

ADAPTAÇÃO DO MODELO ECONÔMICO DO PROCESSO DE USINAGEM ÀS INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS

Flávio Moreira de Cerqueira, flaviomcerqueira@yahoo.com.br

Durval Uchôas Braga, durval@ufsj.edu.br¹

Frederico Ozanan Neves, fred@ufsj.edu.br

¹Fundação Universidade Federal de São João del Rei, Processos de Fabricação / DEMEC / UFSJ, Departamento de Engenharia Mecânica, Praça Frei Orlando, 170 – Centro, 36307-352 São João del Rei – MG, TEL. 032 3379 2595 - R 2605

Resumo: *O propósito deste trabalho é demonstrar as tendências do modelo econômico do processo de usinagem em uso, mediante condições e parâmetros de usinagem atuais, bem como, propor a utilização do software MEIA como solução para algumas restrições do processo.*

Palavras-chave: *Modelo; Intervalo Máxima Eficiência; Usinagem; Inovação Tecnológica..*

1. INTRODUÇÃO

A gestão econômica do processo de usinagem, quando consideradas as condições de mínimo custo e de máxima produção, foi desenvolvida na época em que a produção de bens normalmente era realizada com máquinas automatizadas e com alto tempo de preparação (*setup*) para usinagem de grandes lotes de peças.

Para este cenário, as condições de usinagem visando à máxima produção na fabricação se baseavam essencialmente no fato de que, com o aumento da velocidade de corte e/ou do avanço da ferramenta, o tempo de uso da máquina diminui abaixando, conseqüentemente, a parte relativa ao custo de fabricação devido à máquina e diminuindo simultaneamente a vida da ferramenta.

Atualmente os paradigmas da manufatura se alteraram significativamente. Os lotes de peças são cada vez menores, o tempo de preparação das máquinas tende a zero e as máquinas modernas possibilitam um tempo de troca da ferramenta bastante baixo como é o caso de centros de usinagem em que a substituição de uma ferramenta é feita de forma automática (Diniz et al. 2001). Na 1), em destaque, observa-se um espaço específico na máquina para que seja feito o *setup* da ferramenta durante o processo efetivo de usinagem, evitando assim, aumento do tempo e do custo de produção caso a máquina seja parada.



Figura 1. Sistema de *setup* de ferramenta em separado no Centro de Usinagem. (ROMI PH400, 2004)

Aperfeiçoar as condições de produção sempre foi um dos objetivos básicos da indústria manufatureira, sendo um fator determinante da evolução das máquinas-ferramenta e das ferramentas de corte. No caso específico da indústria metal-mecânica significa reduzir os tempos efetivos de usinagem de peças e de montagem dos sistemas produtivos como um todo (Vilella, 1988).

Segundo Baptista (2000), um processo de fabricação pode ser aperfeiçoado considerando a redução dos tempos de fila, movimentação e outros tempos passivos não produtivos que envolvam tarefas humanas, ou, dos tempos produtivos quando se analisa o processo de usinagem.

Andrade (1994) afirma que, no processo de usinagem podem-se aperfeiçoar os parâmetros de corte procurando-se trabalhar com uma velocidade de corte (v_c) dentro do Intervalo de Máxima Eficiência (IME) que têm como extremos as velocidades de Máxima Produção (v_{cmax}) e de Mínimo Custo (v_{co}). Porém, torna-se necessário analisar as implicações do avanço tecnológico neste Intervalo de Máxima Eficiência para o processo de usinagem convencional.

A análise se justifica, pois, para o cenário atual, quando o tempo de troca da ferramenta tende para zero a velocidade de Máxima Produção tende para infinito, haja vista que no modelo em uso considera-se um tempo significativo para a troca da ferramenta que envolve a afiação, o ajuste e, também, a troca da mesma.

Para o caso da velocidade de corte de mínimo custo o modelo procura preservar a ferramenta, que é cara, com um mínimo de troca e reafiações, ou seja, trabalha-se com velocidade de corte baixa, inverso da condição real de máxima produção em que é usada a máxima velocidade segura para o processo. Considerando este cenário, não se pode evitar que ocorra um aumento significativo do intervalo entre tais tempos inviabilizando economicamente o processo de produção. (Diniz et al., 2001).

No passado a automação era precária, os lotes de peças eram grandes, os sistemas produtivos eram rígidos e os tempos de preparação significativos. Porém, atualmente encontra-se um cenário no qual o processo é racionado no que diz respeito ao ferramental, substituindo-se a ferramenta de corte por outra tecnologicamente mais evoluída, e na evolução tecnológica de máquinas e processos.

Aliado à necessidade de maior competitividade de um mercado globalizado, o tempo de produção reduziu significativamente na fabricação de pequenos lotes de peças.

Diniz et al., (2001), afirmam que, dentre outras razões de ordem técnica, quando o tamanho do lote, uma vez que o mesmo tem diminuído bastante, não é suficiente para consumir mais de uma aresta da ferramenta, ou seja, não existe troca da ferramenta, a utilização da Equação de Taylor não se aplica e o modelo matemático proposto carece de uma abordagem especial.

Em consideração ao exposto acima, optou-se por desenvolver esta pesquisa visando conhecer possíveis tendências para o modelo econômico do processo de torneamento frente ao cenário de desenvolvimento tecnológico atual.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Conceitos de modelos matemáticos

Com as pesquisas realizadas sobre depuração de modelos, observou-se que os mesmos desempenham um papel de crescente importância em diversas áreas do conhecimento, inclusive nos processos de fabricação.

Segundo Torres (2001), o processo de análise de sistemas reais através de modelos baseia-se na metodologia da simulação, sendo a modelagem o seu cerne. Paralelamente a essa capacidade de desenvolver modelos, a prática de simulação requer também capacidades de gerenciamento de projeto e de organização de trabalho assim como de interação com pessoas de várias áreas de atuação.

É importante salientar a existência dos *modelos empíricos*, os quais são obtidos pelo uso de técnicas estatísticas tais como regressão múltipla, regressão logística, etc. Também são expressos analiticamente, mas não representam relações de causa e efeito. Eles são úteis para diagnóstico e controle, mas não para a compreensão dos fenômenos.

Ainda, segundo Torres (2001), a simulação faz parte do conjunto de técnicas da Pesquisa Operacional (PO) usadas para resolver problemas complexos e utiliza uma abordagem estruturada e precisa que caracteriza as ciências em geral.

Cheng (1985) apresenta a simulação como uma ferramenta ideal para modelar Sistemas de Manufatura Flexíveis (FMS), pois permite a modelagem do sistema de manufatura e o projeto e avaliação das várias configurações possíveis. O modelo pode fornecer subsídios para auxiliar na escolha das ferramentas e dos equipamentos; analisar os sistemas de manuseio de materiais; analisar os efeitos dos ajustes nos dispositivos de materiais e pode, também, estabelecer uma configuração para o *layout*, de tal forma que o fluxo de materiais seja plenamente satisfeito.

Para a avaliação e adaptação do modelo econômico em uso às novas tendências de produção, serão desenvolvidos estudos visando-se analisar, além das várias propostas já citadas na introdução deste projeto de pesquisa, também, aquelas disponíveis na literatura.

2.2 Conceituação de processo de usinagem por torneamento

A operação de usinagem conhecida como torneamento consiste na remoção de material de uma peça, a qual gira em torno do eixo principal de rotação da máquina-ferramenta, por uma ferramenta que se desloca em relação ao referido eixo. Esta operação é destinada a obtenção de superfícies de revolução. (Ferraresi, 1988; Baptista 2000)

Segundo Diniz et al., (2001), as principais propriedades relacionadas aos movimentos de usinagem envolvem a velocidade de corte (v_c), a velocidade de avanço (v_f) e o tempo efetivo de corte (t_c).

2.3 Apresentação do modelo econômico de usinagem

Com relação a um breve histórico, Ferraresi (1988), cita que os primeiros estudos econômicos sobre a usinagem dos metais foram realizados por Taylor nos EUA e Schesinger na Alemanha. Seguem-se os trabalhos de Leyensetter, o qual

publicou no ano de 1933 na Alemanha um artigo intitulado “A velocidade econômica de corte”. Nessa publicação o autor afirma que “a velocidade econômica de corte é aquela na qual é retirado o máximo volume de cavaco, num determinado tempo de usinagem”. Tal definição foi posteriormente abandonada, pois se refere à velocidade de corte para a produção máxima e não para um custo mínimo.

Em seguida foram realizados vários trabalhos por diferentes pesquisadores definindo-se a velocidade econômica de corte como aquela, na qual o custo de fabricação numa indústria é mínimo (Ferraresi, 1988).

Como análise da complexidade que envolvia tal estudo no passado, pode-se observar que se a velocidade utilizada for imediatamente superior à velocidade crítica, os desgastes da ferramenta serão pequenos, com conseqüente vida longa da ferramenta e pequenos custos com a mesma. Porém, o tempo de corte por peça será elevado (devida à baixa velocidade), com conseqüente baixa de produção horária e aumento de custos com a utilização de máquina e operador. Há que se considerar neste caso que a ferramenta será substituída poucas vezes, o que diminui os tempos passivos devido à troca da mesma.

Por outro lado, se a velocidade de corte utilizada for muito superior à velocidade crítica, os desgastes da ferramenta vão ser grandes, reduz a vida da ferramenta aumentando seu custo. Ainda, o tempo de corte será reduzido com menor utilização da máquina e do operador, evidenciando custos menores apesar do aumento na freqüência de parada de máquina.

Existe, portanto, um intervalo de trabalho recomendado para a usinagem como sendo o Intervalo de Máxima Eficiência (IME).

Primeiramente, consideraremos a análise para o tempo de produção por peça. Neste caso, o modelo econômico em uso leva em consideração tempos de produção independentes da velocidade de corte, como t_s (tempo secundário), t_a (tempo de aproximação e afastamento) e t_p (tempo de preparo da máquina) e, também, tempos dependentes da velocidade de corte, como t_{ft} (tempo de troca da ferramenta) e t_{fa} (tempo de afiação da ferramenta). Portanto, podem-se relacionar tais variáveis conforme mostrado nas Eq. (1).

$$t_t = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot v_c} + \left[t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} \right] + \left[\frac{l_f \cdot \pi \cdot d \cdot v_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} - \frac{1}{Z} \right] \cdot (t_{ft} + t_{fa}) \quad (1)$$

Utilizando-se dos conceitos de máximos e mínimos de uma função matemática, pode-se obter a velocidade de máxima produção (v_{cmxp}), conforme Eq.(2). Para a condição econômica de produção o estudo não é diferente e pode-se obter a velocidade de mínimo custo (v_{co}) conforme mostrados na Eq.(3) e Fig. (2).

$$v_{cmxp} = x \sqrt{\frac{K}{(x-1) \cdot (t_{ft} + t_{fa})}} \quad (2) \quad v_{co} = x \sqrt{\frac{C_2 \cdot K}{60 \cdot (x-1) \cdot C_3}} \quad (3)$$

O Intervalo de Máxima Eficiência (IME), portanto, é definido entre o limite das Velocidades de Corte de Mínimo Custo (v_{co}) e de Máxima Produção (v_{cmxp}) conforme mostrado na 2.3).

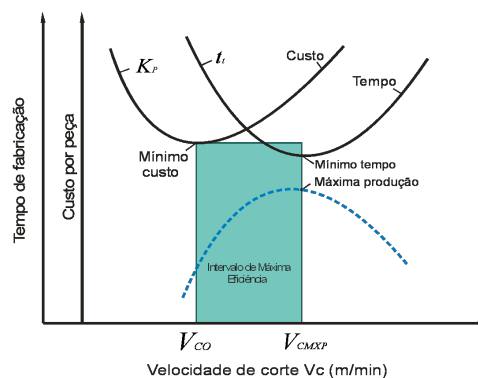


Figura 2. Intervalo de Máxima Eficiência, adaptado de Diniz et al., (2001)

Diniz et al., (2001) afirmam que, para a maioria dos sistemas produtivos é fácil se ter uma idéia do valor da Velocidade de Corte de Máxima Produção, já que estas só dependem das constantes x e k de Taylor e do tempo de troca da ferramenta, mas não é tão fácil saber o valor da Velocidade de Corte de Mínimo Custo, pois esta depende de fatores econômicos que estão freqüentemente variando e, além disso, são de determinação pouco precisa.

Nesses sistemas produtivos recomenda-se determinar o valor da Velocidade de Corte de Máxima Produção e sempre trabalhar com velocidade de corte pouco abaixo dela. Dessa forma, é mais provável que tal velocidade pertença ao IME, pois a Velocidade de Corte de Máxima Produção é sempre maior que a Velocidade de Corte de Mínimo Custo.

3. METODOLOGIA

A metodologia de trabalho utilizada para o desenvolvimento da pesquisa compreende os seguintes procedimentos:

- Estudar o modelo em uso e dele identificar qual, ou quais, parâmetros não mais representa significativamente o processo;
- Pesquisar no cenário de produção metal-mecânica se existe possíveis parâmetros que não fizeram parte do modelo em uso, ou que sejam de processos que sofreram inovações tecnológicas e que poderão contribuir com esta proposta;
- Utilizar dados experimentais de pesquisas existentes em usinagem que possam validar uma possível proposta de modelo. Estes são importantes, pois permitem o uso de um banco de dados que proporcione condições para verificar uma possível falta de uniformidade de procedimentos metodológicos utilizados;
- Avaliar a possibilidade de uma nova relação de dependência entre alguns dos parâmetros atuais de influência para o processo de fabricação e,
- Por fim, analisar os resultados quando aplicados os dados coletados ao modelo em uso, comparando seus resultados com aqueles a serem obtidos.

4. COLETA DE DADOS E ANÁLISE DO MODELO NAS CONDIÇÕES ATUAIS

Para o desenvolvimento das simulações com o modelo econômico em uso foram comparadas duas situações. A primeira situação corresponde ao cenário produtivo do modelo econômico em uso que se leva em consideração o tempo de troca da ferramenta (t_{ft}). A segunda situação, correspondente ao cenário atual, globalizado e competitivo relacionando baixos tempos de produção com a utilização de máquinas automatizadas com valores mínimos para o tempo de troca das ferramentas (t_{ft}), inclusive, se aproximando de zero.

Para a simulação do processo de usinagem e verificação das tendências do modelo foram utilizados o Aço SAE 4340, (33,4 HRC) com diâmetro (d) igual a 50 mm e um comprimento de avanço (l_f) igual a 200 mm. A profundidade de corte (a_p) será de 3 mm e o lote de peças terá 800 peças. O salário homem (S_h) é de R\$15/hora

As simulações serão realizadas levando-se em consideração dois cenários fornecidos pela Indústria ROMI. O primeiro com tendências para convergência para um ponto de velocidade de máxima produção. Neste caso, a máquina é o torno universal Romi Tormax 30A com rotação de 1800 rpm e potência 7,5 CV. O avanço da ferramenta TPUN160308 será f igual 0,4 mm/rotação. O salário máquina é de S_m R\$10,00/hora e o custo de troca da ferramenta, K_{ft} é de R\$10,20/hora.

Os tempos de troca e de reafiação da ferramenta serão (t_{ft}) igual a 4,2 min e (t_{ra}) igual a 2 min respectivamente. Outros tempos serão os tempos de aproximação, recuo e preparação iguais a (t_a) igual a 0,21 min, (t_s) igual a 0,36 min e (t_p) igual a 25 min respectivamente.

Para o segundo cenário, próximo da inovação tecnológica, a máquina é um Centro de Torneamento CNC ROMI E320 com rotação máxima de 4500 rpm e potência de 25 CV. O avanço da ferramenta CNMG120408-OPM será f igual 0,3 mm/rotação. O salário máquina é de R\$20,00/hora e o custo de troca da ferramenta (K_{ft}) é de R\$12,80/hora.

Neste caso, o tempo de troca da ferramenta será (t_{ft}) igual a 0,3 seg. Outros tempos serão os tempos de aproximação, recuo e preparação iguais a (t_a) igual a 0,1 seg, (t_s) igual a 0,12 min e (t_p) igual a 90 min respectivamente.

4.1 Obtenção da Velocidade de Corte de Mínimo Custo (v_{co}) e de Máxima Produção (v_{cmxp})

Primeiramente, utilizando o software “MAPLE, foi avaliado o comportamento das curvas de mínimo custo para as duas situações citadas anteriormente. Na 4.1 (A) estão representadas as tendências para as curvas de custos relativos à produção para ambos cenários. Observa-se que deverá existir uma velocidade, denominada de v_{colim} que é superior ao extremo inferior do então chamado IME e que corresponde ao mínimo do primeiro cenário.

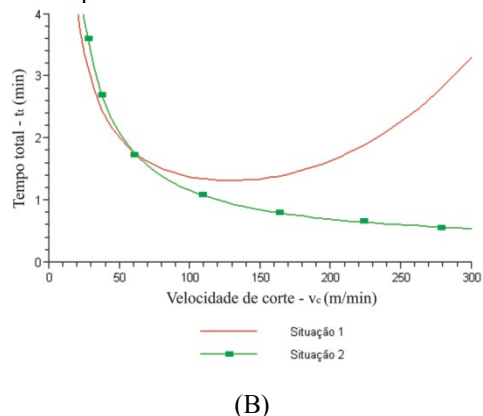
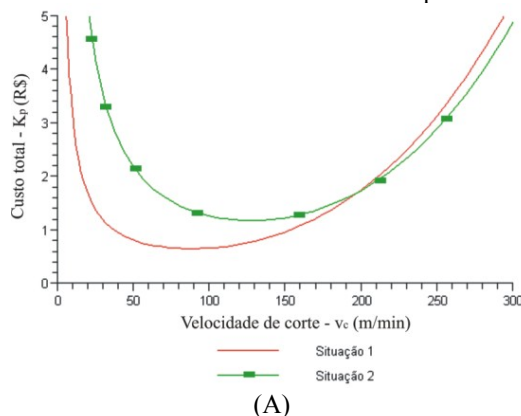


Figura 3. Custo e Tempo total de produção por peça utilizando ambos cenários

Para a análise do primeiro cenário o tempo de produção é superior confirmando a validade do modelo econômico de usinagem em uso, pois a curva de tempo total de produção por peça apresenta-se como uma função provida de inflexão com um ponto de mínimo, o qual representa o mínimo tempo de produção por peça e é fundamental para a obtenção da Velocidade de Corte de Máxima Produção (v_{cmxp}). O IME encontrado foi limitado pelas velocidades $v_{co}=89,07$ m/min e $v_{cmxp}=141,35$ m/min.

Ao se analisar o cenário dois, cujos tempos de produção são baixos e t_R é próximo de zero, observa-se que existe a tendência da curva de tempo total de produção por peça (t_t) se tornar uma hipérbole, Fig. (3) (B) e como resultado se obtém a existência de um tempo de produção mínimo podendo estar limitado apenas por velocidades de corte restritas pela capacidade de projeto dos elementos que compõem o conjunto ferramenta, peça e principalmente a máquina, como a rigidez, rotação máxima etc.

5. ANÁLISE E DISCUSSÕES DA ADAPTAÇÃO DO MODELO ECONÔMICO DE USINAGEM AO CENÁRIO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO ATUAL

Considerando as tendências observadas anteriormente, conclui-se que determinar o menor tempo de produção que, indiretamente, indicaria a possível velocidade de máxima produção para situações em que o tempo de troca da ferramenta (t_R) é muito pequeno, irá exigir do pesquisador a adoção de um, ou mais, critérios de restrições para o processo que delimitem a variação do referido tempo de produção com relação à velocidade de corte que, nesta fase, denominaremos velocidade de corte de máxima produção limite ($v_{cmxplim}$).

Como primeira restrição, pode-se sugerir um limite máximo de velocidade correspondente à 80% da potência do motor da máquina obtido pela Eq. (4).

$$v_{cmxplim} = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot 0,80 \cdot P_{motor}}{K_s \cdot f \cdot a_p} \quad (4)$$

Como procedimento adotado na busca destas velocidades desenvolveu-se um programa em Borland Delphi 6 denominado MEIA- Maximum Efficiency Interval Adaptation, cujas telas de apresentação estão dispostas na 5 e os resultados para o IME convencional na Fig. (5) A e IME para condição atual na Fig. (5) B.

Para a situação 1, verifica-se que através do MEIA obteve-se uma v_{cmxp} de 141,35 m/min correspondendo a um tempo de produção de 1,33 minutos por peça e uma v_{co} de 89,07 m/min correspondendo a um custo de produção por peça de R\$0,70. Porém, para a situação 2 em estudo observa-se que através do MEIA obteve-se uma $v_{cmxplim}$ de 401,57 m/min, representando um tempo de produção por peça de 30 segundos e uma v_{colim} de 115,22 m/min, representando um custo de R\$ 0,78. Dos resultados acima se observa que trabalhar com a $v_{cmxplim}$, foi possível obter uma redução de 62,41% no tempo total de produção por peça.

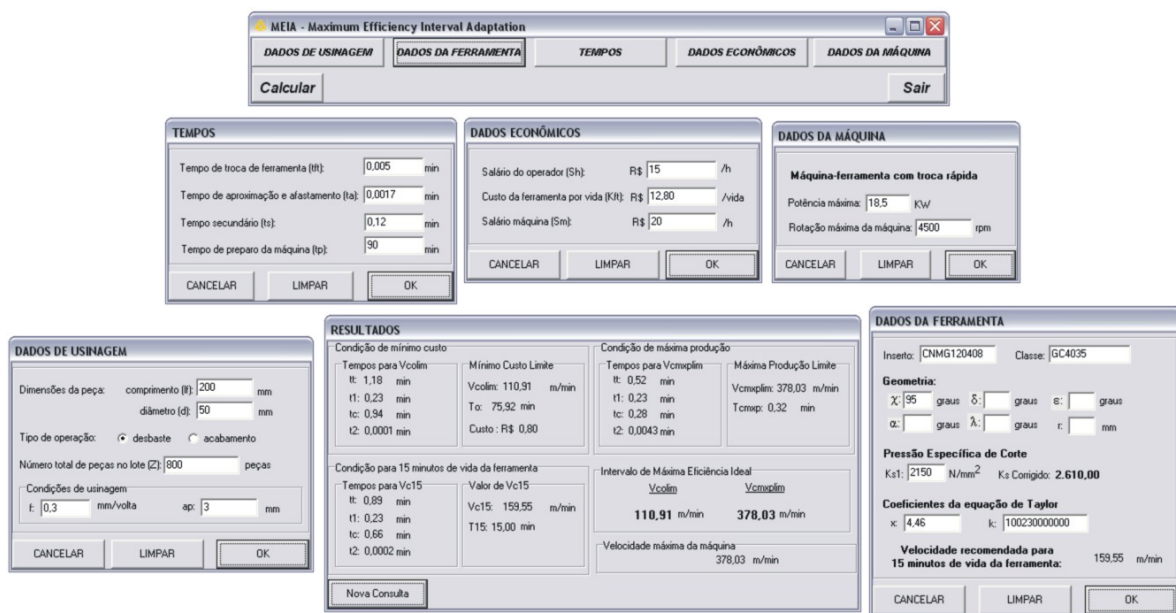


Figura 4. Programa MEIA, desenvolvido para obtenção do IME ideal de trabalho.

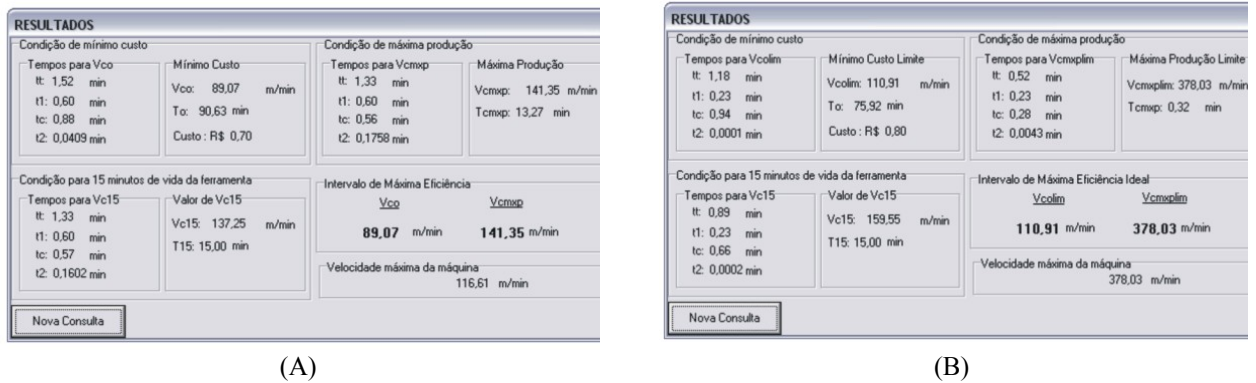


Figura 5. Intervalo ideal de máxima eficiência, (a) situação (1), (b) situação (2)

6. CONCLUSÃO

Considerando os dados coletados, de uma série de seleções possíveis pesquisadas por ocasião da fase de revisão bibliográfica, para a análise do modelo econômico de usinagem, pôde-se concluir que:

- Os fatores econômicos com relação ao custo de produção não afetaram o modelo existente para o cálculo do intervalo de máxima eficiência IME;
- A velocidade de mínimo custo se mostrou superior àquela obtida do cenário convencional o que demonstra, inclusive, maior produção mesmo que o custo da ferramenta seja significativo;
- Deve-se usar a velocidade de corte de mínimo custo limite em situações onde a velocidade de máxima produção seja proibitiva por restrições do processo;
- Independente do procedimento de gestão adotado, sempre se deve conhecer as principais restrições do sistema produtivo como limite de contorno para as inovações propostas.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio dos responsáveis do CNPq no programa PIBIC/UFSJ e do IFM pela realização e divulgação da pesquisa e à FAPEMIG o apoio recebido.

8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Andrade, M. M. . *Introdução À Metodologia Do Trabalho Científico*. São Paulo: Editora Atlas. 1994.
- Banks, J; Carson Ii, J. S. *Discrete-Event System Simulation*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984.
- Baptista, E. A. *Desenvolvimento De Um Sistema Especialista Para A Otimização Do Processo De Usinagem*. Santa Bárbara D'oeste: Femp, Unimep, 2000. 194 P. Dissertação (Mestrado) – Faculdade De Engenharia Mecânica E De Produção, Universidade Metodista De Piracicaba, 2000.
- Cheng, T.E. *Simulation Of Flexible Manufacturing Systems*. Simulation, Vol. 6, No. 45, P. 299-302; Dez. 1985.
- Diniz, A. E.; Marcondes, F. C. E Coppini, N. L. .*Tecnologia Da Usinagem Dos Materiais*. 4ed. São Paulo: Artiliber Editora, 2001.
- Ferraresi, D. *Fundamentos Da Usinagem Dos Metais*. 7ª Reimpressão. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 1988.
- Torres, I., 2001, *Integração De Ferramentas Computacionais Aplicadas Ao Projeto E Desenvolvimento De Arranjo Físico De Instalações Industriais*. Universidade Federal De São Carlos, 2001. Dissertação (Mestrado) – Departamento De Engenharia De Produção.
- Vilella, R. C. *Metodologia Prática Visando A Otimização Das Condições De Usinagem Em Células De Fabricação*. Tese (Mestrado) – Departamento De Engenharia De Fabricação, Universidade Estadual De Campinas, Campinas, 1988.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do seu trabalho.