



OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM COM AUXÍLIO DE SISTEMA ESPECIALISTA

Elesandro A. Baptista

Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – FEMP

m9803057@unimep.br

Nivaldo L. Coppini

Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – FEMP

ncoppini@unimep.br

Resumo. *O presente trabalho apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados para a verificação do sistema especialista (SE), Tool Optimisation Expert System (TOES), o qual foi desenvolvido com o intuito de auxiliar as tarefas de otimização do processo de usinagem, permitindo que a otimização de operações de torneamento seja realizada interativamente, com intervenção humana, ou automaticamente via rede e/ou Internet, sem intervenção humana e dentro do conceito de fábrica virtual. Para isto, realizou-se a otimização, com auxílio de planilha eletrônica, de 3 peças que permitiram obter cenários de fabricação flexível e em série. Também foram consideradas as propriedades e variáveis envolvidas na otimização de uma operação de torneamento, sem o auxílio do TOES. Em seguida, foram realizados simulações de otimização, com auxílio do TOES, nas quais as variáveis do processo que permitem classificar o sistema produtivo foram alteradas. Assim, pode-se verificar o comportamento do emprego deste SE em diferentes cenários produtivos. Os resultados obtidos permitem concluir que o TOES atende aos objetivos para os quais foi desenvolvido.*

Palavras-chave: *Otimização, Usinagem, Torneamento, Sistema Especialista.*

1. INTRODUÇÃO

A otimização de processos de usinagem é uma meta permanente das indústrias manufatureiras, especialmente nos dias de hoje, em que a globalização requer uma postura mais competitiva. A otimização dos tempos não-produtivos pode ser realizada com o emprego de técnicas gerenciais, como o KANBAM, ou com o uso de novos dispositivos de fixação da peça ou da ferramenta, por exemplo. Já os tempos produtivos podem ser facilmente otimizados quanto aos parâmetros de corte (Baptista, 2000).

Conforme demonstrado por Coppini & Baptista (1998), a otimização da velocidade de corte apresenta vantagens em relação ao avanço e profundidade de usinagem, por ser mais flexível quanto à sua gama de valores possíveis, além de permitir adequar o processo nas

condições econômicas dentro do Intervalo de Máxima Eficiência (IME), que é formado pela velocidade de corte de mínimo custo (V_{cmc}), mínimo custo limite, (V_{cmcLim}), e máxima produção (V_{cmxp}), e por não descartar o emprego de ferramental tecnologicamente mais evoluído, pois, este também pode ser otimizado quanto às condições econômicas do sistema máquina-ferramenta-peça.

Para que esta otimização apresente resultados confiáveis e coerentes com o ambiente produtivo, é necessário que o expoente x e a constante K da equação de vida de Taylor (Ferraresi, 1977), ver "Eq. (01)", sejam determinados em ambiente fabril, utilizando a metodologia proposta por Diniz *et al* (1989), a qual recebeu esforços de pesquisa e adaptações por Coppini *et al* (1995), Coppini *et al* (1997), Coppini & Costa (1995), Ribeiro (1999), Malaquias (1999), e Baptista (2000).

$$T = \frac{K}{V_c^x} \quad (1)$$

Onde: T é a vida da aresta da ferramenta em minutos; V_c é a velocidade de corte em m/min.

Tal metodologia consiste na realização de ensaios de usinagem, utilizado-se o sistema máquina-ferramenta-peça para a determinação do expoente x e da constante K , que permitem calcular o IME. Em seguida, através de uma análise do ambiente produtivo, pode-se escolher a velocidade de corte que será utilizada como referência para a otimização.

O emprego desta metodologia em ambiente fabril representa uma tarefa complexa, que requer a realização de cálculos complexos e análise do sistema produtivo por parte de um especialista em usinagem, o que tem afastado seu uso por parte de engenheiros e processistas. Entretanto, esta tarefa pode ser facilmente realizada com o auxílio de Sistemas Especialistas (SE), que são ferramentas computacionais especialmente desenvolvidas por especialistas, em determinados domínios de conhecimento, para auxiliar na realização de tarefas específicas.

Este fato motivou os autores a elaborarem um SE que possibilita otimizar a V_c dentro do IME e demais restrições do sistema produtivo, que foi batizado de *Tool Optimisation Expert System* (TOES). Para verificar o funcionamento do referido SE, foram realizadas simulações de otimizações, nas quais foram utilizadas informações e dados oriundos de ensaios de usinagem realizados anteriormente, juntamente com informações obtidas no catálogo do fabricante da ferramenta, com auxílio de uma planilha eletrônica, pois, nesta fase de testes visou-se apenas a verificação do sistema. Os resultados das simulações realizadas confirmaram a funcionalidade do SE, qualificando-o para uma próxima etapa de testes, ou seja, a verificação de sua aplicabilidade em ambiente fabril, etapa esta que já foi realizada, mas não será abordada neste trabalho. A seguir é descrito resumidamente o funcionamento do SE, quanto a classificação do cenário produtivo e a escolha da velocidade de corte otimizada, a descrição da otimização realizada com auxílio de planilha eletrônica, da simulação de otimização com o TOES e discussão dos resultados obtidos.

1.1. Como o TOES funciona

A apresentação de todas as características do SE TOES seria muito extensa, o que inviabiliza sua realização em apenas um artigo, juntamente com os ensaios de verificação. Entretanto, as etapas que devem ser realizadas no uso do TOES serão descritas resumidamente a seguir. Informações adicionais sobre o funcionamento do TOES, podem ser obtidas no endereço www.unimep.br/~ncoppini, no item "Integra de dissertações e Teses".

- Passo 1:** Cadastrar no sistema as informações referentes a máquina-ferramenta, ferramenta e do processo de torneamento;
- Passo 2:** Configurar o TOES para que o mesmo possa classificar o sistema produtivo e também escolher a velocidade de corte otimizada;
- Passo 3:** Iniciar a usinagem com a primeira velocidade de corte até que o final de vida da ferramenta seja decretado, por um critério previamente definido;
- Passo 4:** Inserir no TOES a primeira vida da ferramenta, após isto, o SE informará ao usuário o valor da segunda velocidade de corte;
- Passo 5:** Iniciar a usinagem com a segunda velocidade de corte até que o final de vida da ferramenta seja decretado, pelo mesmo critério anterior;
- Passo 6:** Inserir no SE o valor da segunda vida da aresta da ferramenta. Neste momento, o TOES irá classificar o cenário produtivo como produção flexível, ou produção em série. As estratégias de otimização são diferentes para cada cenário. Ao verificar a simulação, a qual é descrita a seguir, ficará evidente qual é a estratégia para cada caso.

Para classificar o cenário produtivo e escolher a velocidade de corte otimizada, o TOES analisa algumas informações, as quais estão descritas na "Tabela 1".

Tabela 1 – Informações utilizadas pelo TOES

Informações que influenciam a escolha do cenário	Informações que influenciam a escolha da V_c
	Tempo de <i>SETUP</i>
Quantidade de peças na programação diária (<i>PG</i>)	Situação de carga da máquina
Tamanho do lote de cada peça	Custo do ferramental
Tamanho do lote formado pela soma de toda a <i>PG</i>	Tempo de troca da ferramenta
As peças da <i>PG</i> utilizam tecnologia de grupo ?	Utiliza ferramenta <i>STANDARD</i> ?
Todas as peças da <i>PG</i> são usinadas com a mesma ferramenta? (Para as operações correspondentes).	Situação do estoque da ferramenta
Os materiais da peças da <i>PG</i> são iguais?	Sistema de custeio
	Política do usuário
	Cenário de fabricação

O modo que estas informações influenciam a escolha da velocidade de corte, foram descritas por Coppini & Baptista (1998) e Baptista (2000).

2. OTIMIZAÇÃO REALIZADA COM APOIO DE PLANILHA ELETRÔNICA

Para verificar a funcionalidade das rotinas e regras implementadas no SE, foram elaboradas algumas peças para o levantamento de dados a serem inseridos no TOES, o que permitiu a comparação entre os resultados obtidos na otimização pelo método manual e na simulação realizada pelo SE. As informações sobre equipamentos, materiais e peças utilizadas, juntamente com a configuração dos lotes de peças e resultados da otimização realizada com auxílio de planilha eletrônica são descritos a seguir.

2.1. Materiais e equipamentos utilizados

Todas as informações do ensaio, no que se refere aos materiais, equipamentos e peças estão descritos na "Tabela 2".

Tabela 2 – Materiais e equipamentos utilizados

Máquina-ferramenta	tipo	Torno horizontal a comando numérico - CNC
	fabricante	Indústrias Romi
	modelo	Centur 30 RV
	custo/hora	R\$ 13,16
Ferramenta	inserto	CNMG 120408-PM
	classe	GC 4035
	fabricante	Sandvik
	suporte	PCLN 20x20
	fabricante	Sandvik
Materiais utilizados	Peça VTF_P_1	SAE 4340 (dureza de 305 HB)
	Peça VTF_P_2	ASTM A353 (dureza de 200 HB)
	Peça VTF_P_3	SAE 1045 (dureza de 150 HB)
Informações adicionais	Salário homem	R\$ 15,00
	Taxa anual juros	35% (em vigor na época do ensaio)

2.2. Peças utilizadas

As peças utilizadas neste trabalho foram especialmente desenvolvidas para esta finalidade, sendo que a peça VTF_P_1 foi usinada no laboratório de fabricação da Universidade e conseqüentemente, seus dados apresentam maior exatidão. Já as peças VTF_P_2 e VTF_P_3, tiveram seus dados obtidos no catálogo do fabricante da ferramenta, a partir dos quais, foram calculadas e estimadas as vidas das arestas de corte. A "Fig. 1" apresenta o formato geométrico das referidas peças, que possuem comprimento variável, e a "Tabela 3" descreve dados complementares sobre as mesmas.

Tabela 3 – Dados das peças

	Peças		
	VTF_P_1	VTF_P_2	VTF_P_3
Primeira velocidade de corte V_{c1} (m/min)	175	175	175
Segunda velocidade de corte V_{c2} (m/min)	210	210	210
Tempo efetivo de corte para V_{c1} (min)	1,50	2,14	1,71
Tempo efetivo de corte para V_{c2} (min)	1,25	1,79	1,43
Vida da aresta em tempo para V_{c1} (min)	23,96	53,13	334
Vida da aresta em tempo para V_{c2} (min)	11,23	24,71	155,3
Valor do expoente x	4,16	4,2	4,2
Valor da constante K	5,02E+10	1,4E+11	8,8E+11
Tempo de troca da aresta de corte (min)	0,58	0,58	0,58
Comprimento de corte L (mm)	46	70	65
Diâmetro final d (mm)	26,8	28,8	32,8
Profundidade de usinagem (mm)	1	1	1
Avanço de usinagem (mm/volta)	0,25	0,25	0,25

2.3. Lotes de peças

Foram formulados duas diferentes situações para a verificação do SE, sendo que na primeira foi considerado a usinagem de um lote grande, 100 peças - produção em série, da peça VTF_P_1. Na segunda situação, foi composta uma programação diária constituída pelas três peças, VTF_P_1, VTF_P_2 e VTF_P_3, variando-se a quantidade e a posição das peças durante a usinagem, produção flexível, o que resultou na programação descrita na "Tabela 4".

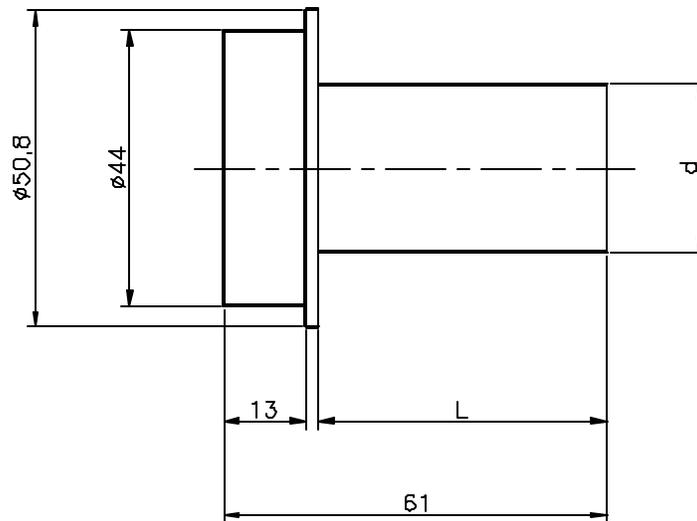


Figura 1 – Desenho das Peças

Tabela 4 – Programação diária para cenário flexível

Peça	Quantidade
VTF_P_1	4
VTF_P_2	2
VTF_P_3	15
VTF_P_1	8
VTF_P_2	12

2.4. Resultados obtidos pelo método manual

Para o cenário de produção em série, no qual foi usinada a peça VTF_P_1, obteve-se os seguintes resultados: $V_{cmc} = 176$ m/min, $V_{cmLim} = 179$ m/min, e $V_{cmxp} = 325$ m/min. Lembrando que pelo método manual, só é possível a determinação do IME, já que a escolha da V_c otimizada seria realizada pelo especialista em usinagem. Os resultados obtidos para o cenário de fabricação flexível estão descritos na "Tabela 5".

Tabela 5 – Resultados para fabricação flexível, com auxílio de planilha eletrônica.

Peça	Número de peças	V_{cmLim} (m/min)	Troca da Aresta
VTF_P_1	4	179	
VTF_P_2	2	216	
VTF_P_3	15	334	X
VTF_P_1	8	179	
VTF_P_2	7	216	X
VTF_P_2	5	216	

Como pode ser observado na "Tabela 5", o número total de arestas consumidas para a usinagem desta programação foi igual a três, pois, iniciou-se com a primeira aresta e ao término da usinagem da peça VTF_P_3 foi realizada uma troca (X na Tabela). Com a segunda aresta usinou-se 8 peças VTF_P_1 e 7 peças VTF_P_2, sendo que neste momento, foi realizada outra troca. A terceira aresta usinou as 5 peças restantes. Lembrando, que no momento em que a soma dos tempos efetivos de corte de cada peça usinada, resultar em um valor maior que a vida da aresta, é decretada o fim de vida da mesma.

3. SIMULAÇÃO DE OTIMIZAÇÃO REALIZADA COM O SE

Iniciou-se a simulação no TOES configurando-o de acordo com as características do sistema produtivo, em seguida, foi introduzido no sistema as informações da peça VTF_P_1, para o cenário de fabricação em série.

Realizando-se alterações em algumas informações previamente configuradas, pode-se verificar o comportamento do TOES na escolha da V_c otimizada. Em seguida, a programação diária, composta pelas 3 referidas peças, foi introduzida no sistema.

3.1. Configuração do SE

As informações previamente configuradas no TOES, que são utilizadas na classificação do sistema produtivo e escolha da velocidade de corte, estão organizadas na "Tabela 6".

Tabela 6 – Informações configuradas no TOES

Tempo de SETUP - t_s (min)	Rápido quando $t_s \in [3$
	Normal quando $3 < t_s \in [15$
	Lento quando $t_s \in [15$
Tempo de troca da aresta da ferramenta - t_{ff} (min)	Grande quando $t_{ff} \in [2$
	Médio quando $1 < t_{ff} \in [2$
	Baixo quando $t_{ff} \in [1$
Custo do ferramental - PF (R\$)	Muito caro quando $PF \in [R\$ 8,00$
	Caro quando $R\$ 4,00 < PF \in [R\$ 8,00$
	Baixo preço quando $PF \in [R\$ 4,00$
Política do usuário - PU	arrojado
Qde de ferramentas em estoque	100 (situação normal)
Sistema de custeio	rateio
Situação de carga da máquina	Gargalo
Ferramenta padrão (prateleira)	Sim
Cenário	Produção em série

3.2. Alterações do cenário

Algumas informações configuradas no TOES foram alteradas para que o comportamento do programa, na otimização de processos de usinagem, fosse analisado. Alterou-se a política do usuário (PU), o número de ferramentas em estoque (QFE), o custo do ferramental (CF), a situação de carga da máquina (CM), e o tipo de ferramenta (TF), que ora fora de prateleira (standard) e ora fora especial. Foram implementadas um total de 10 alterações que estão descritas na "Tabela 7".

4. RESULTADOS

A simulação realizada para verificação do cenário de produção em série correspondeu ao esperado como é possível de se observar na "Tabela 8". As velocidades V_{cmcLim} e V_{cmxp} , tiveram seus valores calculados com exatidão, entretanto, a V_{cmc} apresentou um erro de 0,01% em relação ao cálculo realizado pela planilha eletrônica. Este erro porém não afeta o funcionamento e uso do TOES por ser desprezível neste tipo de ensaio. Já a velocidade de corte otimizada escolhida pelo TOES não apresentou divergências com o que foi definido na regra residente do sistema.

Tabela 7 – Alterações implementadas na configuração do sistema

Alteração	PU	QFE	CF	CM	TF
1	Arrojado	Normal	Muito Caro	Gargalo	Standard
2	Arrojado	Normal	Muito Caro	Gargalo	Especial
3	Moderado	Normal	Muito Caro	Gargalo	Especial
4	Conservador	Normal	Muito Caro	Gargalo	Especial
5	Arrojado	crítica	Muito Caro	Gargalo	Standard
6	Moderado	crítica	Muito Caro	Gargalo	Standard
7	Conservador	crítica	Muito Caro	Gargalo	Standard
8	Arrojado	crítica	Muito Caro	Normal	Standard
9	Moderado	crítica	Baixo Preço	Normal	Standard
10	Conservador	crítica	Baixo Preço	Normal	Standard

O cenário de fabricação flexível, quando simulado, apresentou os mesmos resultados calculados previamente com a planilha eletrônica, ou seja, previu o consumo de 3 arestas na usinagem de toda a programação, e o momento de troca de cada aresta indicado também foi o mesmo.

Tabela 8 – Resultados para o cenário de fabricação em série

Ensaio	V_{cmc}	V_{cmLim}	V_{cmxp}	V_c escolhida
1	175	179	325	V_{cmxp}
2	175	179	325	V_{cmxp}
3	175	179	325	V_{cmLim}
4	175	179	325	V_{cmLim}
5	175	179	325	V_{cmxp}
6	175	179	325	V_{cmLim}
7	175	179	325	V_{cmLim}
8	175	179	325	V_{cmxp}
9	175	179	325	V_{cmLim}
10	175	179	325	V_{cmc}

5. CONCLUSÕES

Com a análise dos resultados obtidos nas simulações realizadas, as quais objetivaram a verificação da funcionalidade do TOES, pode-se concluir que:

- As informações utilizadas para a configuração do sistema foram adequadas, pois, o sistema foi capaz de classificar o sistema produtivo e de escolher a velocidade de corte otimizada;
- O TOES permite o armazenamento de informações, em seu banco de dados, sobre o processo produtivo especificamente, sobre a máquina-ferramenta, ferramenta e do próprio processo de usinagem;
- A metodologia utilizada para a otimização do processo de torneamento, especificamente da velocidade de corte, foi adequada e permite a determinação do IME em ambiente fabril;
- Os resultados obtidos na verificação do TOES permite dar prosseguimento a validação do sistema, com a realização de testes em ambiente fabril.

Agradecimentos

À Sandvik do Brasil, pelo apoio ao projeto e a FAPESP.

REFERÊNCIAS

- Baptista, E. A., 2000, **Desenvolvimento de um sistema especialista para a otimização do processo de usinagem**. Santa Bárbara d'Oeste: FEMP, UNIMEP. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, 194p.
- Coppini, N. L., Baptista, E. A., 1998, Alternativas de otimização dos parâmetros de corte para cenários de fabricação em usinagem. In.: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 18, Niterói, **Anais...**
- Coppini, N. L., Bernardo, V., Marcondes, F. C., 1995, Determinação de condições otimizadas para usinagem dentro do conceito de fabricação flexível. In.: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 13, Belo Horizonte, **Anais...** São Paulo.
- Coppini, N. L., Costa, D. D., 1995, Módulo Especialista para escolha automática de parâmetros de usinagem. In.: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 13, Belo Horizonte, **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas.
- Coppini, N. L., Ferreira, J. R., Miranda, G. W. A., 1997, Procedimento para otimização das condições de usinagem para aplicação em chão de fábrica. In.: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 17, Gramado, **Anais...**
- Ferraresi, D. **Fundamentos da Usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977, 751p.
- Diniz, A, E., Coppini, N. L., Vilela, R. C., Rodrigues, A, C. S., 1989, Otimização das condições de usinagem em células. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.281, p. 48-54, jun.
- Malaquias, J. C. **Otimização e gerenciamento em usinagem para cenário de fabricação flexível**, 1999, Santa Bárbara d'Oeste: FEMP, UNIMEP. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, 115p.
- Ribeiro, M. V. **Otimização das condições de corte assistida por computador durante o desenvolvimento do processo**, 1999, Campinas: FEM, UNICAMP. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. 143p.

MACHINING PROCESS OPTIMIZATION AIDED BY AN EXPERT SYSTEM

Abstract. *The optimisation of machining processes has received special attention, especially nowadays, where the world globalisation scenary asks for competitiveness. An expert system called TOES – Tool Optimisation Expert System, was developed to provide a differential competitive in machining processes. This expert system enables the cutting speed optimisation in the shop floor, respecting the productive environment with all the constraints involved in it, and the machine-tool-part system. This work has the goal to present the simulation tests, which were conducted to verify the system functionality, and the results allow to conclude that the system met the initial requirements, for which it was developed.*

Keywords: *Machining, Optimisation, Turning, Expert System.*