

# AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE EM TORNEAMENTO

**Filipe Molinar Machado**

Universidade Regional Integrada (URI). Engenharia Industrial Mecânica (EIM), Caixa Postal 203, CEP 98802-470, Santo Ângelo, RS, e-mail: [fmacmec@san.uri.br](mailto:fmacmec@san.uri.br).

**André João de Souza**

Universidade Regional Integrada (URI). Engenharia Industrial Mecânica (EIM), Caixa Postal 203, CEP 98802-470, Santo Ângelo, RS, e-mail: [ajsouza@san.uri.br](mailto:ajsouza@san.uri.br).

**Resumo.** *A velocidade de desenvolvimento de novos métodos de fabricação e a necessidade de aumentar a capacidade de produção e reduzir custos com o fim de alcançar competitividade, força as empresas a direcionar seus focos em não apenas diminuir o custo do produto final, mas em reduzi-lo em cada etapa do processo. Isto é feito através da análise de vários pontos inerentes em que possam ser aplicados estudos de otimização dos parâmetros utilizados. Assim, e considerando a usinagem dos metais, um ponto a ser considerado na otimização é o consumo de energia que diferentes tipos de parâmetros são utilizados. Em muitos casos, a energia gasta durante o processo é considerada dentro de um consumo médio da máquina-ferramenta e posta como um custo variável diretamente proporcional às quantidades produzidas. Porém, esses custos estão divididos em duas partes: uma fixa, relacionada à potência, e outra variável, devido às tarifas diferenciais, de acordo p.ex. com o montante do consumo. Dessa forma, o trabalho apresenta um critério de otimização baseado na máxima taxa de produção com mínimo custo por componente, através de uma aproximação envolvendo análises numéricas a partir de restrições inerentes ao sistema máquina-ferramenta. Com isso, um estudo numérico analisa o desenvolvimento das estratégias apresentadas a fim de mostrar os benefícios econômicos do uso desta otimização.*

**Palavras-chave:** *otimização do processo; parâmetros de corte; consumo de energia; custos.*

## 1. INTRODUÇÃO

Tem sido reconhecido que as condições de torneamento durante o corte (e.g. velocidade de corte, avanço e/ou profundidade de corte) podem ser selecionadas a fim de otimizar o tempo e os custos da operação, por meio de produtividade, da máxima taxa de produção com mínimo custo por componente ou outro critério disponível [Aggarwal e Singh<sup>(1)</sup>]. Dessa forma, devido ao alto nível de automação e para compensar o alto capital e custos operacionais, é estimado que sistemas de fabricação modernos usem tão alto quanto 80% do tempo de produção disponível nas operações de usinagem, quando comparados ao redor de 5% em máquinas convencionais [Groover<sup>(2)</sup>].

Dessa maneira, é reconhecida a existência de uma velocidade de corte otimizada em torneamento com passe simples. Entretanto, têm sido vagarosas as pesquisas com respeito a estratégias otimizadas realísticas para várias operações de usinagem. Isto é particularmente devido à distância entre o desempenho da usinagem e entre informação e equação, sendo particularmente devido à complexa natureza do problema de otimização.

Tradicionalmente, a otimização da operação envolve a seleção de condições econômica de corte tal como a velocidade de corte e/ou avanço, de acordo com a variedade do critério econômico, tal como o mínimo tempo de produção e custo. Dessa forma, um estudo realístico de otimização poderia considerar algumas restrições tecnológicas e práticas, no qual limita em um praticável domínio para a seleção das condições de corte otimizadas, onde estas são trabalhosas [Kalpakjian e

Schmid <sup>(3)</sup>; Wang *et al.* <sup>(4)</sup>]. Esta requer análises matemáticas complexas e a assistência de computador dependendo quantitativamente de uma função matemática correta para medir o desempenho de usinagem (tal como vida da ferramenta, potência e acabamento) e uma especificação da máquina, ferramenta de corte e certos componentes, que agem com restrição em condições possíveis [Armarego *et al.* <sup>(5)</sup>, Armarego *et al.* <sup>(6)</sup>].

Esta dificuldade tem resultado que alguns pesquisadores se utilizam de programas matemáticos disponíveis e técnicas de fontes numéricas a fim de otimizar o avanço e velocidade nas operações práticas de usinagem. Todavia, estas estratégias computadorizadas também não garantem soluções otimizadas nem prevêm características econômicas claramente definidas e estratégias de soluções, a qual liga para a leitura de identificação de tendências no caminho em que a solução ótima pode mudar com restrições de alternativa. Em adição, estas fontes puramente numéricas aproximadas requerem um longo tempo de processamento do computador e a estratégia de resultado não estão disponíveis para aplicações on-line em sistemas CAM [Eskicioglu e Eskicioglu <sup>(7)</sup>; Hough *et al.* <sup>(8)</sup>].

Por fim, este estudo apresenta o desenvolvimento de uma estratégia realística para a seleção adequada de condições de corte em um passe simples de torneamento sendo baseado em um critério de mínimo custo e tempo por componente. Com isso, também é analisado a influência da escolha destes parâmetros no consumo de energia considerando as restrições inerentes ao processo.

## 2. FORMAÇÃO E RESTRIÇÕES

Segundo o critério da máxima taxa de produção (tempo de produção mínimo por componente), a função para uma operação de torneamento com um simples passe é [Aggarwal e Singh <sup>(1)</sup>]:

$$T_T = T_L + T_C + T_R \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right) \quad (1)$$

Sendo  $T_L$  o tempo de aproximação e afastamento,  $T_C$  o tempo de corte,  $T_R$  o tempo de troca médio da ferramenta por componente e  $T$  o tempo de vida da ferramenta, a função para o custo médio pelo critério de componente,  $C_T$ , é:

$$C_T = x \cdot \left( T_L + T_C + T_R \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right) \right) + y \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right) \quad (2)$$

onde  $T_C$  é expresso pela Equação (3);  $D$ , o diâmetro,  $l$  o comprimento de corte,  $f$  o avanço e  $v_c$  a velocidade de corte:

$$T_C = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{v_c \cdot f} \quad (3)$$

Introduzindo um termo  $T_R^*$  na Equação (2), tal que:

$$T_R^* = T_R + \frac{y}{x} \quad (4)$$

a Equação (2) torna-se:

$$C_T = x \cdot \left( T_L + T_C + T_R^* \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right) \right) \quad (5)$$

Pode-se notar que se o salário do operador com o salário da máquina ( $x$ ) e o custo da ferramenta por vida do gume ( $y$ ) podem ser minimizados e constantes através de um adequado gerenciamento, sendo as Equações (1) e (4) matematicamente similares. Assim, as estratégias para minimizar  $T_T$  e  $C_T$  são similares – embora o avanço e a velocidade ótima para ambos não são necessariamente os mesmos sob as mesmas restrições.

A vida da ferramenta de corte  $T$  é dada pela equação estendida de Taylor, Equação (6), onde  $k$ ,  $n$ ,  $n_1$  e  $n_2$  são constantes do processo.

$$T = \frac{k}{v_c^{\left(\frac{1}{n}\right)} \cdot f^{\left(\frac{1}{n_1}\right)} \cdot a_p^{\left(\frac{1}{n_2}\right)}} \quad (6)$$

Substituindo as Equações (3) e (6) na Equação (1), tem-se:

$$T_T = T_L + \frac{\pi \cdot D \cdot l}{v_c \cdot f} + \frac{\pi \cdot D \cdot l \cdot T_R}{k} \cdot v_c^{\left(\frac{1}{n}-1\right)} \cdot f^{\left(\frac{1}{n_1}-1\right)} \cdot a_p^{\left(\frac{1}{n_2}\right)} \quad (7)$$

Esta é a forma fundamental da função a ser otimizada para  $T_T$ . Onde  $n$ ,  $n_1$  e  $n_2$  são constantes. Por outro lado, substituindo as Equações (3) e (6) na Equação (5), obtêm-se:

$$C_T = x \cdot \left[ T_L + \frac{\pi \cdot D \cdot l}{v_c \cdot f} + \left( T_R + \frac{y}{x} \right) \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot l}{K} \cdot v_c^{\left(\frac{1}{n}-1\right)} \cdot f^{\left(\frac{1}{n_1}-1\right)} \cdot a_p^{\left(\frac{1}{n_2}\right)} \right] \quad (8)$$

Tendo-se a forma fundamental a ser otimizada para  $C_T$ . Como é usual em estudos de otimização um simples passe de usinagem, somente a velocidade de corte  $v_c$  e o avanço  $f$  necessitam ser otimizados desde que seja contado com que  $T_L$  e  $T_R$  tenham sido minimizados. Na prática,  $v_c$  e  $f$  tem de ser selecionados para minimizar  $T_T$  na Equação (7) e  $C_T$  na Equação (8) sem violar alguma restrição. Estas restrições limitam, de fato, o domínio disponível de  $v_c$  e de  $f$  resultando em uma restrição de otimização tanto de  $T_T$  quanto de  $C_T$ .

Para uma operação com um passe simples numa máquina-ferramenta CNC, o limite de força da máquina  $F_{Pmáx}$ , o torque do fuso,  $T_{qmáx}$ , a potência máxima  $P_{máx}$ , tão bem como o avanço e o limite da velocidade do fuso ( $f_{min}$ ,  $f_{máx}$ ,  $N_{min}$ ,  $N_{máx}$ ) são considerados [Wang<sup>(4)</sup>].

Em adição, o mínimo e máximo limite de vida da ferramenta que podem ser impostos pelo sistema é considerado. Estas restrições podem ser expressas matematicamente conforme se segue.

### 2.1. Restrição da Velocidade da Máquina-Ferramenta e do Limite de Avanço

Para uma máquina-ferramenta CNC, algum avanço e alguma velocidade do fuso dentro de um limite mínimo e máximo especificado podem ser considerados para serem disponíveis à seleção das condições de corte otimizadas. Matematicamente, estas restrições são dadas por:

$$\pi \cdot D \cdot N_{min} = v_{c_{min}} \leq v_c \leq v_{c_{max}} = \pi \cdot D \cdot N_{max} \quad \therefore \text{tendo-se assim } f_{min} \leq f \leq f_{max} \quad (9)$$

### 2.2. Restrição da Força-Potência da Máquina-Ferramenta

O limite da força-potência é imposta pelo mecanismo da máquina, tal como função do fuso e da ferramenta, sendo restringido dentro de uma carga máxima permissível da máquina-ferramenta. Em adição, forças excessivas poderiam causar deformação do sistema afetando a qualidade dos componentes. Usando uma equação empírica de força-potência para esta condição pode ser expressa pela Equação (10) onde  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $C$  são constantes do material [Ai e Xiao<sup>(9)</sup>; Zhao *et al*<sup>(10)</sup>].

$$F_p = C \cdot f^\alpha \cdot a_p^\beta \leq F_{p_{max}} \quad (10)$$

Assim, a restrição máxima de força-potência resultaria num limite de avanço, i.e.:

$$f \leq f_F = \left( \frac{F_{p_{max}}}{C \cdot a_p^\beta} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (11)$$

### 2.3. Restrição da Força e Potência Máxima da Máquina-Ferramenta

As condições de operação devem satisfazer a condição de que a potência máxima deverá estar dentro do limite máximo permitido à máquina-ferramenta ( $P_{max}$ ). Na região de baixa velocidade de corte da máquina, a potência máxima não pode ser considerada por esta envolver um excessivo

torque do fuso. Nesta região, a restrição de potência da “baixa” velocidade ( $P_a$ ) devida à limitação do torque do fuso tem que ser considerada. Esta baixa potência usualmente aumenta linearmente com a velocidade até uma velocidade crítica  $v_a$  onde a restrição de  $P_{max}$  torna-se relevante.

Aqui, o torque combinado (ou potência de baixa velocidade  $P_a$ ) e a restrição de potência máxima podem ser expressos pelas Equações (12) e (13) tendo-se  $W$  e  $A$  constantes.

$$P = W \cdot v_c \cdot f^\alpha \cdot a_p^\beta \leq P_a = A_1 \cdot N = A \cdot v_c \quad (\text{para } v_c \leq v_a) \quad (12)$$

$$P = W \cdot v_c \cdot f^\alpha \cdot a_p^\beta \leq P_{max} \quad (\text{para } v_c > v_a) \quad (13)$$

É comum que  $v_a$  tenha um valor constante (dependente do diâmetro do material de trabalho) entre o limite de velocidade mínimo e máximo da máquina-ferramenta, podendo ser encontrado a partir de uma especificação. Para  $v_c = v_a$ ,  $P_a = P_{max}$  a fim de que  $v_a$  possa ser encontrado:

$$v_a = \frac{P_{max}}{A} \quad (14)$$

Em adição, a restrição de potência a baixa velocidade pode ser representada por um limite de avanço  $f_a$  que pode ser encontrado por meio da Equação (11) com  $v_c = v_a$ ,  $P_a = P_{max}$ , i.e.:

$$f \leq f_a = \left( \frac{A}{W \cdot a_p^\beta} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (15)$$

Entretanto, a restrição de  $P_{max}$  limita  $f$  quanto à velocidade quando a Equação (13) é satisfeita.

## 2.4. Limite Mínimo e Máximo da Vida da Ferramenta

É evidente que, sob certas condições, a vida otimizada da ferramenta de corte pode ser muito pequena, requerendo um elevado número disponível para a troca [Armarego *et al.*<sup>(5)</sup>, Armarego *et al.*<sup>(6)</sup>]. Isto é particularmente correto quando está sendo usado o critério de mínimo tempo de produção em uma máquina CNC ( $T_R$  pequeno). Embora a vida otimizada satisfaça o critério de seleção econômica, ela pode ser considerada como impraticável [Wang<sup>(4)</sup>]. Assim, um limite de vida pode ser imposto pelo sistema de produção: ou por falta de ferramenta ou pelo número de ferramentas no magazine. Dessa forma, os limites mínimo e máximo da vida serão apresentados. Estes especificam uma região possível para  $f$  e  $v_c$  na seleção dos parâmetros otimizados [Eq. (6)].

Com já citadas,  $F_{Pmax}$ ,  $P_{max}$ ,  $N_{min}$ ,  $f_{min}$  e  $f_{max}$  são restrições dadas pela máquina. É evidente que suas magnitudes limitem a otimização de  $v_c$  e  $f$  na Equação (7). Além disso, restrições de torque e potência são mutuamente exclusivas, sendo generalizadas pelo limite de avanço permissível  $f_x$ :

$$f \leq f_x = \min\{f_F, f_a, f_{RT}\} \quad (16)$$

Para um torneamento rugoso, a Equação (16) pode ser simplificada como:

$$f \leq f_x = \min\{f_F, f_a\} \quad (17)$$

Para o limite de avanço,  $f_x$  e  $f_{max}$  podem ser generalizados para:

$$f_{up} = \min\{f_x, f_{max}\} \quad (18)$$

Estudos detalhados sobre otimização em usinagem mostram que os expoentes da Equação (6) e as equações de restrição têm as seguintes relações:  $(1/n) > (1/n_1) > 0$ ,  $(1/n) > 1$  e  $1 > \alpha > (n/n_1)$ , onde  $(1/n_1)$  pode ser maior, igual ou menor que 1 [Ai e Xiao<sup>(9)</sup>; Zhao *et al.*<sup>(10)</sup>].

## 3. ANÁLISE DA ENERGIA NO CORTE EM USINAGEM

O processo de produção de uma empresa é a combinação de processos vistos isoladamente, envolvidos na conversão de matéria-prima ou produtos semi-acabados em produtos acabados. Isto inclui não somente os processos que atuam diretamente, mas também os processos preparatórios

(planejamento de processos, planejamento da produção, agendamento da produção, preparação das ferramentas etc.) e os processos auxiliares (manutenção de equipamentos, manuseio de materiais, afiação de ferramentas, inspeção, análise de custo, estatística da produção etc.) [Zhao *et al.* <sup>(10)</sup>].

Considerando o custo da energia elétrica, que está diretamente envolvido na produção de uma peça/produto, é possível salientar que para se estimar os gastos, é preciso conhecer: a demanda média de cada centro produtivo ou de cada máquina, o número de horas de trabalho desses centros ou máquinas, as tarifas por quilowatt-hora e também os parâmetros de corte utilizados na usinagem. Entretanto, devido ao baixo número de estudos sobre a análise energética aplicada à usinagem, em especial, relacionados com a máxima eficiência, este trabalho procura relacionar tais itens dentro de um processo competitivo de fabricação.

Assim, para reforçar tal argumento, é oportuno evidenciar que quando todas as etapas do processo de usinagem estiverem preliminarmente definidas, devem-se analisar as variáveis que influenciam na energia a fim de otimizá-las dentro de um plano competitivo definido.

### 3.1. Análise Matemática da Energia na Usinagem

Para se determinar a energia consumida ( $E$ ), devem-se considerar a potência fornecida através do motor da máquina ( $P$ ), o tempo de corte ( $T_C$ ) e o rendimento da máquina ( $\eta$ ):

$$E = \left( \frac{P}{\eta} \right) T_C \quad (19)$$

Como  $T_C$  é função de  $v_c$  e de  $f$  (Equação 3), é preciso considerar as restrições impostas por  $v_c$  e  $f$ :

$$\left( \frac{P_{\min}}{\eta} \right) T_C = E_{\min} \leq E \leq E_{\max} = \left( \frac{P_{\max}}{\eta} \right) T_C \quad (20)$$

Detalhadamente, a Equação (20) torna-se como a Equação (21), onde  $z$  é uma constante:

$$\frac{k_s \cdot a_p \cdot \pi \cdot D \cdot l \cdot [1 - 0,015 \cdot (\gamma - 6^\circ)]}{3,6 \cdot 10^9 \cdot \eta \cdot (f_{\min} \cdot \text{sen} \chi_r)^z} = E_{\min} \leq E \leq E_{\max} = \frac{k_s \cdot a_p \cdot \pi \cdot D \cdot l \cdot [1 - 0,015 \cdot (\gamma - 6^\circ)]}{3,6 \cdot 10^9 \cdot \eta \cdot (f_{\max} \cdot \text{sen} \chi_r)^z} \quad (21)$$

A Equação (21) explicita que a geometria da ferramenta apresenta influência direta no consumo de energia e, por isso, a utilização do ângulo de saída  $\gamma$  maior e do ângulo de posição  $\chi_r$  por volta dos  $90^\circ$  torna-se favorável, visto que  $k_s$  é uma constante. Além disso, para diminuir  $P$  sem modificar  $T_C$ , seria necessário aumentar  $f$  e diminuir  $a_p$  na mesma proporção. Porém, um aumento de  $f$  contribui para um aumento da rugosidade superficial. Já para manter  $P$  e diminuir  $T_C$ , seria necessário aumentar a  $v_c$  e/ou o  $f$ . Caso aumentar  $v_c$ , a taxa de desgaste de flanco da ferramenta aumentará significativamente. Por outro lado, se aumentar  $f$ , poderá ocorrer vibração. Nota-se também que a energia  $E$  é função direta de  $f$ . Assim, os limites mínimo e máximo são:

$$\frac{1}{f_{\min}} = E_{\min} \leq E \leq E_{\max} = \frac{1}{f_{\max}} \quad (22)$$

## 4. ANÁLISE DE OTIMIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS

O tempo e o custo mínimos ( $T_T$  e  $C_T$  respectivamente) por componente requerem que a derivada parcial das Equações (7) e (8) com relação à  $v_c$  e  $f$  sejam zero [Wang <sup>(4)</sup>]. Assim:

$$\frac{\partial T_T}{\partial v_c} = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{v_c^2 \cdot f} \cdot \left[ \frac{T_R}{T} \cdot \left( \frac{1}{n} - 1 \right) - 1 \right] = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial T_T}{\partial f} = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{v_c \cdot f^2} \cdot \left[ \frac{T_R}{T} \cdot \left( \frac{1}{n_1} - 1 \right) - 1 \right] = 0 \quad (24)$$

Rearranjando, as equações econômicas da vida da ferramenta em função de  $v_c$  e  $f$ , são dadas por:

$$\frac{K}{v_c^{\binom{1}{n}} \cdot f^{\binom{1}{n_1}} \cdot a_p^{\binom{1}{n_2}}} = T_R \cdot \left( \frac{1}{n} - 1 \right) = T_V \quad (25)$$

$$\frac{K}{v_c^{\binom{1}{n}} \cdot f^{\binom{1}{n_1}} \cdot a_p^{\binom{1}{n_2}}} = T_R \cdot \left( \frac{1}{n_1} - 1 \right) = T_F \quad (26)$$

Para satisfazer simultaneamente as Equações (23) e (24), é preciso que  $n = n_l$ . Para um material da ferramenta de trabalho comum,  $n \leq n_l$ , a fim de que um único par de  $v_c$  e  $f$  para um tempo mínimo por componente  $T_T$  não exista. Além do mais, torna-se necessário estudar as características de  $T_T$  a fim de selecionar  $v_c$  e  $f$  para que o tempo de produção por componente seja minimizado.

A característica do tempo por componente  $T_T$  ao longo de  $\partial T_T / \partial v = 0$  pode ser encontrada pela substituição de  $v_c$  a partir da Equação (25) dentro da Equação (7), resultando:

$$T_T = T_L + \pi \cdot D \cdot l \cdot \left[ \frac{T_R}{n \cdot K} \right]^n \cdot (1-n)^{n-1} \cdot f^{\binom{n-1}{n_1}} \cdot a_p^{\binom{n}{n_2}} \quad (27)$$

Contudo, quando  $1/n > 1$  mas  $1/n_1 \leq 1$ , como é possível em algumas combinações [Zhao *et al* <sup>(10)</sup>; Metals Handbook <sup>(11)</sup>],  $\partial T_T / \partial f$  na Equação (24) é negativa e a Equação (26) não é aplicável. Assim, a condição necessária para um mínimo local com relação à  $f$  (i.e.  $\partial T_T / \partial f = 0$ ) pode nunca ser satisfeita e o mínimo  $T_T$  para  $v_c$  ocorre quando  $f$  é tão alto quanto possível. Por outro lado, para  $C_T$ :

$$\frac{\partial C_T}{\partial v_c} = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{v_c^2 \cdot f} \cdot \left[ -1 + \left( T_R + \frac{y}{x} \right) \cdot \frac{\left( \frac{1}{n} - 1 \right)}{T} \right] = 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial C_T}{\partial f} = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{v_c \cdot f^2} \cdot \left[ -1 + \left( T_R + \frac{y}{x} \right) \cdot \frac{\left( \frac{1}{n_1} - 1 \right)}{T} \right] = 0 \quad (29)$$

Então, as equações econômicas de vida da ferramenta, com relação à  $v_c$  e  $f$ , tornam-se:

$$\frac{K}{v_c^{\binom{1}{n}} \cdot f^{\binom{1}{n_1}} \cdot a_p^{\binom{1}{n_2}}} = \left( T_R + \frac{y}{x} \right) \cdot \left( \frac{1}{n} - 1 \right) = T_V^* \quad (30)$$

$$\frac{K}{v_c^{\binom{1}{n}} \cdot f^{\binom{1}{n_1}} \cdot a_p^{\binom{1}{n_2}}} = \left( T_R + \frac{y}{x} \right) \cdot \left( \frac{1}{n_1} - 1 \right) = T_F^* \quad (31)$$

A característica de mínimo  $C_T$  ao longo de  $\partial C_T / \partial v = 0$  pode ser encontrada pela substituição de  $v_c$  a partir da Equação (30) dentro da Equação (8), resultando então:

$$C_T = x \cdot \left[ T_L + \frac{\pi \cdot D \cdot l \cdot \left( T_R + \frac{y}{x} \right)^n \cdot f^{\binom{n}{n_1}} \cdot a_p^{\binom{n}{n_2}} \cdot \left( \frac{1-n}{n} \right)^n \cdot \left( \frac{2 \cdot n - 1}{n-1} \right)}{K^n} \right] \quad (32)$$

Nota-se na Equação (32) que o mínimo  $C_T$  não contém o termo da velocidade; porém  $C_T$  está diretamente relacionado com o avanço  $f$ . Dessa forma, um estudo sobre o avanço poderia ser suficiente desde que sejam respeitadas as limitações e restrições. Com isso, e através das equações de  $E$ ,  $C_T$  e  $T_T$ , podem-se analisar o comportamento e influência dos parâmetros no processo.

Como expresso na Equação (17),  $f_x$  que resulta das restrições de força, torque e acabamento e a restrição de  $f_{max}$  são, além disso, generalizadas para um limite superior de avanço  $f_{up}$ . A característica de  $T_T$ , onde considerando juntamente  $P_{max}$  e  $f_{up}$  são as mesmas, onde  $f_{up}$  é menor que o avanço na interseção de  $P_{max}$  e  $\partial T_T / \partial v = 0$ , a ótima é para a interseção de  $f_{up}$  e  $\partial T_T / \partial v_c = 0$ , ( $V_v(f_{up})$ ,  $f_{up}$ ); além disso, é a interseção de  $f_{up}$  e  $P_{max}$ , ( $V_p(f_{up})$ ,  $f_{up}$ ), onde  $V_v(f)$  e  $v_p(f)$  são, respectivamente, a velocidade de corte sobre  $\partial T_T / \partial v = 0$  e  $P_{max}$  onde  $f = f_{up}$  sendo são dadas por:

$$V_v(f) = \left[ \frac{K}{T_R \cdot \left( \frac{1}{n} - 1 \right) \cdot f^{\left( \frac{1}{n_1} \right)} \cdot a_p^{\left( \frac{1}{n_2} \right)}} \right]^n \quad (33)$$

$$V_p(f) = \frac{P_{max}}{W \cdot f^\alpha \cdot a_p^\beta} \quad (34)$$

Como discutido anteriormente, a interseção de  $v_a$  com a restrição de  $P_{max}$  e do torque está entre  $v_{min}$  e  $v_{max}$ , e o  $f$  correspondente para  $v_a$  nesta interseção é  $f_a$ . Desde que  $f_{up} = \min \{f_F, f_a, f_{RT}, f_{max}\}$  e com a diminuição de  $P_{max}$  com o decréscimo de  $f$  e aumento de  $v$  no domínio  $f-v_c$ , pode ser provado a partir da Equação (30) que a velocidade de corte  $V_v(f_{up})$  na interseção de  $f_{up}$  e  $P_{max}$  é sempre maior que o limite da velocidade de corte mínimo da máquina-ferramenta  $V_{min}$ .

## 5. RESULTADOS

A fim de validar a estratégia de otimização (relação entre o intervalo de máxima eficiência e a energia), um estudo numérico foi conduzido. Para tanto, adotou-se as recomendações a partir da literatura. Observou-se que alguns dados sobre usinagem prevêem somente recomendações à seleção de alguns parâmetros de corte em torneamento, tais como  $f$  e a  $v_c$ , não sendo considerado detalhadamente suas restrições [Ferreira *et al*<sup>(12)</sup>]. Contudo, notou-se que os parâmetros prevêem não somente a vida da ferramenta, o torque e a potência para uma ampla combinação de materiais para ferramentas, mas também informações detalhadas das máquinas [Ai e Xiao<sup>(9)</sup>; Zhao *et al*<sup>(10)</sup>]. Ademais, as equações para tais condições se aplicam em diversas combinações de materiais para ferramentas, e apenas os valores das constantes nas equações necessitam ser modificadas. Assim, a utilização de estratégias sobre tais recomendações pode ser analisada por um estudo numérico.

Aqui, a simulação de uma operação de torneamento de desbaste foi proposta, onde os passos discretos de  $f$  e  $v_c$  foram ignorados [Ai e Xiao<sup>(9)</sup>; Zhao *et al*<sup>(10)</sup>]. As especificações relevantes da máquina-ferramenta, limitações e restrições encontram-se na Tabela 1, tendo-se uma ferramenta de metal-duro usada para o corte de aço-carbono. Para a efetividade do estudo, dois casos foram analisados, tendo-se dois valores de diâmetro  $D$  da para dois comprimentos  $l$  diferentes da peça usinada. Também foram analisados dois níveis de  $T_L$  e  $T_R$ , conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 1. Especificação da máquina-ferramenta e parâmetros gerais

Especificações da Máquina-Ferramenta	$N_{min} = 11,5$ rpm	$f_{min} = 0,082$ mm/volta	$P_{max} = 7800$ W
	$N_{max} = 1200$ rpm	$f_{max} = 1,59$ mm/volta	$\eta = 0,75$
	Vida da Ferramenta, $T$		Informações de parâmetros e constantes
Dados de Otimização	$n = 0,2$	$n_1 = 4,0$ $n_2 = 1,0$	$\alpha = 0,75$ $\beta = 1,0$ $W = 46,583$
	$k = 2,086E12$	$k_s = 2100$ kgf/mm <sup>2</sup>	$a_p = 1,0$ mm $\gamma = 10^\circ$ $z = 0,26$

Tabela 2. Características do material, tempo e parâmetros de custo

Caso	$D$ (mm)	$l$ (mm)	$T_L$ (min)	$T_R$ (min)	$x$ (R\$/min)	$y$ (R\$)
(a)	100	200	0,3	0,3	1,00	2,0
(b)	150	400	0,6	0,6	1,00	2,0

Através das Tabelas 1 e 2 e com as equações já desenvolvidas, pôde-se construir a Figura 1 para a análise de  $T_T$  e  $C_T$  em cada caso e a Figura 2 para representar o comportamento adequado de  $V_v$ .

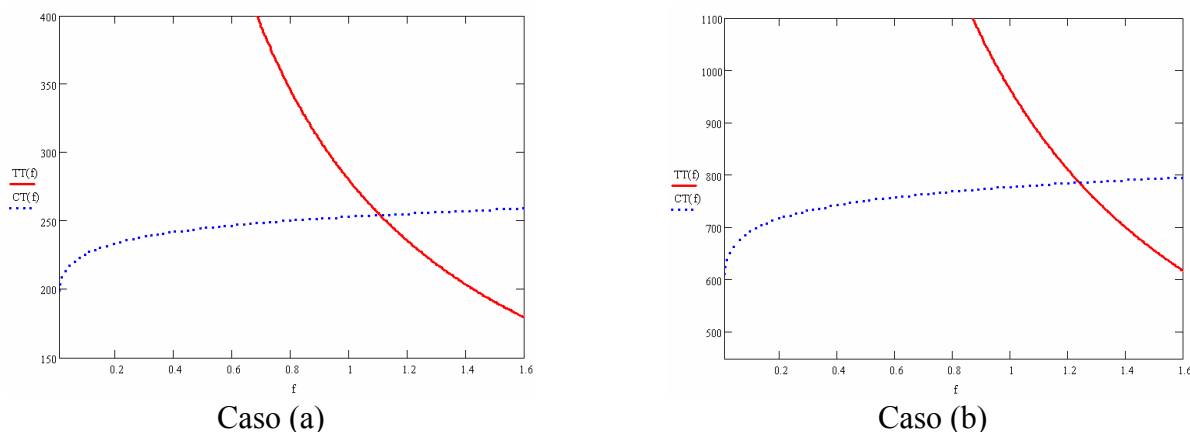


Figura 1. Análise do tempo  $T_T$  e custo de produção médio por componente  $C_T$

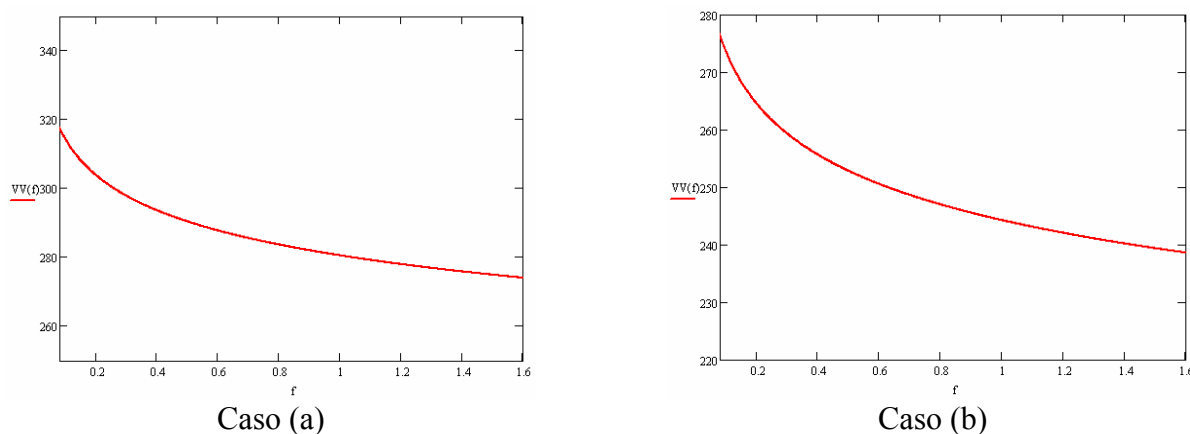


Figura 2. Comportamento de  $V_v$  como função de  $f$

Examinando as Figuras 1 e 2, pode-se salientar que para uma adequada otimização dos parâmetros de corte deve-se inicialmente analisar o comportamento de  $T_T$  e  $C_T$  conforme a Figura 1. Tal representação deve ser avaliada a fim de obter um adequado avanço considerando as restrições impostas. Após a seleção de  $f$ , deve-se selecionar a velocidade permissível para tal avanço conforme a Figura 2. Por fim, após estas análises, a Figura 3 representa o consumo de energia do parâmetro escolhido e a Figura 4 o intervalo de máxima eficiência com relação à  $f$ .

Ao analisar o comportamento do consumo de energia (Figura 3), poder-se-á verificar que é possível alterar o avanço devido a um plano de estratégias imposto por cada sistema produtivo. Tendo-se efetuado a análise dos três comportamentos, o intervalo de máxima eficiência deve ser verificado se o parâmetro avanço está adequado ou não à exigência do sistema (Figura 4).

Considerando as restrições inerentes, uma aplicação direta deverá analisar o comportamento de  $T_T$  e  $C_T$  em função de  $f$  permissível, após selecionar a adequada  $v_c$ . Por fim, avaliar se os parâmetros selecionados atendem à política de produção da empresa, ou seja, dever-se-á aumentar  $f$  para atender a uma alta demanda de produção, ou reduzir  $f$  (considerando  $v_c$ ) em consequência da empresa não estar num período de alta produção.



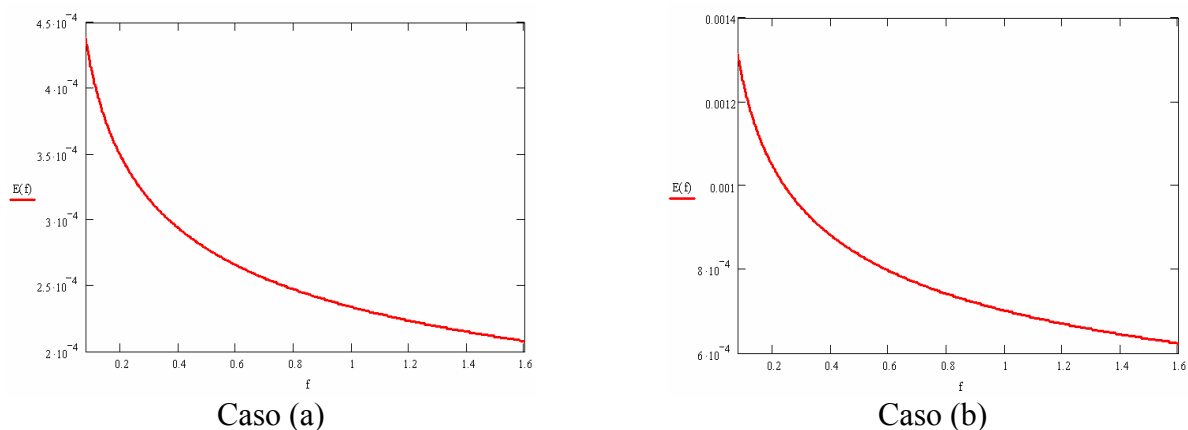


Figura 3. Análise do consumo de energia  $E$

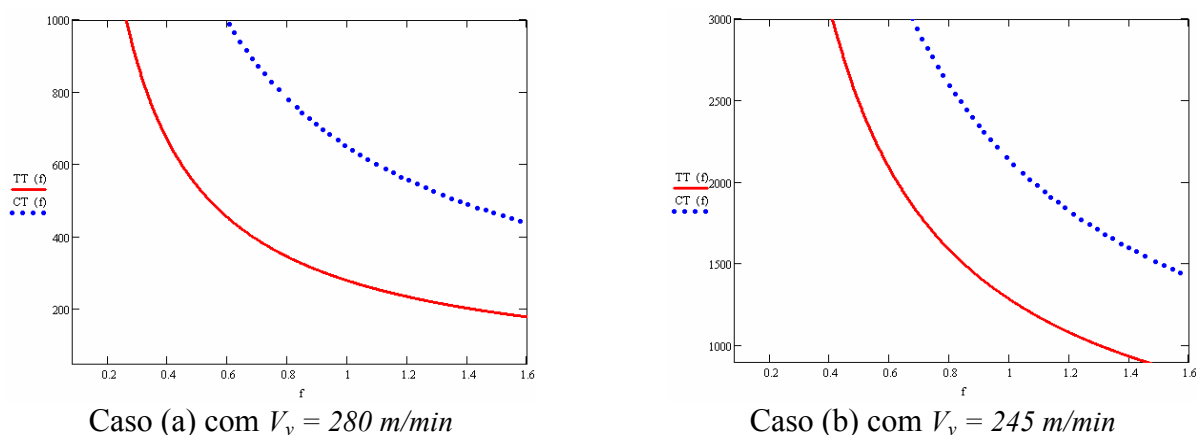


Figura 4. Análise do intervalo de máxima eficiência para  $T_T$  e  $C_T$  após a escolha de  $V_v$  e  $f$

## 6. CONCLUSÕES

Usando as equações com as restrições desenvolvidas, uma estratégia realística de otimização dos parâmetros de corte pode ser avaliada. Esta otimização está baseada nas restrições do sistema máquina-ferramenta, sendo com isso, três critérios analisados, ou seja, o tempo e o custo de mínima produção por componente e o consumo de energia elétrica. Assim, um estudo numérico, com dois casos, foi desenvolvido verificando a possibilidade de aumento da produtividade, a fácil adequação da modelagem matemática a outras situações de interesse, a minimização do custo final do produto e a otimização do gerenciamento.

## 7. AGRADECIMENTOS

Ao grupo GEAPI-URI, pela infra-estrutura e ao PIIC-URI, pela bolsa de pesquisa concedida.

## 8. REFERÊNCIAS

1. AGGARWAL, A.; SINGH, H. Optimization of machining techniques – A retrospective and literature review. *Sādhanā*, India, v. 30, n. 6, p. 699–711, Dec. 2005.
2. GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2002. 1008 p.
3. KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 4. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2001. 1148 p.

4. WANG, J. *et al.* Optimization of cutting conditions for single pass turning operations using a deterministic approach. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Holanda, v. 42, n. 8, p.1023-1033. 2002.
5. ARMAREGO, E. J. A.; SMITH, A. J. R.; WANG, J. Constrained optimization strategies and CAM software for single pass peripheral milling. **International Journal of Production Research**, London, v. 31, n. 9, p. 2139-2160, Sept. 1993.
6. ARMAREGO, E. J. A. *et al.* Computer-aided constrained optimization analyses and strategies for multipass helical tooth milling operations. **CIRP Annals**, v. 43, n. 1, p. 437-442, 1994.
7. ESKICIOGLU, A. M.; ESKICIOGLU, H. Application of three nonlinear programming techniques in optimizing machining conditions. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – Part B**, v. 206, n. B3, p. 183-189, 1992.
8. HOUGH, L. *et al.* Optimization of the second order logarithmic machining economics problem by extended geometric programming. Part II Posynomial constraints, **AIEE Transactions**, v. 3, n. 13. p. 234-242. 1981.
9. AI, X.; XIAO, S. G. **Metal Cutting Conditions Handbook**, 3 ed. China: Mechanical Industry Press, 1994.
10. ZHAO, F. *et al.* **Metal Machining Technician Handbook**, 3.ed., Shanghai: Scientific Press, 1990.
11. METALS HANDBOOK. **Machining**. 9. ed. USA: ASM International, v. 16. 1999.
12. FERREIRA, J. C. E.; RIBEIRO, L. P. G.; MOURA, E. B. O uso da simulação para aumentar a competência da indústria junto ao mercado externo. In: XX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais do XX ENEGEP**, São Paulo, 2000.

## **EVALUATION OF THE ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION BY CUTTING PARAMETERS OPTIMIZATION IN TURNING**

### **Filipe Molinar Machado**

Integrated Regional University (URI). Industrial Mechanical Engineering (EIM). P. O. Box 203, Zip Code 98802-470, Santo Angelo, RS, e-mail: [fmacmec@san.uri.br](mailto:fmacmec@san.uri.br).

### **André João de Souza**

Integrated Regional University (URI). Industrial Mechanical Engineering (EIM). P. O. Box 203, Zip Code 98802-470, Santo Angelo, RS, e-mail: [ajsouza@san.uri.br](mailto:ajsouza@san.uri.br).

***Abstract.** The development speed of new manufacturing methods and the need to increase the production capacity and to reduce costs with on account of take competitiveness, take its to appoint yours focus in not just decrease the cost of final element, but in reduce it in each stage of the process. That is made through the analysis of some inherent points where optimization studies of the used parameters can be applied. Thus, and considering the metal machining, a key point to be considered in the optimization is the energy consumption that different types of parameters are used. In many cases, the energy spends during the process is considered inside of an average consumption of the machine-tool and placed as directly variable cost proportional to the produced amounts. However, these costs are divided in two parts: a fixed one, related to the power, and another variable, which had to the distinguishing tariffs, in agreement e.g. with the consumption sum. For this, the paper presents a criterion of optimization based on the minimum cost and time production per component through an approach involving numerical analyses from inherent restrictions to the machine-tool system. With this, a numerical study it analyzes the development of the presented strategies in order to show the economic benefits of the use of this optimization.*

**Keywords:** process optimization, cutting parameters, energy consumption, costs.