, quanto para os dados de câmbio), caso o usuário julgue conveniente melhorar a acuracidade da simulação em análise. Na Figura 4.14 é apresentada a tela com os dados de câmbio, que são considerados para o processo de torneamento em análise. O usuário poderá atualizar os dados cambiais automaticamente se estiver utilizando o *software online*, senão poderá inseri-los manualmente na referida tela. Como condição *default*, esta tela apresentará os dados de câmbio da última atualização realizada.

Figura 4.14 – Tela com os dados de câmbio *default* para as tecnologias de carga e descarga analisadas.

A última tela funcional refere-se às configurações, que é utilizada para cadastramento das tecnologias de carga e descarga nas possibilidades de operações consideradas, apresentada na Figura 4.15. O *software* tem cadastrado as tecnologias de carga e descarga nas possibilidades de operações consideradas (conforme as premissas definidas no Capítulo 3), contudo permite incluir novas tecnologias de carga e descarga caso seja pretendido pelo usuário.

Figura 4.15 – Tela para cadastramento das tecnologias de carga e descarga nas possibilidades de operações consideradas.

Com a inclusão dos dados de entrada referentes ao processo de torneamento em análise e a atualização dos dados de câmbio, o método seletivo considera os parâmetros base adotados para as tecnologias de carga e descarga e realiza automaticamente os cálculos de tempo de ciclo, capacidades, necessidades e custos definidos previamente, de forma a selecionar as tecnologias de carga e descarga mais adequadas para os processos de torneamento analisados.

Como estudos de casos, o método seletivo foi simulado nas empresas de usinagem nas quais foram realizados os procedimentos experimentais, nos mesmos processos onde os dados das tecnologias de carga e descarga foram extraídos, para verificar se os resultados calculados pelo método estavam compatíveis com os dados reais analisados. Nesses casos simulados, em termos de tempos de carga e descarga e eficiências produtivas, os dados considerados pelo método eram diferentes dos dados dos casos em análise, pois o método considerou como parâmetros base as médias dos resultados previamente verificados nos procedimentos experimentais (conforme definido no item 4.1).

O método seletivo foi simulado inicialmente em cinco casos, com tecnologias de carga e descarga distintas, dos quais os resultados apresentados foram avaliados em três aspectos: 1) Tempos, capacidades e necessidades; 2) Custo por peça “parcial”; 3) Utilização da tecnologia de manufatura. Como premissa para os resultados serem considerados aceitáveis, foi estabelecido em 80% o índice de acuracidade para os aspectos considerados. Para os resultados dos cálculos realizados, foi considerado aceitável $\pm 10\%$ de variação entre os resultados calculados pelo método e os resultados verificados nas condições reais dos casos analisados. Nessas simulações, foram inseridos no *software* do método seletivo os dados de entrada dos processos de torneamento em análise, para que os resultados apresentados pelo método seletivo fossem posteriormente comparados com os dados reais.

De uma forma geral, os resultados dos cálculos de tempos, capacidades, necessidades e custos por peça “parcial” apresentaram resultados considerados aceitáveis, com 80% de acuracidade nesses dois aspectos analisados. Porém, em termos de utilização da tecnologia de manufatura, os resultados mostraram-se insatisfatórios, com acuracidade de apenas 40% para os casos avaliados. Em função disso e considerando as observações verificadas nesses casos inicialmente avaliados, fez-se necessário realizar ajustes no método seletivo para melhorar a acuracidade dos resultados pretendidos. Para considerar esses novos fatores observados no método seletivo, foram incluídos parâmetros de ajuste complementares aos dados de entrada previamente requeridos, conforme é apresentado na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Tela com os parâmetros de ajuste a serem selecionados pelo usuário do método seletivo.

Dessa forma, o usuário do método seletivo pode selecionar os parâmetros de ajuste de acordo com o processo de torneamento em análise. Os parâmetros de ajuste criados foram:

- ❑ [Para todas as possibilidades de operações] - Tipo de peça bruta a ser utilizada: 1) barras; 2) *blanks* segmentados. Se o usuário optar por um tipo de peça bruta, automaticamente desconsidera o outro. Selecionando barras, somente a tecnologia com alimentador de barras será considerada, caso selecione *blanks* segmentados, a tecnologia com alimentador de barras será desconsiderada para o processo de torneamento em análise;
- ❑ [Para todas as possibilidades de operações] – Peças com cuidados especiais na sua manipulação: 1) sim; 2) não. Principalmente para as peças que requerem orientação angular, para serem carregadas corretamente nas placas de fixação. Se o usuário selecionar sim, somente a tecnologia com robô articulado será considerada, selecionando não, as demais tecnologias de manufatura também serão consideradas para o processo em análise. O manipulador pórtico também poderia ser considerado para peças que requerem orientação angular, porém na configuração previamente definida, deveria ter sido considerado unidade de orientação para essa finalidade (contudo não foi considerado no item 4.2);

- ❑ [Para todas as possibilidades de operações] - Tipo de material da peça: 1) dúcteis (cobres, latões e aços baixo carbono); 2) outros tipos de materiais. Se o usuário selecionar dúcteis, todas as tecnologias de manufatura serão consideradas, selecionando outros tipos de materiais, a tecnologia com alimentador de barras deixará de ser considerada (devido ao tempo superior para segmentação da barra, que é um processo necessário nos casos com alimentadores de barras);
- ❑ [Somente nos casos com operações 10 e 20] – Peças com tolerâncias de posição entre as operações 10 e 20: 1) sim; 2) não. Se o usuário selecionar a opção sim, somente a possibilidade operações 10 e 20 na mesma máquina será considerada (em centros de torneamento com fusos contrapostos), selecionando não, o método considerará adicionalmente simulações com operações 10 e 20 em máquinas distintas para o processo de torneamento em análise;
- ❑ [Somente nos casos com operações 10 e 20] – Diâmetro externo da peça torneado na operação 10: 1) sim; 2) não. Se o usuário selecionar sim, a tecnologia com magazine mecanizado será desconsiderada, selecionando não, a tecnologia com magazine mecanizado será considerada junto com as demais tecnologias consideradas.

A partir disso, foram realizadas novas simulações nos casos previamente comentados, para avaliar se os resultados melhoraram após as inclusões dos parâmetros de ajuste. A simulação inicial foi para um caso que utilizava alimentador de barras combinado com aparador de peças (Caso A, Figura 4.17), para uma peça com operações 10 e 20 na mesma máquina.

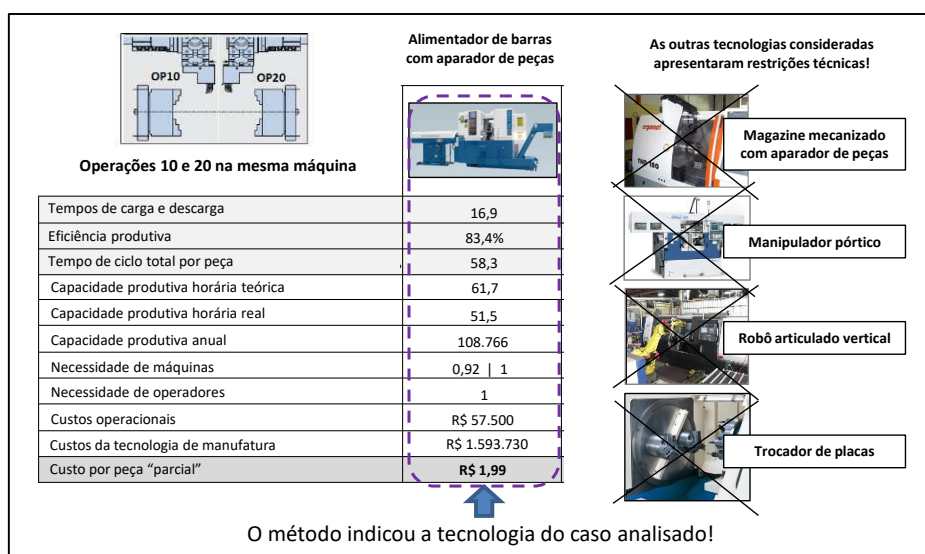


Figura 4.17 – Resultados do Caso A: Alimentador de barras combinado com aparador de peças.

Os cálculos realizados apresentaram dados aceitáveis, inclusive em relação ao custo por peça “parcial”, no qual as parcelas de máquina e de mão de obra somadas representaram aproximadamente 47% do custo total da peça usinada. Com a inclusão dos parâmetros de ajuste, o método indicou a tecnologia utilizada no caso analisado, contudo foram notadas outras possibilidades de manufatura que poderiam ser utilizadas para a peça em questão. A primeira constatação foi o tipo de peça bruta utilizada pela empresa de usinagem, que estava utilizando barras de alumínio com perfil sextavado, com baixo custo e que possibilitam usar outras peças com diferentes comprimentos (sem a necessidade de *setup* no alimentador de barras). Questionado sobre segmentarem as barras previamente em forma de *blanks* e utilizarem um centro de torneamento com trocador de placas para aquela peça em análise (primeira opção selecionada pelo método na simulação inicial realizada), o responsável pela empresa de usinagem disse que não conhecia tal tecnologia. Sobre utilizarem magazine mecanizado combinado com aparador de peças (segunda opção selecionada inicialmente pelo método), foi informado que a peça previamente usinada na operação 10 não poderia ser carregada por sistema de calha na operação 20, pois as peças bateriam umas nas outras durante o processo de carregamento, podendo comprometer a qualidade das operações de usinagem previamente realizadas. Caso as peças que partem de barras fossem previamente segmentadas, o manipulador pórtico e o robô articulado vertical também poderiam ser avaliados para o processo deste caso analisado.

Para o Caso B, estavam sendo utilizados magazines mecanizados combinados com aparadores de peças, para uma peça com operações 10 e 20 em máquinas distintas (Figura 4.18).

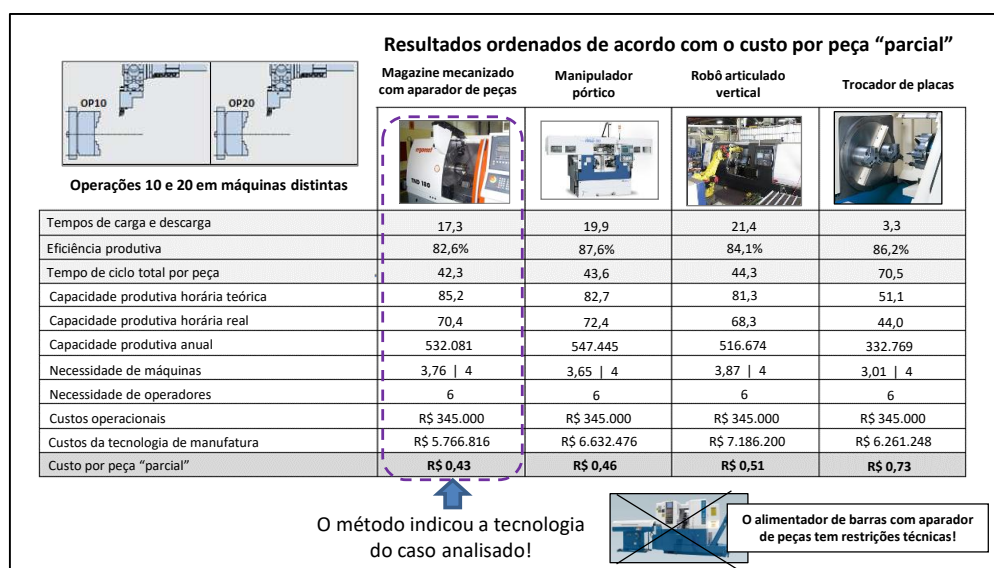


Figura 4.18 – Resultados do Caso B: Magazines mecanizados combinados com aparadores de peças.

Os resultados verificados para o Caso B foram os melhores dentre os casos analisados, pois os cálculos realizados apresentaram dados aceitáveis, o custo por peça “parcial” apresentou um índice de 53% em relação ao custo total da peça em questão e a tecnologia indicada pelo método era a mesma que estava sendo utilizada desde a simulação prévia realizada. Neste caso, tratava-se de uma peça com tolerâncias abertas (algumas das tolerâncias eram decimais), na qual durante a operação 10, somente o diâmetro interno havia sido usinado. Como o diâmetro externo da peça permanecia bruto antes da operação 20, neste caso não havia restrições em relação a utilização do magazine mecanizado para operações 10 e 20 em máquinas distintas. Somente o alimentador de barras combinado com aparador de peças apresentou restrições técnicas para o processo em análise, pois as peças brutas partiam de *blanks* forjados, não sendo possível alimentá-las em forma de barras.

Para o Caso C, estava sendo utilizado um robô articulado vertical integrado a uma célula de usinagem automatizada, para uma peça com operação única de torneamento (Figura 4.19).

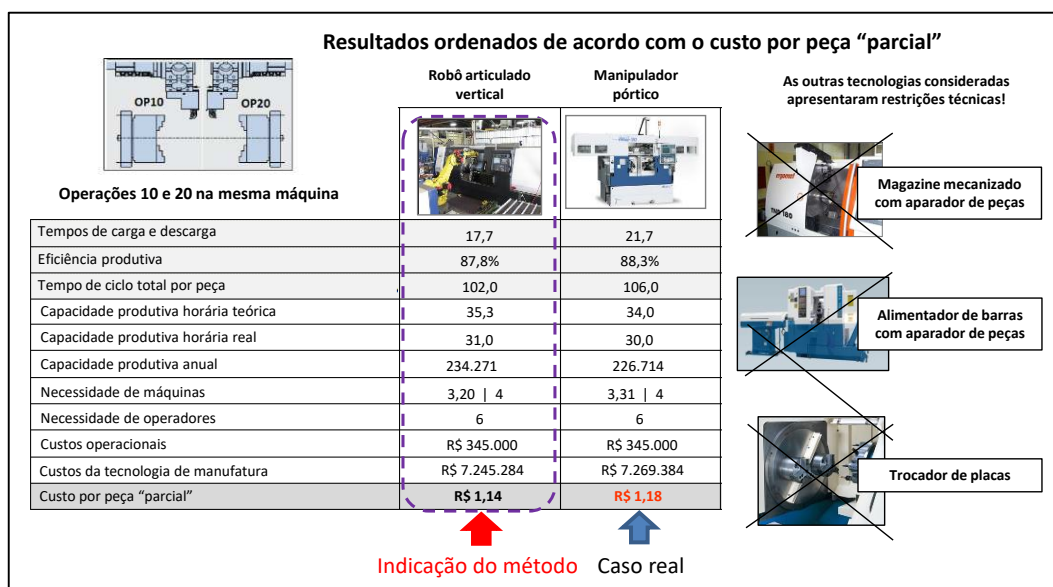


Figura 4.19 – Resultados do Caso C: Robô articulado vertical integrado a uma célula automatizada.

Neste caso em particular, além do centro de torneamento haviam uma geradora de dentes e uma gravadora integradas na mesma célula automatizada. A geradora de dentes estava sendo o gargalo produtivo da célula automatizada, prevalecendo desta forma seus dados sobre os dados do processo de torneamento previamente realizado. Em função disso, os resultados dos cálculos apresentaram variações superiores à estabelecida. Contudo, o custo por peça “parcial” apresentou um índice de 55% em relação ao custo total da peça em questão, mesmo considerando os custos superiores em relação ao investimento em máquinas (além do centro de

torneamento, fazia parte deste custo o investimento com a gravadora, com a geradora de dentes e com o robô articulado vertical, somado a todos os periféricos necessários para a composição da célula automatizada). Em relação a seleção da tecnologia de manufatura por meio dos cálculos realizados pelo método, a tecnologia utilizada por esta empresa de usinagem seria a última indicação de acordo com os resultados previamente simulados (o custo por peça parcial era o maior para o robô articulado vertical). Mas, depois da inclusão dos parâmetros de ajuste, o método indicou a mesma tecnologia utilizada, pois a peça em questão necessitava de orientação angular para a sua carga orientada no sistema de fixação da gravadora.

Para o Caso D, estava sendo utilizado um manipulador pórtico, para uma peça com operações 10 e 20 na mesma máquina (Figura 4.20).



forjados, exigia-se menos em termos de remoção de material pelo processo de usinagem, alterando desta forma a estrutura típica de custos verificada na revisão da literatura. Sobre as limitações técnicas das outras tecnologias de carga e descarga analisadas, os *blanks* forjados não poderiam ser carregados por calha para manter a integridade da peça, as peças não poderiam partir de barras conforme foi mencionado (exigência de *blanks* forjados) e o trocador de placas não garantiria as tolerâncias de posição entre as operações 10 e 20 requeridas na peça analisada.

Por fim, o Caso E, onde estava sendo utilizado um centro de torneamento com trocador de placas, para operações 10 e 20 em máquinas distintas (Figura 4.21).



Figura 4.21 – Resultados do Caso E: Centro de torneamento com trocador de placas.

Neste caso, os cálculos realizados apresentaram resultados aceitáveis, o custo por peça “parcial” apresentou um índice de 55% em relação ao custo total da peça em questão e a tecnologia indicada pelo método era a mesma que estava sendo utilizada. Analisando a peça que estava sendo usinada, esta possuía desbalanceamento entre as operações 10 e 20. A peça bruta era um *blank* forjado fabricado pela própria empresa (por esta razão, o custo da matéria prima não desconfigurou a estrutura de custos verificada na revisão da literatura). Eram peças que precisavam ser manipuladas com cuidado para não comprometer a qualidade do *blank* forjado e que, no passado, eram usinadas em centros de torneamento com manipuladores pórticos para carga e descarga automática. Segundo informado pela empresa de usinagem, os desbalanceamentos entre as operações 10 e 20 recorrentes nas suas peças fizeram com que fossem avaliadas outras alternativas de manufatura, sendo posteriormente adquiridos os centros de torneamento com trocadores de placas para eliminar esses desbalanceamentos e

consequentemente reduzirem o custo de usinagem (lembrando que nesse conceito de máquina, somam-se os tempos das operações 10 e 20 para ter-se o tempo de ciclo total da peça). Os resumos dos resultados dos estudos de casos após a inclusão dos parâmetros de ajuste são apresentados no Quadro 4.11.

Quadro 4.11 – Resumo dos resultados dos estudos de casos após a inclusão dos parâmetros de ajuste.

Resultados dos cálculos realizados	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E	Acuracidade
Tempos, capacidades e necessidades	ok	ok	nok	ok	ok	80%
Custo por peça "parcial"	ok	ok	ok	nok	ok	80%
Utilização da tecnologia de manufatura	ok	ok	ok	nok	ok	80%

Os cálculos de tempos, capacidades, necessidades e custos por peça “parcial” apresentaram resultados considerados aceitáveis, mantendo 80% de acuracidade nesses dois aspectos analisados. Quanto a utilização da tecnologia de manufatura selecionada pelo método, os parâmetros de ajuste incluídos posteriormente melhoraram os resultados selecionados, aumentando para 80% o índice de acuracidade nesse aspecto. Desta forma, conclui-se que o método seletivo apresentou dados e resultados aceitáveis para os aspectos analisados, mostrando-se um método confiável para selecionar quais tecnologias de carga e descarga são mais adequadas para diferentes condições de torneamento. Não se trata de um método específico para realizar de cálculos de custo por peça, mas sim, de uma ferramenta para apoio na tomada de decisões, disponibilizando informações para melhoria dos processos de torneamento atuais e também para análises de investimentos em tecnologias de manufatura.

Durante os procedimentos experimentais realizados nas empresas de usinagem, foi constatado que tecnologias idênticas possuem tempos de carga e descarga e eficiências produtivas diferentes. Centros de torneamento iguais (com mesmo fabricante, modelo, configuração e ano de fabricação) e usinando as mesmas peças apresentaram tempos de máquina diferentes. Nas tecnologias de carga e descarga investigadas, também foram verificados tempos e eficiências diferentes para equipamentos idênticos. Após os acompanhamentos das tecnologias de manufatura investigadas, questionamentos aos seus fabricantes e conversas com os seus operadores, as diferenças entre os tempos de máquina, tempos de carga e descarga e eficiências produtivas foram atribuídas:

- ❑ A possíveis diferenças na programação do *ladder* (lógica de segurança da máquina-ferramenta com a integração da tecnologia de carga e descarga);
- ❑ Aos conjuntos mecânicos que compõem as tecnologias de manufatura, concebidos com diferentes tolerâncias e ajustes geométricos durante suas fabricações e montagens;
- ❑ A diferenças nos desempenhos das motorizações, em razão dos ajustes realizados durante as inspeções eletrônicas das máquinas e das alimentações elétricas que chegam até as máquinas (devido à perda de carga);
- ❑ A possíveis alterações realizadas ao longo do tempo nas máquinas, que muitas vezes não são documentadas e assim não demonstram possíveis diferenças entre as máquinas comparadas.

Outras constatações sobre as tecnologias de manufatura analisadas também foram notadas durante os procedimentos experimentais e merecem ser comentadas conforme segue:

- ❑ Nos processos de torneamento com carga e descarga manuais os tempos de carga e descarga variam entre 10 a 15 segundos e as eficiências produtivas variam entre 70% a 75%, apresentando desse modo resultados inferiores aos dados obtidos com as tecnologias de carga e descarga avaliadas;
- ❑ Deve-se avaliar com atenção a viabilidade das tecnologias de carga e descarga para demandas abaixo de 300 peças (principalmente para peças de pequeno porte dimensional e com baixos tempos de ciclo), devido ao tempo de *set up* requerido para um lote que rapidamente será usinado. Nesses casos se recomenda analisar sempre a possibilidade de carga e descarga manuais;
- ❑ Quanto maior o investimento em tecnologias de carga e descarga, menor será o custo operacional com o processo de usinagem. Para o torneamento de peças seriadas, os retornos em relação aos capitais investidos normalmente são viáveis;
- ❑ A estrutura de custos típica para os processos de torneamento é a informada na revisão da literatura, contudo, dependendo da condição de custo da matéria prima, essa estrutura de custos pode ser alterada de forma considerável;

- ❑ As peças que partem de barras geralmente apresentam custos de matéria prima inferiores, porém, tem-se um maior custo com ferramentas de corte devido a maior remoção de material da peça e consequentemente utilização superior da tecnologia de manufatura empregada;
- ❑ Os tempos de ciclo de usinagem normalmente são superiores quando se utiliza o alimentador de barras, pois além da maior quantidade de material para ser removido das peças que partem de barras, tem-se ainda o tempo complementar para realizar o corte de segmentação do restante da barra;
- ❑ Para peças com diâmetro externo abaixo de 20 mm geralmente são utilizados tornos automáticos com cabeçote móvel. Além de disponibilizarem maiores rotações nos fusos (compatíveis com as velocidades de corte requeridas), são máquinas com características funcionais e construtivas para peças torneadas com tais dimensões;
- ❑ Para peças com relação de comprimento/diâmetro superiores a $9 \times d$ também são utilizados os tornos automáticos com cabeçote móvel. Neste conceito de torno, as peças avançam à medida que são usinadas, mantendo sempre uma relação de comprimento/diâmetro adequada. Em centros de torneamento convencionais requer-se equipamentos complementares para esse tipo de aplicação, como contraponto, luneta e em alguns casos até a segunda torre porta-ferramentas para realizar torneamento simultâneo (*balance cutting*).

Após as apresentações dos dados analisados e dos resultados finais do método para as respectivas empresas de usinagem, constatou-se em alguns casos que as tecnologias de manufatura utilizadas por elas não são necessariamente as mais adequadas para os processos de torneamento avaliados. Segundo os responsáveis dessas empresas de usinagem, os processos utilizados para esses casos haviam sido definidos em função das tecnologias de manufatura que já tinham disponíveis, do valor estabelecido para investimento no momento da aquisição e mesmo por não conhecerem algumas das tecnologias apresentadas e as suas particularidades. Notou-se ainda que muitos estudos têm sido realizados no sentido de reduzir ao máximo os tempos de carga e descarga, sendo importante para estas empresas todos os esforços realizados nesse sentido, visando sempre a redução do custo final da peça.

5 CONCLUSÃO

Esta tese de doutorado teve como objetivo propor um método para selecionar quais tecnologias de carga e descarga são mais adequadas, especificamente para os processos de torneamento de peças seriadas e em diferentes condições de manufatura, cujos os resultados mostraram-se confiáveis conforme foi apresentado no Capítulo 4. Para facilitar a utilização do método seletivo proposto, foi desenvolvido um *software* inédito para tal finalidade, que possui um banco de dados *default* (com base nos dados obtidos durante os procedimentos experimentais realizados) e que pode ser alterado pelo usuário caso julgue necessário (visando melhorar a acuracidade dos resultados pretendidos para o processo de torneamento em análise).

Sobre as tecnologias de carga e descarga avaliadas, observou-se que cada uma delas demonstra diferentes tipos de viabilidades, que variam em função do tipo de aplicação, conforme segue:

- ❑ Os alimentadores de barras combinados com aparadores de peças apresentam vantagens para peças com materiais dúcteis (cobres, latões e aços baixo carbono) e com baixos tempos de usinagem, principalmente para peças com baixos valores, como conexões, terminais, entre outros;
- ❑ Os magazines mecanizados combinados com aparadores de peças representam as tecnologias de carga e descarga que requerem menores investimentos entre as demais avaliadas, porém, normalmente são utilizados para peças sem tolerâncias e/ou qualidade superficial críticas. Deve-se tomar um cuidado especial para utilizar os magazines mecanizados em peças que requerem operações 10 e 20, para evitar que as operações previamente usinadas na operação 10 sejam comprometidas durante o carregamento da operação 20. Peças típicas para os magazines mecanizados são roldanas de portão, roletes e buchas para esteiras de equipamentos agrícolas, entre outros;
- ❑ As células automatizadas com robôs articulados verticais demonstram vantagens principalmente para peças de maior porte dimensional, em termos de dimensões e pesos, por questões de ergonomia do operador. Tratando-se da capacidade de carga e descarga, os robôs articulados possibilitam manipular peças com portes dimensionais superiores dentre as demais tecnologias avaliadas. Também são

adequados para peças que requerem orientações angulares durante seus carregamentos na placa de fixação, para assegurar posicionamentos e repetibilidades requeridos para esses tipos de peças;

- ❑ Os manipuladores pórticos (*Gantry Loaders*) apresentam os melhores resultados de eficiências produtivas dentre as demais tecnologias avaliadas (juntamente com os centros de torneamento com trocadores de placas). Os manipuladores pórticos também mostram vantagens para peças que requerem orientações angulares, para garantir o carregamento posicionado na placa de fixação. Aplicados nos centros de torneamento duplo frontais, esta tecnologia de manufatura demonstra vantagens em termos de menor espaço fabril requerido, menor consumo de energia, menores cuidados com o fluído de corte (com um tanque comum para duas máquinas), entre outros. Geralmente são utilizados manipuladores pórticos para carga e descarga de peças automotivas diversas;
- ❑ Os centros de torneamento com trocadores de placas apresentaram os menores tempos de carga e descarga e as maiores eficiências produtivas dentre as demais tecnologias analisadas, com vantagens principalmente para peças com baixos tempos de usinagem e com desbalanceamentos entre as operações 10 e 20. Contudo não podem ser utilizados para peças que possuem tolerâncias de posição entre as operações 10 e 20.

Mesmo com as diferenças verificadas entre as tecnologias de manufatura analisadas, os cálculos dos tempos, capacidades e necessidades realizados pelo método seletivo apresentaram bons resultados, pois tratam-se de projeções lineares dos cálculos previamente definidos. Os cálculos avaliados foram: tempo de ciclo total por peça, capacidade produtiva horária teórica, capacidade produtiva horária real, capacidade produtiva anual, necessidade de máquinas e necessidade de operadores.

Os custos calculados pelo método seletivo adotaram como premissas os dados pesquisados, porém dependem da condição cambial, e por esta razão, sempre serão variáveis para os processos de torneamento em análise. Os cálculos de custo operacional e do custo da tecnologia de manufatura apresentaram valores coerentes na maioria das simulações realizadas. Alguns valores das tecnologias avaliadas apresentaram valores inconsistentes (devido à política de valores dos fabricantes), mas de uma forma geral representam os valores praticados, e

portanto, possibilitam resultados aceitáveis para o custo por peça “parcial” proposto (lembrando que todos os parâmetros base podem ser editados pelo usuário do método seletivo, caso julgue necessário para melhorar a acuracidade dos resultados pretendidos).

O método seletivo proposto por esta tese de doutorado tem como intuito disponibilizar informações para apoio na tomada de decisões, tanto para melhoria dos processos de torneamento atuais, quanto para análises de investimentos em novas tecnologias de manufatura (não se trata de um método específico para realizar cálculos de custo por peça). Os resultados finais das simulações realizadas com o método seletivo foram considerados aceitáveis para os aspectos analisados, concluindo desta forma que trata-se de um método confiável para selecionar quais tecnologias de carga e descarga são mais adequadas para diferentes condições de torneamento.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os tempos de carga e descarga são tempos totalmente improdutivos e cada vez mais estão sendo explorados pelas empresas de usinagem de peças seriadas. Nesse sentido, futuramente, mais trabalhos poderiam ser realizados sobre esta parcela dos processos de usinagem, como:

- ❑ Para o método seletivo proposto, a realização de novos monitoramentos das tecnologias de carga e descarga poderiam demonstrar novos fatores não considerados, visando a inclusão de novos parâmetros de ajuste e assim aumentar a acuracidade dos resultados apresentados;
- ❑ O mesmo método seletivo poderia ser desenvolvido para peças com formas prismáticas, que utilizam como meio de manufatura os centros de usinagem (para operações com ferramentas rotativas como fresamento, furações, rosqueamento, entre outros), ao invés dos centros de torneamento considerados pelo método proposto por esta tese;
- ❑ O desenvolvimento de novas tecnologias de carga e descarga seria de grande importância para o setor metal mecânico, principalmente para as empresas de usinagem sistêmicas de peças seriadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMAQ. **A história das máquinas: ABIMAQ 70 anos**. 1. ed. São Paulo: Magma Editora Cultural, 2006. 167 p.

AFONSO, D. F. Torneamento. **Evolução histórica**, 2012. Disponível em: [<http://djairfilipe1.blogspot.com.br/>](http://djairfilipe1.blogspot.com.br/) Acesso em: 03 mar. 2017.

AGOSTINHO, O. L. **Design of technological infrastructure for competitiveness as function of time**, Artigo apresentado na Euromot 2011 - The 5th European Conference on Management of Technology, Tampere – Finlândia.

AGOSTINHO, O. L. **Integração estrutural dos sistemas de manufatura como pré requisito de competitividade**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1995. Tese de Livre Docência.

AGOSTINHO, O. L.; BATOCCHIO, A.; SILVA, I. B. **Proposal of methodology to balance, correlate and align technology and business strategies to competitiveness organization attributes**, Artigo apresentado na Conferência PMA 2012, Cambridge – UK.

AGOSTINHO, O. L.; BATOCCHIO, A.; SILVA, I. B. **Proposta de índices de flexibilidade na gestão da produção**, Artigo apresentado no 10º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica (CIBEM 10) 2011, Porto – Portugal.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175: Usinagem – Processos mecânicos**. Rio de Janeiro, p. 2. 2015.

BATOCCHIO, A. **Um modelo de índice de automação relacionado à flexibilidade e a produtividade dos sistemas de manufatura**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1991. Tese de Doutorado.

CADORE, A. C. **Metodologia de custeio de peças torneadas com base no volume de material removido**, Panambi, p. 27-32, 2016.

CARRARA, A. R. **Implantação de sistema BPMS para a gestão por processos: Uma análise crítica**. São Paulo: Escola Politécnica – Engenharia de Produção, Universidade Estadual de São Paulo, 2011. Dissertação de Mestrado.

COPPINI, N. L. **Usinagem enxuta – Gestão do processo**. 1. Ed. São Paulo: Artliber, 2015. 136p.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. Ed. São Paulo: Artliber, 2013. 272p.

DMG MORI CO., LTD. Catálogo. **Front parallel dual-spindle dual-turret turning center**. Nagoya, 2016.

DMG MORI CO., LTD. Catálogo. **Horizontal machining centers: NHX Series**. Nagoya, 2014.

DMG MORI CO., LTD. Catálogo. **Turning center: CL1500 and CL2000 Series**. Nagoya, 2017.

DUMAS, M.; VALIORGUE, F.; VAN ROBAEYS, A.; RECH, J. **Interaction between a roughing and a finishing operation on the final surface integrity in turning**. 4th CIRP Conference on Surface Integrity, p. 396 – 400, 2018.

ELLISON TECHNOLOGIES. **Robotic automation systems**. Disponível em: <<https://www.ellisontechnologies.com/solutions/ellison-automation/systems>> Acesso em: 11 dez. 2017.

EMAG MASCHINENFABRIK GMBH. Catálogo. **Vertical multi-spindle automatics**. Salach, 2009. 14 p.

ERGOMAT INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. Artigo. **A evolução dos tornos automáticos: do came ao CNC**. São Paulo, 2003. 24 p.

ERGOMAT INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. Artigo. **Usinagem completa de peças complexas na tornearia automática**. São Paulo, 2007. 20 p.

ERGOMAT INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. Catálogo. **Tornos automáticos a cames: TB 42/60**. São Paulo, 2003.

FANUC AMERICA CORPORATION. **Industrial robots for manufacturing**. Disponível em: <<https://www.fanucamerica.com/products/robots/>> Acesso em: 06 nov. 2017.

FANUC CORPORATION. **Compact machining center**. Disponível em: <<http://www.fanuc.co.jp/en/product/robodrill/index.html>> Acesso em: 11 dez. 2017.

FERRARI, A. V. F. Torno automático multifuso. **Tecnologia do torno automático**, 2009. Disponível em: <<http://www.tornoautomatico.com.br/index.php?pagina=materias&tipo=submenu&subid=49>> Acesso em: 22 fev. 2017.

FERREIRA, J. I. A. X. **Proposta de aferição da competitividade em função da correlação de parâmetros organizacionais e de disponibilização de informações**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002. Tese de Doutorado.

FUJI MACHINES. **Horizontal Turning Center: CSD-300R**. Disponível em: <<http://www.fujimachine.com/csd300r.asp>> Acesso em: 12 dez. 2017.

GOURNET, T. **Fordismo e toyotismo na civilização do automóvel**. São Paulo, Boitempo editorial, 1999.

GROOVER, M. K. **Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes and systems**. 3rd edition - John Wiley & Sons Inc. , 2007.

GROOVER, M. P. **Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing** – 3. Ed. – New Jersey: Pearson, 2008.

GUERRERO, F.; LOZANO, S.; KOLTAI, T.; LARRANETA, J. **Machine loading and type selection in flexible manufacturing systems**. International journal of production research, v.37, p.1303-1317, 1999.

IEMCA – BUCCI AUTOMATIONS. **Alimentadores de barras**. Disponível em: <<https://www.iemca.com/br/br/azienda-10>> Acesso em: 16 nov. 2017.

INDÚSTRIAS ROMI S.A. Catálogo. **Tornos universais Romi T**. Santa Bárbara D'Oeste, 2016. 16 p.

INDÚSTRIAS ROMI S.A. Catálogo. **Linha GL**. Santa Bárbara D'Oeste, 2014.

INDÚSTRIAS ROMI S.A. Data Sheet. **Linha GL**. Santa Bárbara D'Oeste, 2015.

INDÚSTRIAS ROMI S.A. Treinamento de produtos. **Linha Multiplic**. Santa Bárbara D'Oeste, 2004.

INDÚSTRIAS ROMI S.A. Treinamento de produtos. **Linha G**. Santa Bárbara D'Oeste, 2007.

KAS ENGENHARIA. **Automação industrial: Projeto de célula robotizada.** São Bernardo do Campo, 2013.

LEONE, G. S. G. **Custos: planejamento, implantação e controle.** Ed.3, 5. reimpr. São Paulo: Atlas, 2008.

KIRITSIS, D.; NEUENDORF, K.; XIROUCHAKIS, P. **Petri net techniques for process planning cost estimation.** Advances in Engineering Software, v.30, p.375-387. June, 1999.

MALEKI, R. A. **Flexible manufacturing systems: The technology and management.** Prentice Hall, Inc. 1991.

MARIANO, E.B. **Conceitos básicos de análise de eficiência produtiva.** In: XIV Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP), Bauru. Anais, 2007.

MARIANO, E.B.; ALMEIDA M.R. ; REBELATTO D.A.N. **Princípios básicos para uma proposta de ensino sobre análise por envoltória de dados.** In: XXXIV Congresso Brasileiro de Ensino em Engenharia (COBENGE), Passo Fundo. Anais, 2006.

MAUS MACCHINE UTENSILI SPECIALI. Catálogo. **Tornitura verticale: Serie MTV.** Campodasergo, 2014.

MAXIMIANO, A. C. A. **Teoria geral da administração:** da revolução urbana a revolução digital. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2005.

METRA MULTISPINDLE LATHES. Catálogo. **Product line: CNX series, CXZ series & special attachments and automation systems.** Iurreta, 2013.

MONDEN, Y. **Sistema toyota de produção:** uma abordagem Integrada ao Just-in-time. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015. 552 p.

MURATA MACHINERY, LTD. Catálogo. **Frontal turning centers: MW/MS series, MD series and MJ series.** Inuyama, 2012.

NORMA EQUIPAMENTOS LTDA. **Alimentadores automáticos.** Disponível em: <<http://www.normaequipamentos.com.br/produtos/detalhes/8>> Acesso em: 08 dez. 2017.

NOVASKI, O. **Custos de usinagem.** Campinas, São Paulo: Editora UNICAMP, 1991.

OLIVEIRA, A. F. **Uma contribuição sobre a análise dos aspectos tecnológicos, estruturais e comportamentais na implementação de sistemas de informação integrados,** Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2010. Dissertação de Mestrado.

PADOVEZE, C. L. **Curso básico gerencial de custos.** São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

PERRONI, I. M. da P. M. - **Proposta de modelo para análise da integração de automação,** Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2011. Dissertação de Mestrado.

PORTER, M. E. **Vantagem competitiva: criando e sustentando um desempenho superior.** 12ª ed. Rio de Janeiro: Campus, 1989.

PORTER, M. E. **Competitive advantage of nations.** p.75 - Harvard Business Review, 1990.

PRACTICAL MACHINIST. **A robotic (r)evolution,** 2013. Disponível em: <<http://www.practicalmachinist.com/modern-machine-shop/a-robotic-revolution/>> Acesso em: 13 mar. 2017.

RAJEEV, K. **A modular approach toward flexible manufacturing.** Integrated manufacturing systems, v.9, p.77-86, 1998.

SALAHELDIN, S. I.; EID, R. **The implementation of world class manufacturing techniques in egyptian manufacturing firms: An empirical study,** p. 552 – (2007).

SANDVIK COROMANT. **Manual técnico de usinagem.** Sandviken, 2009.

SÄFSTEN, K.; WINROTH, M. ; STAHRÉ, J. **The content and process of automation strategies.** International journal of production economics, v.110, p.25-38. February, 2007.

SHIMADA MACHINERY CO., LTD. Catálogo. **CNC two spindle indexer reload while machining: 2SI Series.** Toyokawa, 2015.

SHIMADA MACHINERY CO., LTD. Catálogo. **Productive CNC four spindles lathe Shimada-Kitako: HS4200 Series.** Toyokawa, 2012.

SHIMADA MACHINERY CO., LTD. Catálogo. **Productive CNC four spindle vertical lathe Shimada-Kitako: VT4-350 Series.** Toyokawa, 2014.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JONHSTON, R. **Administração da produção.** – 2. Ed. – São Paulo: Atlas, 2002.

SLUGA, A.; BUTALA, P.; PEKLENIK, J. **A conceptual framework for collaborative design and operations of manufacturing work systems.** CIRP Annals, v.54, p.437-440. December, 2005.

SVSLOG – SOLUÇÕES EM COMÉRCIO EXTERIOR. **Conhecer o ex-tarifário.** Disponível em: <<http://extarifario.svslog.com.br/?gclid=EAIaIQobChMIoYrog6Xu2AIVjw->

[RCh39BA6pEAAYASABEgKRo_D_BwE#content](#)> Acesso em: 29 jan. 2018. Tradução Luiz Corrêa. – 3. Ed. – São Paulo: Atlas, 2009.

SUE, X. Y. **An architecture of configurable equipment connectivity in a future.** Manufacturing information system, p.1144-1149. July, 2003.

TAEGUTEC LTD. **Taeguteconomics:** Artigos Taegutec. Daegu, 2014.

YAMAZAKI MAZAK CORPORATION. Catálogo. **Quick turn nexus.** Oguchi, 2009.

YAMAZAKI MAZAK CORPORATION. Catálogo. **Quick hyper quadrex.** Oguchi, 2007.