

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE TORNOS CONVENCIONAIS BASEADA NO VALOR MÉDIO DA ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE

Alessandro Marques, amarques@ufpr.br¹
Dalberto Dias da Costa, dalberto@ufpr.br¹
Eduardo Márcio de Oliveira Lopes, eduardo_lopes@ufpr.br¹
Mauricio Klein Gussoli, mauriciogussoli@hotmail.com¹

¹Universidade Federal do Paraná – Departamento de Engenharia Mecânica. Rua Francisco H. dos Santos, nº. 210 - Centro Politécnico / Setor de Tecnologia - Bairro: Jardim das Américas - Curitiba-PR - CEP: 81531-980 - Caixa Postal: 19011

Resumo: *Uma máquina-ferramenta é considerada um produto complexo cuja eficiência energética é difícil de ser determinada. Na literatura especializada, encontram-se vários métodos para avaliação de máquinas equipadas com controle numérico, mas poucos são adequados à avaliação de máquinas convencionais. O objetivo neste trabalho é propor um método alternativo para a determinação da eficiência energética de tornos convencionais. Este método é uma combinação daqueles reportados na literatura, com um novo indicador baseado no valor médio da energia específica de corte. A metodologia aqui proposta se destaca pelo emprego de um dinamômetro piezoelétrico e de um tacômetro para a medição direta da potência de corte e também pela medição concomitante da potência elétrica com o auxílio de um wattímetro. Os ensaios foram baseados no torneamento cilíndrico de uma barra de aço ABNT 1045 com ferramentas de metal duro. Os resultados obtidos indicam que, para as condições analisadas, o método proposto pode ser adotado para a avaliação de tornos convencionais com potências nominais diferentes.*

Palavras-chave: *eficiência energética, tornos convencionais, energia específica de corte*

1. INTRODUÇÃO

A eficiência energética é, atualmente, considerada um requisito chave no desenvolvimento de novos produtos, em particular aqueles que durante seu uso consomem algum tipo de energia. No caso de máquinas-ferramenta, isto não é diferente, pois o consumo de energia é alto em praticamente todas as fases de seu ciclo de vida; sendo a energia elétrica a fonte e parcela mais significativa, principalmente durante a fase de uso.

Devido a esse elevado consumo de energia, o setor de máquinas-ferramenta tem sido considerado como importante dentro das políticas públicas de vários países para o aumento da eficiência energética. Segundo Velchev et al. (2014), um estudo realizado pela União Europeia indica que as máquinas-ferramenta estão entre os 10 grupos de produtos considerados como prioritários para a economia de energia.

Uma máquina-ferramenta é considerada um produto complexo e, por conseguinte, a avaliação de sua eficiência energética não é uma tarefa fácil. Diversos autores (Gutowski et al. 2006, Kara e Li, 2011, Mori et al., 2011) têm discutido e proposto métodos para a avaliação da eficiência energética das máquinas-ferramenta, porém ainda não existe um método universalmente aceito para este tipo de avaliação.

Em sua maioria, os estudos sobre eficiência energética estão direcionados às máquinas equipadas com CNC (comando numérico computadorizado) (Zein, 2012). Apesar de existir uma tendência mundial pela substituição das máquinas convencionais por CNC's, as convencionais ainda continuam a ser produzidas e utilizadas em grande número em diversos parques industriais. Entretanto, pouco, ou quase nada, tem sido proposto acerca da eficiência energética de tais produtos.

Em um estudo recente sobre o parque de máquinas brasileiro, realizado por Simon (2013), foi constatado que existe uma tendência de crescimento da quantidade de máquinas CNC em relação às máquinas convencionais. Entretanto, até 2013 o número de máquinas convencionais ainda era bem superior ao de CNC's. Ainda nesse estudo, pode-se observar que a quantidade de tornos convencionais era, aproximadamente, o dobro dos tornos equipados com comando numérico.

O objetivo neste trabalho é propor um método alternativo para avaliar a eficiência energética dos tornos convencionais. Isto se justifica, tal como exposto anteriormente, pelo ainda elevado, número de tornos convencionais no parque de máquinas brasileiro e também pela inexistência de métodos de avaliação dedicados a esse tipo de equipamento.

2. TORNOS CONVENCIONAIS: CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS, OPERACIONAIS E EFICIÊNCIA

O termo “torno mecânico convencional” é comercialmente utilizado para a designação de tornos com barramento horizontal e cuja operação é realizada manualmente. Esse tipo de máquina ainda é caracterizado pela presença de um, ou no máximo, dois motores elétricos. O primeiro motor, de maior porte, é utilizado para a realização dos movimentos de corte e avanço. O segundo, caso exista, é geralmente de baixa potência e é empregado no bombeamento do fluido de corte. Geralmente, mas não necessariamente, esses motores utilizam corrente alternada e possuem rotação fixa. Dessa forma, a variação das velocidades de rotação da peça e do avanço da ferramenta é feita por meio de transmissões mecânicas.

Nesse tipo de equipamento, cabe ao operador a mudança de engrenagens para a seleção da rotação (N) da peça. A rotação selecionada depende do diâmetro (d) a ser torneado e da velocidade de corte (V_c) recomendada, tal como definido pela Eq. (1). Entretanto, devido às limitações impostas pela máquina, o operador deverá selecionar a rotação mais próxima daquela calculada, o que implicará, na maioria das vezes, um torneamento com velocidade diferente do ideal.

$$N = \frac{1000V_c}{\pi d} \quad (1)$$

O movimento de avanço pode ser manual ou automático. Se for manual, caberá ao operador o controle de sua velocidade, caso contrário ele poderá selecionar, também por meio de engrenagens, um avanço (f) próximo de um valor recomendado.

Outra grandeza, cuja seleção também depende do operador, é a profundidade de corte (a_p). Em uma operação de torneamento cilíndrico, por exemplo, a definição da profundidade consiste em posicionar, manualmente, a ferramenta em relação ao diâmetro inicial (d_i) para que seja obtido um diâmetro final (d_f). O valor de a_p é definido como sendo a metade da diferença desses diâmetros.

Após a definição das grandezas mencionadas anteriormente, a operação será realizada a uma taxa de remoção constante (Q), cujo valor pode ser obtido por meio da Eq. (2).

$$Q = V_c a_p f \quad (2)$$

Ao final do percurso de avanço (l_f), o operador interrompe o movimento de avanço, recua a ferramenta e realiza nova passada ou desliga o motor principal para retirada da peça acabada. Esse ciclo se repete ao longo de um turno de trabalho em função da quantidade de peças a serem usinadas. Na repetição desses ciclos, deve-se observar que, em uma parcela significativa de sua duração, não existe consumo de energia, pois o motor principal permanece desligado. Isto ocorre durante as etapas de medição, carga e descarga da peça, troca de ferramentas e paradas para descanso do operador.

Do ponto de vista do consumo de energia, o torno convencional difere bastante de uma máquina equipada com CNC. Nessa última, o consumo de energia existe durante todo um turno de trabalho, pois, dada a sua complexidade, vários dispositivos periféricos, tais como o motor da unidade hidráulica e a unidade de ar comprimido, permanecem ligados.

Atualmente, existem diferentes abordagens para a avaliação da eficiência energética de máquinas-ferramenta (Zein, 2012). As mais simples consideram a máquina como um mero conversor de energia. Sendo assim, sua eficiência (η) pode ser determinada por dois métodos: direto e indireto.

No método direto, a eficiência (η_1) é definida pela razão entre a potência de mecânica (P_M) e a potência elétrica ativa (P_E) medida na entrada do motor, tal como definido pela Eq. 3.

$$\eta_1 = \frac{P_M}{P_E} \quad (3)$$

A potência mecânica é a soma da potência de corte (P_C) com a potência de avanço (P_F). As potências de corte e avanço são definidas pelos produtos de suas respectivas forças com suas respectivas velocidades, tal como estabelecido pelas Eqs. (4) e (5).

$$P_C = F_c V_c \quad (4)$$

$$P_F = F_f V_f \quad (5)$$

Em processos regulares de torneamento, a velocidade de avanço (V_f) é muito pequena, o que implica uma potência de avanço também muito pequena. Isto possibilita reescrever a Eq. (3), de tal modo que a eficiência possa ser obtida pela razão entre a potência de corte (P_C) e a potência elétrica (P_E), tal como redefinido pela Eq. (6).

$$\eta_1 = \frac{P_C}{P_E} \quad (6)$$

No método indireto, a eficiência (η_2) é calculada como a razão entre a potência de saída corrigida e a potência de entrada. A potência de entrada corresponde à potência elétrica ativa medida no motor (P_E). A potência de saída corrigida é estimada pela diferença entre a potência de entrada e as perdas (D_Z) que ocorrem no motor e na transmissão. Dessa maneira, a eficiência é calculada tal como definido pela Eq. (7).

$$\eta_2 = \frac{P_E - D_Z}{P_E} \quad (7)$$

Esse método tem como vantagem a possibilidade de estimação das perdas a partir da potência elétrica medida quando a máquina está operando em vazio, isto é, sem o contato ferramenta peça, tal como proposto por Da Costa et al. (2010). Entretanto, isto só é possível se o comportamento das perdas na transmissão e no motor for conhecido.

Não obstante à sua maior exatidão, o cálculo da eficiência a partir da Eq. (6) requer o uso de um dinamômetro para medição da força de corte e de um tacômetro para a medição da rotação da peça durante o corte. A medição da rotação durante o corte se faz necessária porque a rotação do motor varia em função da carga aplicada ao mesmo.

Ambos os métodos mencionados anteriormente produzem indicadores adimensionais, também conhecidos como rendimentos e expressos em percentagem. De modo similar ao que ocorre na avaliação de motores elétricos, pode-se construir uma curva de eficiência para a máquina em função do carregamento (ρ) aplicado ao motor. O carregamento, também em percentagem, é determinado pela razão entre a potência elétrica ativa e a potência nominal informada na plaqueta de identificação do motor.

Na literatura especializada, por exemplo, em Shaw (2005) a energia específica de corte (μ_c), tal como definido pela Eq. (8), representa a razão entre a potência de corte (P_C) e a taxa de remoção (Q). Ela indica a quantidade de energia gasta na remoção de uma unidade cúbica de material. Ela é uma constante relacionada ao par ferramenta-peça para um dado valor de avanço, porém varia também na ocorrência de grandes mudanças de V_c (Rodrigues e Coelho, 2007). Não obstante, variações de a_p não modificam o seu valor (Shaw, 2005). Por conseguinte, pode-se variar a taxa de remoção, modificando-se apenas o valor de a_p , sem afetar o valor de μ_c .

$$\mu_c = \frac{P_C}{Q} \quad (8)$$

Alguns pesquisadores, por exemplo, Gutowski et al. (2006), Balogun e Mativenga (2013) propuseram a expansão do conceito de energia específica e a sua utilização como um indicador da eficiência energética para máquinas-ferramenta. De forma simplificada, essa expansão é feita pela substituição de P_C por P_E , dando origem a uma nova grandeza denominada energia específica elétrica (μ_e), tal como redefinido pela Eq. (9).

$$\mu_e = \frac{P_E}{Q} \quad (9)$$

3. METODOLOGIA

A máquina-ferramenta utilizada neste estudo foi um torno mecânico convencional de barramento paralelo (modelo LG1760, CHMTI - Chongqing Machine Tool Group, China). Trata-se de uma máquina fabricada em 1995, porém em bom estado de conservação.

O referido torno possui dois motores elétricos. Um deles, o de menor porte, é utilizado no bombeamento de fluido de corte. Por uma questão de simplificação, ele foi mantido desligado, isto é, todos os ensaios foram executados sem resfriamento forçado.

O motor principal é um motor assíncrono de 4 polos, potência nominal de 4kW e rotação nominal de 1750 rpm. Ele é empregado na realização dos movimentos de corte e avanço. Sua ligação ao cabeçote fixo do torno se dá por meio de três correias trapezoidais lisas, tal como esquematizado na Fig. (1). O cabeçote fixo é uma caixa redutora composta de 27 engrenagens de dentes retos, 8 eixos, 18 rolamentos e 10 retentores, além do óleo lubrificante. As opções de rotações

estão divididas em três faixas: baixa, média e alta (vide R1 – Fig. (1)). Para cada uma dessas faixas, existe ainda a possibilidade de mais quatro engrenamentos (vide R2 – Fig. (1)), o que totaliza uma gama de 12 rotações.

O cabeçote fixo possui ainda outro trem de engrenagens (vide R3 – Fig. (1)) cuja função é a seleção de duas faixas de avanços: baixa e alta. A saída desse trem alimenta as engrenagens do recâmbio e essas a caixa de avanços, o que não está representado na Fig. (1).

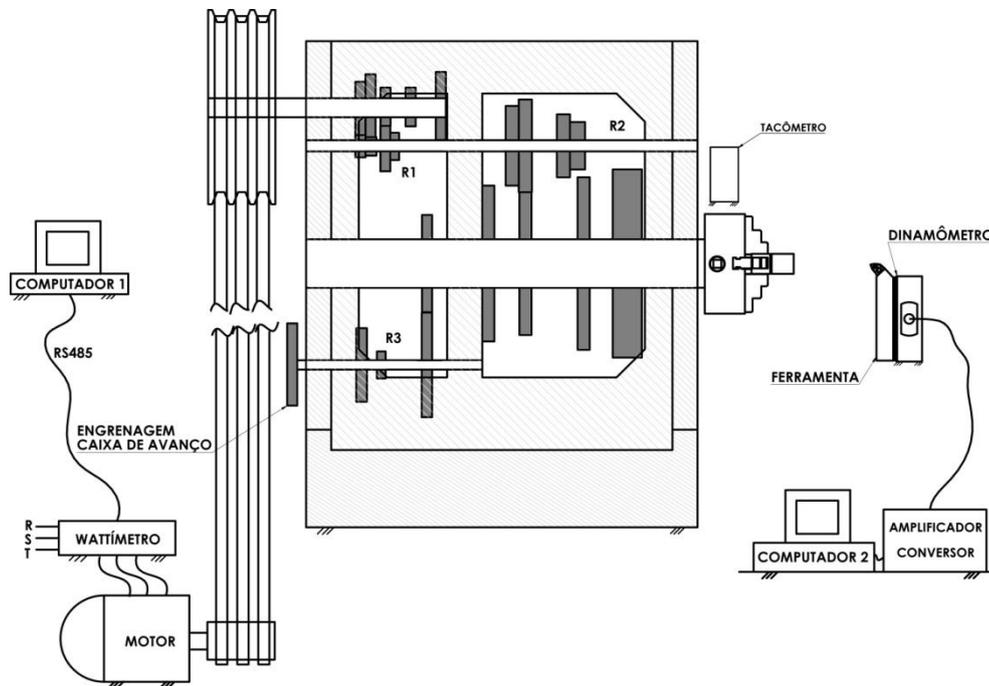


Figura 1. Representação esquemática dos sistemas de aquisição, motor e transmissão do torno.

O método clássico para a avaliação da eficiência de conversores de energia, tais como os motores elétricos, se baseia na variação do carregamento. Vide, por exemplo, a norma NBR 5383-1 (2000). Por se tratar de uma máquina ferramenta, a variação do carregamento pode ser feita pela variação da taxa de remoção (Q). As alterações na taxa de remoção podem ser conseguidas por meio da modificação de uma, de duas ou das três grandezas que a definem, tal como indicado na Eq. (2). Entretanto, por se tratar de um equipamento convencional, as variações na velocidade de corte (V_c) e no avanço (f) são mais difíceis de serem efetuadas.

Além disso, para que a energia específica de corte (μ_c) permaneça constante, tal como discutido anteriormente, optou-se por variar o carregamento por meio da profundidade de corte (a_p) dentro de uma faixa estreita de velocidade de corte. Para isso, foram selecionados oito valores de profundidade: 0,25;0,50;0,75;1,0;1,25;1,50; 1,75 e 2 mm, controlados com o auxílio de uma régua digital micrométrica.

Com o intuito de avaliar a eficiência da máquina com diferentes engrenamentos, as variações de carregamento mencionadas anteriormente foram repetidas para as rotações nominais de 515, 612 e 900 rpm. A rotação de 515 pertence à faixa baixa e as demais à faixa alta. Esses são valores nominais e estão indicados no painel frontal da máquina. Sabendo-se que os mesmos variam, principalmente durante o corte, os valores reais foram medidos manualmente por meio de um foto tacômetro (modelo MDT-2238, Minipa, Brasil).

Os ensaios foram realizados em um único corpo de prova de aço (ABNT 1045) com diâmetro de fixação de 100 mm e comprimento em balanço de 60 mm. Para evitar grandes variações na velocidade de corte, a sequência dos ensaios teve início com a rotação de 515 rpm e culminou com a rotação de 900 rpm. O diâmetro inicial do corpo de prova foi de 99 mm e o final de 49 mm. O avanço foi mantido constante em 0,25 mm/v.

A ferramenta de corte foi composta por uma pastilha de metal duro (WNMG060404-NF-IC907, Iscar, Brasil) montada em um porta-ferramenta MWLNR 2020K-06 (Sandvik, Brasil). Para cada uma das rotações, foi empregada uma aresta de corte nova.

As três componentes da força de usinagem – corte, avanço e passiva - foram medidas com o auxílio de um dinamômetro piezoelétrico (modelo 9129A, Kistler, Suíça), um conversor/amplificador de carga (modelo 5070A, Kistler, Suíça), uma placa de conversão analógico/digital (modelo CIO-DAS08, Measuring Computing, USA) e um microcomputador. Os dados brutos foram adquiridos com um programa dedicado implementado em MS Visual Basic[®], a uma taxa de amostragem de 120 Hz.

Após a aquisição dos dados brutos, os valores referentes às forças de corte e avanço foram processados. Sabendo-se de uma possível contaminação por ruído, os sinais foram filtrados com o auxílio de um filtro passa-baixo implementado numericamente em Matlab[®]. A frequência de corte do filtro empregado foi igual a 2,5% da taxa de amostragem.

O uso do procedimento exposto acima foi baseado numa análise prévia das funções de autocorrelação dos sinais adquiridos pelo dinamômetro, em que se assumiu que esses sinais eram compostos pelos sinais específicos das forças de interesse adicionados a ruídos aleatórios, ruídos esses não correlacionados com os sinais das forças de interesse (Shin e Hammond, 2008).

Foram, então, utilizados os valores médios dos sinais das forças de corte e avanço nos trechos correspondentes às operações de torneamento. Quando pertinente, foram subtraídos, desses valores médios, os valores médios dos trechos em que não havia torneamento (operação em vazio). A força passiva não teve seus valores analisados, pois eles não foram considerados neste estudo.

O motor elétrico principal foi monitorado durante os tempos em vazio (aproximação e afastamento da ferramenta) e em corte, possibilitando assim uma avaliação das perdas em vazio (D_z) e da potência ativa total durante o corte (P_E). A medição da potência foi efetuada com um wattímetro (modelo Multi-K 120, Kron, Brasil). Além da potência elétrica, esse instrumento possibilita a medição de vários parâmetros elétricos relacionados ao motor, tais como a frequência, fator de potência e a corrente trifásica. Os valores medidos foram exportados no formato digital através da interface RS485. A comunicação com o microcomputador foi feita em conformidade com o protocolo Modbus[®]. Um programa dedicado, também implementado em MS Visual Basic[®], foi desenvolvido para a comunicação e armazenagem dos dados referentes à potência ativa.

Os ensaios foram realizados após um aquecimento preliminar do torno. Durante esse intervalo, a potência ativa foi monitorada até que o valor medido indicasse uma estabilização do conjunto motor/transmissão. Esse período de estabilização é importante, pois a viscosidade do óleo varia com a temperatura e afeta o valor das perdas em vazio no redutor, tal como reportado por Michaelis et al. (2011).

Os indicadores de eficiência foram calculados conforme as Eqs. (6, 7 e 9) e correspondem aos métodos denominados aqui como direto (η_1), indireto (η_2) e energia específica elétrica (μ_c), respectivamente. As curvas características para o torno avaliado foram obtidas em função do carregamento (ρ) para os dois primeiros métodos. O valor de ρ foi determinado pela razão entre P_E e a potência nominal do torno, que neste caso é de 4kW. Para a energia específica, as curvas foram construídas em função da taxa de remoção (Q).

Pode-se demonstrar que ao dividir uma energia específica pela outra (μ_c/μ_e) obtém-se um indicador que, do ponto de vista quantitativo, é análogo aquele determinado pelo método direto (η_1). Como foi discutido anteriormente, o valor de μ_c deve permanecer constante, pois as variáveis de estudo, profundidade (a_p) e rotação (N), não deverão influenciá-lo significativamente. Diante disso, é razoável supor que μ_c pode ser substituído pelo seu valor médio ($\bar{\mu}_c$) a ser obtido experimentalmente, ficando esse novo indicador adimensional (η_3) definido na forma da Eq. (10).

$$\eta_3 = \frac{\mu_c}{\mu_e} \quad (10)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Tabelas (1) a (3) contêm os resultados das medições realizadas para as rotações nominais de 515, 612 e 900 rpm. Deve ser observado que os valores nominais (515, 612 e 900) são aqueles tabelados no painel da máquina. A coluna “Nr” nas três tabelas contêm os valores reais medidos com o tacômetro durante a fase de corte, ou seja, durante o contato ferramenta-peça. Além de serem diferentes dos valores nominais, as rotações reais diminuem à medida que o carregamento (ρ) aumenta. Esse comportamento era esperado, pois com o aumento da carga o escorregamento do motor também aumenta.

A variação da velocidade de corte ao longo dos ensaios pode ser vista nas colunas “ V_c ” das Tabs (1) a (3). O ideal seria realizar uma experimentação com V_c constante, porém isto não foi possível, devido às variações no diâmetro médio (d).

A Figura (2) contêm os resultados referentes à influência da profundidade de corte (a_p) sobre a força de corte (F_c) para as rotações de 515, 612 e 900 rpm. Pode-se determinar que a relação profundidade versus força foi, praticamente, linear. Para a rotação de 515 rpm, por exemplo, o ajuste linear apresentou uma correlação bem elevada ($R^2 > 0,998$). Entretanto, para a rotação de 612 rpm uma aparente redução de linearidade foi observada para valores maiores de profundidade ($a_p \geq 1,25\text{mm}$). Nessas condições, foi observada uma redução significativa da rigidez do processo devido, em parte, à redução do diâmetro torneado. Essa redução de rigidez foi tão significativa que impossibilitou a realização do ensaio com profundidade de 2 mm para a rotação de 900 rpm.

Não obstante a essa redução de rigidez, pode-se observar que o aumento das forças de corte se deveu somente ao aumento da profundidade de corte, embora uma pequena variação na velocidade tenha ocorrido ao longo dos ensaios. Isto permite afirmar que a variação da profundidade de corte é condição suficiente para variar o carregamento sobre o motor e a transmissão do torno. Além disso, a profundidade de corte, quando comparada à velocidade e o avanço, possui como vantagem a capacidade de ser variada com uma resolução muito fina dentro de uma ampla faixa, pois, no caso de tornos convencionais, independe de sua transmissão.

Tabela 1. Potência de corte, potência ativa e energia específica para a rotação nominal de 515 rpm.

a_p [mm]	Nr [rpm]	d [mm]	V_c [m/s]	F_c [N]	F_r [N]	Q [mm ³ /s]	P_C [W]	D_z [W]	P_E [W]	ρ [%]	η_1 [%]	μ_c [J/mm ³]	μ_c [J/mm ³]	η_2 [%]	η_3 [%]	
0,25	557	98,75	2,88	153	44	180,0	441	1352	1799	45,0	24,5	2,4480	9,996	24,9	23,3	
0,5	554	98	2,84	298	114	355,4	847	1351	2227	55,7	38,0	2,3840	6,266	39,3	37,2	
0,75	552	96,75	2,79	434	184	524,0	1212	1379	2647	66,2	45,8	2,3125	5,052	47,9	46,1	
1	549	95	2,73	555	243	682,8	1516	1375	2965	74,1	51,1	2,2196	4,342	53,6	53,7	
1,25	547	92,75	2,65	706	324	829,6	1873	1366	3353	83,8	55,9	2,2576	4,042	59,3	57,7	
1,5	545	90	2,57	850	416	962,4	2180	1381	3717	92,9	58,7	2,2653	3,862	62,8	60,4	
1,75	542	86,75	2,46	1024	557	1076,6	2520	1365	4100	102,5	61,5	2,3406	3,809	66,7	61,2	
2	541	83	2,35	1152	660	1174,5	2706	1385	4342	108,6	62,3	2,3040	3,697	68,1	63,1	
			\bar{V}_c	2,66				\bar{D}_z	1369				$\bar{\mu}_c$	2,3165		
			s(V_c)	0,18				s(D_z)					s(μ_c)	0,0690		

Tabela 2. Potência de corte, potência ativa e energia específica para a rotação nominal de 612 rpm.

a_p [mm]	Nr [rpm]	d [mm]	V_c [m/s]	F_c [N]	F_r [N]	Q [mm ³ /s]	P_C [W]	D_z [W]	P_E [W]	ρ [%]	η_1 [%]	μ_c [J/mm ³]	μ_c [J/mm ³]	η_2 [%]	η_3 [%]	
0,25	662	79,55	2,76	158	47	172,3	435	1500	1948	48,7	22,3	2,5248	11,310	23,0	20,6	
0,5	658	78,8	2,72	297	118	339,5	807	1475	2328	58,2	34,7	2,3768	6,857	36,6	34,0	
0,75	655	77,55	2,66	443	194	498,4	1176	1539	2777	69,4	42,3	2,3600	5,573	44,6	41,8	
1	653	75,8	2,59	555	246	647,5	1436	1537	3060	76,5	46,9	2,2180	4,726	49,8	49,3	
1,25	651	73,55	2,51	632	286	783,0	1584	1519	3212	80,3	49,3	2,0230	4,103	52,7	56,8	
1,5	647	70,8	2,40	860	435	898,7	2061	1513	3758	93,9	54,8	2,2928	4,181	59,7	55,8	
1,75	643	67,55	2,27	1070	605	995,1	2434	1503	4196	104,9	58,0	2,4457	4,217	64,2	55,3	
2	639	63,8	2,13	1363	814	1067,0	2909	1455	4712	117,8	61,7	2,7260	4,416	69,1	52,8	
			\bar{V}_c	2,50				\bar{D}_z	1505				$\bar{\mu}_c$	2,3709		
			s(V_c)	0,21				s(D_z)	27				s(μ_c)	0,1956		

Tabela 3. Potência de corte, potência ativa e energia específica para a rotação nominal de 900 rpm.

a_p [mm]	Nr [rpm]	d [mm]	V_c [m/s]	F_c [N]	F_r [N]	Q [mm ³ /s]	P_C [W]	D_z [W]	P_E [W]	ρ [%]	η_1 [%]	μ_c [J/mm ³]	μ_c [J/mm ³]	η_2 [%]	η_3 [%]	
0,25	953	59,75	2,98	150,5	43,14	186,2	448	1775	2295	57,4	19,5	2,4080	12,321	22,6	18,9	
0,5	949	59	2,93	281,3	108	366,4	825	1721	2589	64,7	31,8	2,2504	7,066	33,5	33,0	
0,75	944	57,75	2,85	428,6	186	535,1	1223	1587	2900	72,5	42,2	2,2859	5,419	45,3	43,0	
1	939	56	2,75	577,8	256,1	688,6	1592	1602	3313	82,8	48,0	2,3112	4,811	51,6	48,5	
1,25	936	53,75	2,63	719,1	332,5	823,3	1895	1616	3671	91,8	51,6	2,3011	4,459	56,0	52,3	
1,5	931	51	2,49	840,3	408,8	932,0	2089	1640	3929	98,2	53,2	2,2408	4,216	58,3	55,3	
1,75	926	47,75	2,31	1025	570,6	1012,5	2372	1677	4449	111,2	53,3	2,3429	4,394	62,3	53,0	
			\bar{V}_c	2,71				\bar{D}_z	1660				$\bar{\mu}_c$	2,3057		
			s(V_c)	0,23				s(D_z)	64				s(μ_c)	0,0529		

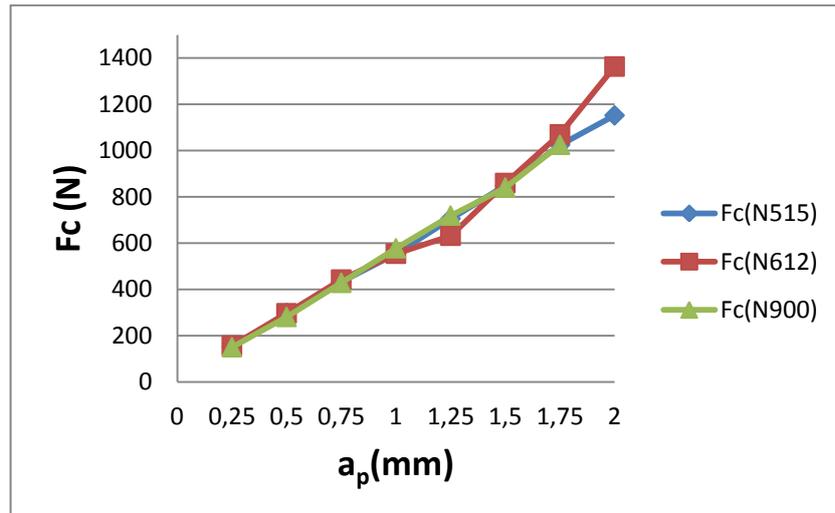


Figura 2. Influência da profundidade de corte (a_p) sobre a força de corte (F_c) para as três rotações avaliadas.

Ainda observando os resultados apresentados nas Tabs. (1) a (3), verificam-se valores bem elevados para a força de avanço. Em princípio, isso pode sugerir a inclusão da potência de avanço no cálculo da potência mecânica, tal como previsto pela Eq. (3). Entretanto, o seu valor é muito baixo, pois a velocidade de avanço para, por exemplo, a rotação de 900 rpm foi de apenas 0,00375 m/s.

Nas colunas rotuladas como “ D_z ” das referidas tabelas, pode-se observar o comportamento das perdas em vazio. Verifica-se que o valor médio das perdas aumenta com o aumento da rotação. Isto era esperado, pois o aumento da velocidade angular nas engrenagens implica uma maior energia dissipada. Em princípio, como houve um pré-aquecimento da máquina antes dos ensaios, esperava-se um valor quase constante de D_z para a mesma rotação. Entretanto, o desvio padrão (s) dos valores medidos para a mesma rotação e, principalmente para a rotação de 900 rpm, não confirma esta suposição.

Existem duas hipóteses para essa variância elevada de D_z . A primeira delas considera que houve um pré-aquecimento inadequado, o que influenciou na viscosidade do óleo durante os ensaios. De acordo com Michaelis et al. (2011), dependendo da rotação das engrenagens, um aumento de viscosidade do óleo lubrificante implica o aumento das perdas. A confirmação disto poderia ter sido feita pelo monitoramento da temperatura no interior do redutor, mas infelizmente isto não foi realizado nesta experimentação.

A segunda hipótese leva em conta possíveis variações na tensão de alimentação do motor. Durante o trecho em vazio ($a_p = 0,25$ mm e N900), o seu valor médio foi de 208,5 V com um desvio padrão de 0,09 V. Para outro trecho em vazio ($a_p = 0,75$ mm e N900), o seu valor médio foi de 207,2 V com um desvio padrão de 0,07 V. Embora essa diferença possa parecer pequena, um volt corresponde, para as condições ensaiadas, a uma variação de, aproximadamente, 7,5 watt.

A Figura (3) contém, na forma gráfica, as estimativas da eficiência (η_1) em função do carregamento (ρ) aplicado ao motor, conforme o método direto descrito pela Eq. (6). Os valores de carregamento foram normalizados com um mínimo de 50%, máximo de 110% e incremento de 10% e novos valores de eficiência foram recalculados a partir de uma interpolação cúbica dos valores reportados nas Tabs. (1) a (3).

As curvas mostradas na Fig. (3) se assemelham muito às curvas de rendimento obtidas em ensaios de motores elétricos, tal como reportado, por exemplo, por Auinger (2001). A partir delas, pode-se inferir que, para uma dada rotação, o aumento do carregamento (ρ) implica um maior rendimento (η). Do ponto de vista prático, o indicador η_1 possui a vantagem de ser adimensional. Isto possibilita ao usuário modificar o projeto da máquina com a perspectiva de aumentar sua eficiência.

Entretanto, do ponto de vista operacional o usuário deve, primeiramente, executar a operação, medir o carregamento e, então, estimar a eficiência a partir das curvas dadas. Ou seja, ele não tem como conhecer, a priori o valor do carregamento em função das variáveis de processo. Em outras palavras: não se pode afirmar que o torno é mais eficiente quando operado na rotação de 515 rpm, pois cada mudança de rotação implica um novo carregamento.

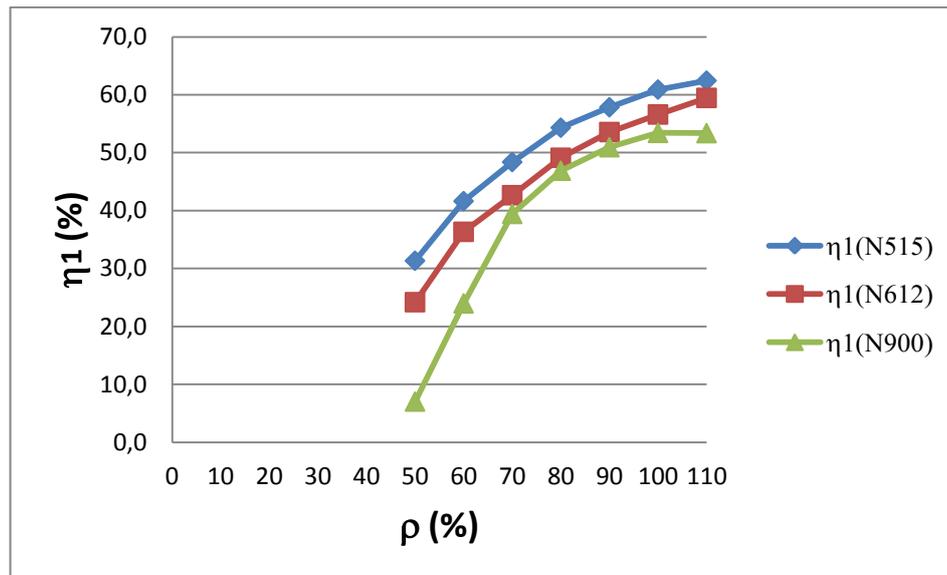


Figura 3. Eficiência (η_1) em função das variações de carregamento (ρ) para as três rotações avaliadas.

A análise da coluna “ η_2 ” das Tabs. (1) a (3) revela que a eficiência obtida pelo método indireto, tal como definido pela Eq. 7, está superestimada em relação ao método direto. Esta superestimação ocorre pelo aumento das perdas em função do aumento da carga, tanto no motor como no cabeçote fixo, tal como demonstrado, por exemplo, por Auinger (2001) para motores elétricos e por Magalhães et al. (2010) no estudo da eficiência de redutores. Em outros termos: $(P_E - D_Z) > P_C$. Por conseguinte, a menos que esse efeito seja conhecido, o método indireto não deve ser empregado para a estimação da eficiência energética de tornos mecânicos.

A energia específica elétrica (μ_e) é outra maneira de apresentar a eficiência, porém utilizando um indicador dimensional, tal como definido pela Eq. (9). A Figura (4) contém as curvas de energia específica para diferentes valores de taxa de remoção. Essas curvas foram obtidas também pela interpolação cúbica dos valores reportados nas colunas “ μ_e ” das Tabs. (1) a (3).

A utilização da taxa de remoção, ao invés do carregamento, no eixo das abscissas tem como vantagem uma maior informação relacionada ao processo de torneamento. Dispondo de tais curvas, o operador pode decidir, sem conhecer as características do motor, se é mais vantajoso, por exemplo, executar a operação em uma ou duas passadas. Obviamente que, em condições práticas, essa decisão não depende apenas da eficiência, mas principalmente do sobrematerial disponível e também de outras restrições impostas ao processo, tais como a capacidade da ferramenta e a rugosidade desejada.

Por outro lado, a análise da eficiência, baseada no valor de μ_e , tem como limitação o desconhecimento de um valor ideal de energia específica que sirva de referência para, por exemplo, avaliar se o projeto atual da máquina ainda pode ser melhorado.

A Figura (5) contém as curvas de eficiência ($Q-\eta_3$) criadas a partir do método sintetizado pela Eq. (10). Para a construção das mesmas, o valor médio de μ_e foi calculado pela média aritmética das médias registradas nas Tabs. (1) a (3). Essas curvas foram obtidas também pela interpolação cúbica dos novos valores de η_3 . Pode-se observar que essas curvas se assemelham às aquelas apresentadas na Fig. (3), embora estejam ligeiramente deformadas nas extremidades (N612 e N900), principalmente para os valores mais elevados de taxa de remoção. Essas deformações foram causadas pelas variações da energia específica mecânica individual (μ_c) em relação ao valor médio ($\bar{\mu}_c$) adotado aqui.

Não obstante, a grande vantagem apresentada por esse método reside na possibilidade de se utilizar um valor de referência para a energia específica mecânica ($\bar{\mu}_c$), o qual não precisa ser obtido na máquina sob avaliação. Esse valor pode ser, por exemplo, gerado a partir de um ensaio padronizado e armazenado para aplicações futuras. Com a utilização de um $\bar{\mu}_c$ padrão, o emprego do dinamômetro poderá ser dispensado, tornando as avaliações de eficiência mais fáceis e menos custosas.

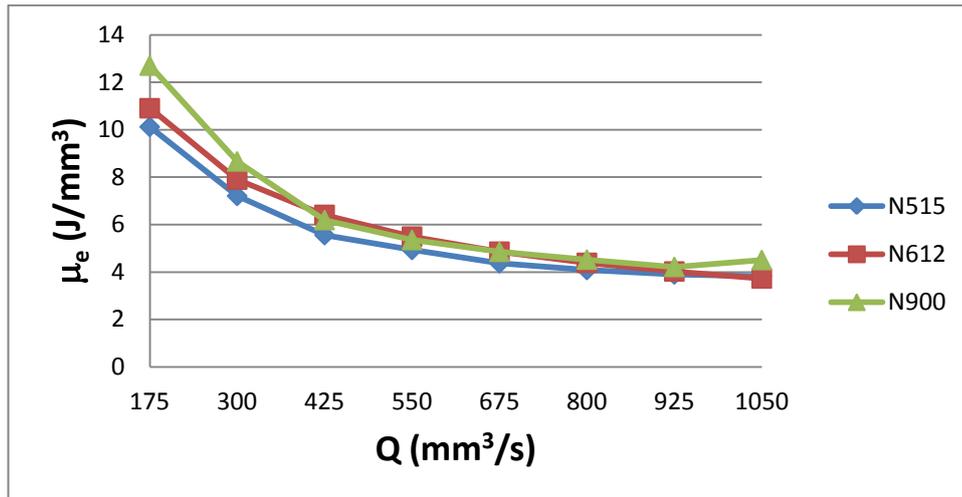


Figura 4. Variação da energia específica elétrica (μ_e) em função da taxa de remoção (Q) para as três rotações avaliadas.

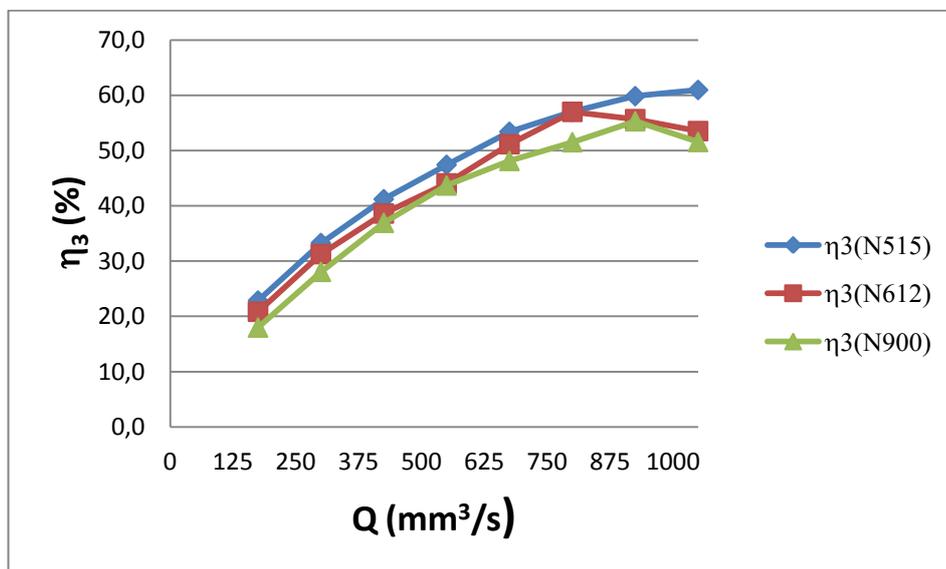


Figura 5. Variação da eficiência (η_3) em função das variações da taxa de remoção (Q) para as três rotações avaliadas.

5. CONCLUSÕES

Baseando-se no procedimento experimental aqui conduzido e nos resultados obtidos, pode-se concluir o seguinte:

- i) O método indireto, conforme Eq. (7), não deve ser empregado para a avaliação da eficiência energética de tornos convencionais, pois produz uma superestimação da mesma, quando comparado ao método direto;
- ii) Embora o método direto, conforme Eq. 6, possua uma utilização mais ampla, pois produz um indicador adimensional largamente utilizado na avaliação e melhoria de outros produtos, a sua execução é mais onerosa, pois depende de um instrumentação muito dedicada, tal como o dinamômetro utilizado neste estudo;
- iii) Por outro lado, o método para a análise da eficiência baseada na energia específica elétrica, conforme Eq. (9), é mais simples e menos oneroso, pois depende apenas da utilização de um wattímetro. Além disso, o seu indicador propicia ao operador do torno mais informações sobre o consumo de energia do processo. Entretanto, as modificações no projeto da máquina dependem de um referencial que esse método não pode prover; e
- iv) O método alternativo proposto neste trabalho, definido conforme a Eq. (10), reúne os aspectos positivos do método direto e daquele baseado na energia específica. Além de propiciar informações sobre o processo, ele possibilita realizar melhorias no projeto da máquina. Outro aspecto importante deste método é a possibilidade de seu emprego para a avaliação de tornos convencionais com potências nominais diferentes.

6. AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem à Kron Instrumentos Elétricos Ltda pela cessão do wattímetro utilizado no trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- ABNT, 2002, “NBR 5383-1 - Máquinas elétricas girantes. Parte 1: Motores de indução trifásicos – Ensaios” 62 p.
- Auinger, H., 2001, “Efficiency of electric motors under practical conditions”, Power Engineering Journal, Vol. 15, pp. 163-167.
- Clark, J.A., 1986, Private Communication, University of Michigan, Ann Harbor.
- Balogun, V.A. and Mativenga, P.T., 2013 “Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes,” J. Clean. Prod, Vol. 41, pp. 179–186.
- Da Costa, D.D., et al., 2010 “Monitoramento da eficiência elétrica em processos de usinagem”, Máquinas e Metais, Vol. 46 (533), pp. 88-107.
- Gutowski, T. et al, 2006, “Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes”, Proc. 13th CIRP Intl. Conf. on Life Cycle Engineering, pp. 623-627.
- Kara, S., Li, W., 2011, “Unit process energy consumption for material removal processes”. CIRP Ann. - Manuf. Technol. Vol. 60 (1), pp. 37-40.
- Magalhaes, L. et al., 2010, “Influence of tooth profile and oil formulation on gear power loss”, Tribology International, Vol. 43, pp. 1861-1871
- Michaelis, K. et al., 2011, “Influence factors on gearbox power loss” Ind. Lubr. Tribol. Vol. 63 pp. 46-55
- Mori, M., et al., 2011, “A study on energy efficiency improvement for machine tools”, CIRP Ann. Manuf. Technol. 60 (1), pp. 145-148
- Rodrigues, A.R. and Coelho, R.T., 2007, "Influence of the tool edge geometry on specific cutting energy at high-speed cutting", J Braz Soc Mech Sci Eng, Vol. 29, No. 3, pp. 279-283.
- Shaw, M. C., 2005, “Metal Cutting Principles, Oxford University Press, New York, USA, 672 p.
- Shin, K. and Hammond, J. K., 2008, “Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers” , John Wiley & Sons, 416 p.
- Simon, A. T., 2013 “XII Inventário MM: as máquinas-ferramenta de usinagem instaladas no parque industrial brasileiro” Maquinas e Metais , Vol. 575, pp. 24-48.
- Velchev, S. et al, 2014, “Empirical models for specific energy consumption and optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning”, J. Clean. Prod., Vol 52, pp. 139-149.
- Zein A., 2012, “Transition towards energy efficient machine tools”, Springer-Verlag, 2012, 159 p.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

ENERGY EFFICIENCY EVALUATION OF CONVENTIONAL LATHES BASED ON THE MEAN VALUE OF SPECIFIC CUTTING ENERGY

Alessandro Marques, amarques@ufpr.br¹
Dalberto Dias da Costa, dalberto@ufpr.br¹
Eduardo Márcio de Oliveira Lopes, eduardo_lopes@ufpr.br¹
Mauricio Klein Gussoli, mauriciogussoli@hotmail.com¹

¹Universidade Federal do Paraná – Departamento de Engenharia Mecânica. Rua Francisco H. dos Santos, nº. 210 - Centro Politécnico / Setor de Tecnologia - Bairro: Jardim das Américas - Curitiba-PR - CEP: 81531-980 - Caixa Postal: 19011

Abstract: A machine tool is considered a complex product the energy efficiency of which is very difficult to determine. The specialized literature contains several approaches developed to the evaluation of numerical control machines, but almost none of them are appropriate to evaluate conventional ones. The objective in this work is to propose an alternative method to assess the energy efficiency of conventional lathes. This method is a combination of those found in the literature with a new indicator based on the mean value of the specific cutting energy. The measurement instruments employed here comprise a piezoelectric dynamometer, a digital tachometer and a wattmeter. All the tests were straight turning operations with AISI 1045 steel bar and cemented carbide tools. The achieved results, based on the analyzed machining conditions, indicate that the proposed method can be adopted to compare the efficiency of conventional lathes with different nominal power.

Keywords: energy efficiency, conventional lathes, specific cutting energy