

ANÁLISE DAS PERDAS DE ENERGIA NO PROCESSO DE TORNEAMENTO CONVENCIONAL

Dalberto Dias da Costa, dalbertoddc@gmail.com¹

André Chiconi Rialto, rialtoandre@gmail.com¹

Maurício Klein Gussoli, mauriciogussoli@gmail.com¹

Wesley Menezes Guimarães, wesleyguimaraes@ufpr.br¹

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 Dentro de um dado parque de máquinas-ferramenta existe uma grande variedade de tipos de máquinas, dentre os quais se destacam os tornos. Esses, dada a sua simplicidade de projeto e facilidade de operação são escolha obrigatória para a produção de peças compostas de superfícies de revolução. Apesar da grande disseminação dos tornos equipados com comando numérico computadorizado (CNC), a utilização dos tornos convencionais ainda predomina em algumas empresas; sendo uma boa alternativa para a usinagem de lotes pequenos, ou unitários, e para a manutenção de peças grandes. Apesar de ser uma máquina baseada em uma tecnologia antiga e amplamente dominada, pouco tem sido publicado no tocante à eficiência energética dos tornos convencionais, tanto no aspecto construtivo (projeto) como operacional (produção). Diante disso, o objetivo desse trabalho é analisar as perdas de energia que ocorrem durante a operação de tornos convencionais e relacioná-las com suas características construtivas e operacionais. Os experimentos foram realizados em um torno mecânico convencional de barramento paralelo. As perdas de energia foram avaliadas separadamente, no motor e na transmissão com diferentes engrenamentos com máquina operando em vazio e durante a usinagem com diferentes valores de profundidade de corte. Além disso, foi avaliada também a relação entre a temperatura do óleo lubrificante, medida sobre o cabeçote fixo, com as perdas de energia na transmissão. A partir dos dados obtidos, foi possível concluir que a potência ativa, medida durante a operação em vazio da máquina, diminui com o aumento do tempo de operação até que o sistema de transmissão atinja uma temperatura de estabilização.

Palavras-chave: Usinagem, torneamento, eficiência energética, perdas de energia

1. INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem por geometria definida são largamente utilizados na indústria metalmeccânica. A grande disseminação desses processos se deve, em parte, à capacidade deles em produzir componentes com baixo tempo e elevada repetibilidade, associado a um custo energético relativamente baixo. Historicamente, prezou-se pelas premissas de repetibilidade e altas taxas de remoção, ao invés da eficiência energética.

Entretanto na última década, vários pesquisadores, tais como (Waide e Brunner, 2011 e Gutowski, et al., 2006) vem propondo alternativas para o projeto, e também para a utilização, de máquinas e ferramentas mais eficientes do ponto de vista do consumo de energia. A incorporação da eficiência energética como quesito para o projeto de máquinas-ferramenta objeto de normalização internacional (ISO, 2014) e investimentos por parte da comunidade europeia (Velchev, et al., 2014).

O entendimento de que a eficiência energética das máquinas-ferramenta deve ser uma política de Estado não deriva da avaliação do consumo de energia de uma máquina individual, o qual geralmente é baixo, mas sim do fato de que países industrializados possuem grandes parques de máquinas.

Dentro de um dado parque de máquinas-ferramenta, dotado de grande variedade de tipos, dentre os quais se destacam os tornos. Esses, dada a sua simplicidade de projeto e facilidade de operação são escolha obrigatória para a produção de peças compostas de superfícies de revolução.

Apesar da grande disseminação dos tornos equipados com comando numérico computadorizado (CNC), a utilização dos tornos convencionais ainda predomina em empresas pequenas; sendo uma boa alternativa para a usinagem de lotes pequenos, ou unitários, e para a manutenção de peças grandes.

Apesar de ser uma máquina baseada em uma tecnologia antiga e amplamente dominada, pouco tem sido publicado no tocante à eficiência energética dos tornos convencionais, tanto no aspecto construtivo (projeto) como operacional (produção).

Diante disso, o objetivo desse trabalho é analisar as perdas de energia que ocorrem durante a operação de tornos convencionais e relacioná-las com as suas características construtivas e operacionais.

Este artigo segue organizado, além da lista de referências bibliográficas, em mais quatro seções. Na próxima seção será apresentada uma síntese da literatura referente aos aspectos construtivos e operacionais de um torno convencional e suas influências nas perdas de energia. Em seguida será apresentada uma metodologia para a avaliação das perdas de

energia em máquinas convencionais. Na quarta seção serão apresentados e discutidos os resultados de um estudo de caso. Por último, serão apresentadas as principais conclusões e as perspectivas para extrapolação da análise e metodologia aqui apresentadas.

2. PERDAS DE ENERGIA EM MÁQUINAS CONVENCIONAIS

Nos processos de usinagem com geometria definida, o controle da velocidade e da posição da ferramenta em relação à peça é essencial para assegurar uma produção com elevada repetibilidade.

Os recursos empregados no controle da velocidade e posição definem os tipos de máquinas, os quais são, geralmente, denominadas como programáveis ou convencionais. As primeiras são equipadas com tecnologia CNC (Comando Numérico Computadorizado), o que possibilita a variação e o controle da velocidade e posição da ferramenta/peça em intervalos extremamente pequenos (Pressman e Williams, 1977).

Por outro lado, nas máquinas denominadas como convencionais, a velocidade pode ser mantida constante para alguns movimentos, tais como o avanço e a rotação, mas não podem ser modificados ao longo da trajetória da ferramenta. Além disso, a posição da ferramenta em relação à peça só pode ser controlada pelo operador, seja pela interrupção do movimento durante o processo, ou por meio de chaves de fim de curso reguladas antes do início da usinagem.

Nas máquinas programáveis, a velocidade é controlada pela variação da frequência elétrica dos motores. Contrariamente, nas máquinas convencionais a velocidade dos motores é sempre constante e a velocidade dos movimentos peça/ferramenta só pode ser modificada por meio de uma transmissão mecânica.

Em um torno convencional, o fluxo da energia demandada pela remoção de material pode ser esquematicamente representado pelo diagrama da Figura 1. Os modelos mais simples de tornos são equipados com dois motores elétricos e um sistema de iluminação auxiliar (não representado na Fig. 1). O motor principal é empregado nos movimentos de corte e avanço; enquanto o secundário – de menor porte – é utilizado para acionar a bomba de fluido de corte, cujo propósito é lubrificar e resfriar a interface ferramenta/peça.

O motor secundário é, na maioria dos casos, de pequeno porte e trabalha com carregamento constante. Por outro lado, o principal possui maior potência nominal e opera com carregamento variável. Por essas duas características, o escopo deste trabalho se restringe à energia convertida pelo motor principal.

A energia elétrica que entra no motor principal é consumida de dois modos: trabalho mecânico e perdas. O trabalho mecânico compreende a parcela utilizada para a remoção de material. Por outro lado, as perdas representam a fração de energia que não foi convertida em trabalho. Ambas as parcelas resultam em calor, ruído e vibrações, além de uma pequena fração, oriunda do trabalho mecânico, que permanece na peça, na forma de tensões residuais.

Existem duas alternativas para redução do consumo de energia elétrica. A primeira está relacionada com a diminuição das perdas, por meio de melhorias no projeto da máquina. A segunda está ligada à adoção de condições operacionais que demandem menos energia para a remoção de material.

A potência elétrica medida na entrada do motor (P_E), quando este se encontra acoplado à carga, pode ser determinada, tal como indicado pela Eq. 1, onde T é o torque em Nm, ω é velocidade angular em rad/s e η_G é o rendimento global.

$$P_E = \frac{T\omega}{\eta_G} \quad (1)$$

Em operações de torneamento longitudinal com velocidade de corte (v_c) constante, a Eq. 1 pode ser desenvolvida em função da força de corte e apresentada na forma da Eq. 2, sendo que o produto $F_C v_c$ corresponde à potência de corte (P_C).

$$P_E = \frac{F_C V_C}{\eta_G} = \frac{P_C}{\eta_G} \quad (2)$$

Caso seja possível medir com precisão os valores de F_C e v_c , a solução da Eq. 2 ficará restrita à determinação do rendimento global (η_G). Este, por sua vez pode ser expresso em função da perda global (D_G) e representado por meio da Eq. 3

$$\eta_G = \frac{P_C}{P_C + D_G} \quad (3)$$

De acordo com o fluxo de energia em um torno convencional (Fig. 1), a perda global (D_G) é a soma das perdas que ocorrem no motor (D_M), no conjunto polia-correia (D_{PC}), nas transmissões (D_T e D_A) e nas guias (D_B). Dessa forma, o valor de D_G , pode ser obtido por meio da Eq. 4 (Da Costa, et al., 2010).

$$D_G = D_M + D_{PC} + D_T + D_A + D_B \quad (4)$$

2.1. Perdas de Energia no Motor Elétrico

Um motor elétrico pode ser compreendido como sendo um conversor de energia elétrica em energia mecânica. Nesse processo de conversão, parte a potência elétrica de entrada (P_E) é dissipada pelo próprio motor na forma de perdas (D_M), o que resulta em uma eficiência (η_M) sempre inferior a 100%, tal como definido pela Eq. 5.

$$\eta_G = \frac{P_E - D_M}{P_E} \quad (5)$$

As perdas que ocorrem no motor (D_M) podem ser separadas nos seguintes tipos (ABNT, 2002): perdas por efeito Joule no estator (D_{ME}) e no rotor (D_{MR}); perdas no núcleo (D_{MN}); perdas mecânicas (D_{MM}) devido ao atrito nos mancais e à ventilação e, por fim, em perdas suplementares (D_{MS}).

Entretanto, a determinação da perda total, ou de suas parcelas, não é uma tarefa trivial, pois demanda o emprego de métodos específicos e difíceis de serem aplicados em campo, isto é, com o motor montado à máquina-ferramenta. Além disso, as parcelas D_{ME} , D_{MR} e D_{MS} aumentam com o aumento da corrente elétrica, ou seja, com o aumento do carregamento imposto ao motor. Para as duas primeiras parcelas esse aumento é proporcional ao quadrado da corrente.

2.2. Perdas de Energia na Transmissão Mecânica

Nos tornos convencionais, a transmissão mecânica é composta de três conjuntos: polia-correia; cabeçote fixo (reductor principal) e caixa de avanços (reductor secundário). Esses três conjuntos são fisicamente interligados de tal forma a prover um movimento sincronizado entre a rotação da peça e o avanço da ferramenta.

O conjunto polia-correia é composto de duas polias, sendo uma delas engastada ao rotor do motor principal e a segunda engastada ao eixo motriz do cabeçote fixo. Na maioria das aplicações, a sua utilização se justifica pela necessidade de acomodação do motor principal e redução do seu peso sobre a estrutura da máquina, como também pela alteração na relação de transmissão.

As perdas no conjunto polia-correia (D_{PC}) dependem muito do tipo de correia adotado, do alinhamento entre a correia e a polia, do ângulo de contato, do torque a ser transmitido e da velocidade (Gates, 2014 e Balta, et al., 2015). De um modo geral, para um sistema bem alinhado e em boas condições de conservação, a sua eficiência situa-se na faixa de 95 a 98%.

Segundo alguns pesquisadores, por exemplo Balta, et al. (2015) e fabricantes, por exemplo Gates (2014) as correias dentadas apresentam eficiência superior em relação àquelas com seção trapezoidal lisa. A justificativa para esse melhor desempenho encontra-se, basicamente, em dois fatores maior flexibilidade - maior facilidade de dobramento sobre a polia - e menor, ou quase nenhum, escorregamento.

A determinação, em campo, da real eficiência de um sistema polia-correia é, também, de extrema dificuldade. Os resultados mais confiáveis só podem ser obtidos em laboratórios e em bancos de teste desenvolvidos especialmente para isso (Balta, et al., 2015).

Na transmissão existente no cabeçote fixo e na caixa de avanço, as perdas (D_T e D_A) ocorrem nas engrenagens, nos mancais, nos elementos de vedação e elementos auxiliares. Elas são classificadas em dois tipos (Magalhães, et al., 2009): perdas devidas ao carregamento e perdas em vazio (sem carregamento).

As perdas devidas ao carregamento são dependentes, basicamente, da carga transmitida, do coeficiente de atrito e da velocidade de deslizamento das áreas de contato (engrenagens e mancais). As perdas em vazio estão relacionadas com a energia despendida na agitação do óleo. Por conseguinte, elas dependem da viscosidade e da densidade do lubrificante, da profundidade de imersão dos componentes no volume de lubrificante, como também da velocidade de rotação (Magalhães, et al., 2009).

No caso do torno convencional, as perdas no cabeçote fixo (D_T) são superiores às perdas da caixa de avanços (D_A). Isto se explica, baseando-se em que a maior parte da energia consumida no torneamento é utilizada para execução do movimento de corte, pois a velocidade de corte (v_c) é muito superior à velocidade de avanço (v_f). Além disso, a força de corte (F_c) também é superior à de avanço (F_f). Em condições práticas, pode-se esperar uma relação $v_c/v_f \approx 1000$ e $F_c/F_f \approx 2$. Isto justifica a ausência da potência de avanço na Eq. 2.

2.3. Perdas de Energia nas Guias

As guias desempenham um papel muito importante no desempenho de uma máquina-ferramenta. Sua função principal é dar suporte ao movimento de avanço, garantido que sua direção e velocidade não sejam afetadas durante a usinagem. No caso de tornos convencionais, as guias utilizadas são do tipo prismática no modelo rabo de andorinha (barramento transversal) e trapezoidal “V” (barramento longitudinal). Nesse tipo de guia o movimento é por deslizamento, o que faz com o coeficiente de atrito e a carga aplicada sejam os fatores que determinam as perdas.

O coeficiente de atrito e a carga normal, aplicados sobre a guia, determinam a força de atrito. A soma desta força com a força de avanço, multiplicada pela velocidade de avanço definem o valor da perda de energia nas guias (D_B). Considerando que a lubrificação sobre as guias seja eficiente e sabendo-se que o valor da velocidade de avanço é muito baixo, pode-se considerar que as perdas nas guias representam uma parcela muito pequena da perda total que ocorre em um torno convencional.

Não obstante, em máquinas CNC e em tornos de alta precisão, a adoção de outras alternativas para construção das guias, tais como os revestimentos poliméricos em guias convencionais, guias de rolamento, hidrostáticas, aerostáticas e magnéticas contribuem para a redução das perdas de energia (Altintas, et al., 2011).

A medição individual das perdas, em cada um dos sistemas que compõem o torno convencional, não é uma tarefa trivial e está fora do escopo deste trabalho. A metodologia apresentada na próxima seção se baseia na premissa de que as medições da potência elétrica na entrada do motor, da velocidade de rotação, da temperatura do cabeçote principal e da força de corte possibilitam uma estimativa confiável das perdas nos principais sistemas que compõem a máquina e, mais importante, da perda total.

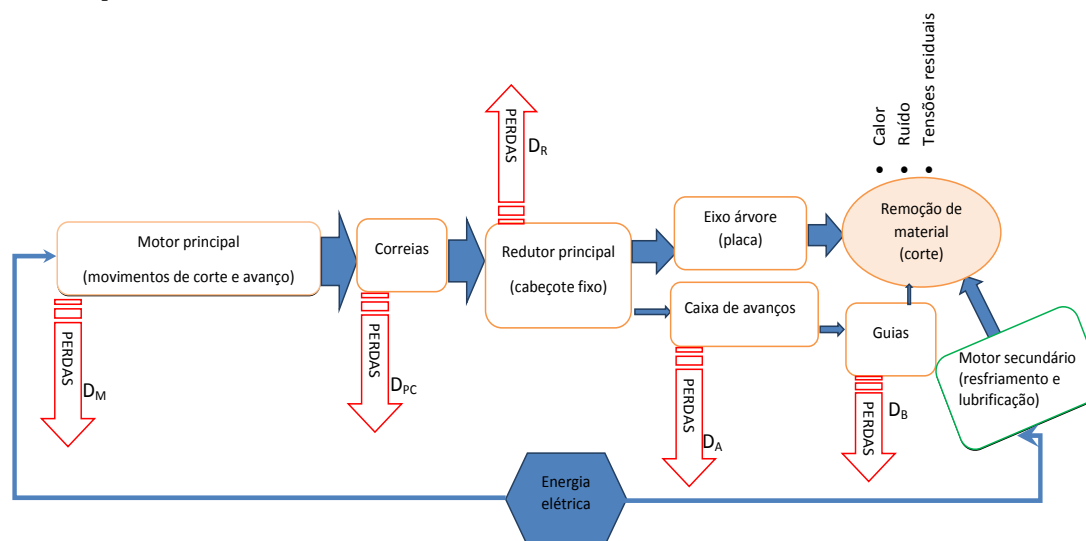


Figura 1. Esquemática do fluxo de energia em um torno convencional

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos realizados neste trabalho foram executados em um torno mecânico convencional de barramento paralelo (modelo LG1760, CHMTI - Chongqing Machine Tool Group, China), fabricado em 1995. Essa máquina é equipada com dois motores elétricos. O motor principal, responsável pelos movimentos de corte e avanço automático, é um motor de corrente alternada trifásico, com ligação em delta, 4 polos e potência nominal de 4kW. O segundo motor, de pequeno porte, é utilizado no bombeamento de fluido de corte, mas não foi levado em conta neste estudo.

A transmissão é composta de um sistema polia-correia equipado com três correias trapezoidais lisas tipo B26. O redutor principal é composto de três trens de engrenagens de dentes retos. Os dois primeiros possibilitam as 12 combinações diferentes, as quais resultam em 12 rotações disponíveis, cujos valores nominais são: 50; 72; 101; 147; 175; 253; 355; 515; 612; 900; 1239 e 1800 rpm. O último trem é utilizado para conexão com a caixa de avanços, possibilitando a mudanças no sentido e na velocidade de avanço.

A caixa de avanços é composta por três engrenagens de dentes retos (grade) e uma caixa composta de um sistema deslizante (duas posições) e um sistema Norton. Os avanços automáticos são transferidos para os carros transversais e longitudinais por meio de um eixo simples (vara), além de um fuso com rosca trapezoidal para as operações de roscamento.

Devido às dificuldades, reportadas anteriormente, para a avaliação precisa das perdas em cada um dos sistemas que compõem um torno convencional, neste trabalho foi adotada uma técnica simplificada, que consiste em realizar medições em diferentes condições de acoplamento de seus sistemas.

As perdas foram avaliadas por meio de um wattímetro digital (Mult K-120 – marca Kron). Esse instrumento foi instalado na alimentação do motor principal e os valores medidos, já no formato digital, foram transferidos ao um computador através de uma rede tipo RS-485. Os valores recebidos foram convertidos para o padrão RS232 e

processados no computador em conformidade com o protocolo Modbus®. A conversão dos valores recebidos, do formato Modbus® para o formato numérico decimal, foi efetuada por meio de um programa dedicado e implementado em MS-Visual Basic .Net (Da Costa, et al., 2010).

O referido instrumento possibilita a medição de vários parâmetros elétricos associados a um motor de corrente alternada, tais como tensão e corrente trifásicas, fator de potência, frequência e potências (aparente, reativa e ativa). Entretanto, as perdas de energia foram avaliadas somente pelos valores da potência elétrica ativa (P_E).

3.1. Medição da Potência e Temperatura durante o Período de Estabilização

Considerando que quase todos os sistemas que compõem o torno mecânico fazem uso de lubrificantes, é esperado que a potência elétrica, imediatamente após a sua energização, apresente um valor bem elevado, o qual deve se reduzir à medida que a temperatura dos lubrificantes aumente e, por conseguinte, as suas viscosidades sejam reduzidas. Esse período é aqui denominado como tempo de estabilização do torno.

O conhecimento desse tempo de estabilização é muito importante, pois a potência elétrica, medida antes de atingir esse tempo, poderá apresentar valores que irão comprometer a reprodutibilidade dos ensaios. A NBR 5383-1, item 5.3.3.1, define, para os motores elétricos, o seguinte; “a estabilização pode ser considerada alcançada quando a potência absorvida em vazio (ou acoplado a um dinamômetro desenergizado) não variar mais do que 3% entre duas leituras sucessivas à mesma tensão, em intervalos de 30 min”.

As medidas de temperatura e potência foram registradas para as rotações nominais de 147, 515 e 900 RPM. Os valores de potência correspondem à média aritmética dos valores lidos em intervalos de 10 min. As medidas de temperatura foram realizadas com um termômetro digital infravermelho (modelo RayngerST marca Raytek) a cada 10 minutos. Esses ensaios foram realizadas em dias diferentes, cujas temperaturas ambientes variaram entre 15 a 19 °C. Para obter o tempo de aquecimento do sistema, teve-se o cuidado de iniciar os testes com o sistema todo em temperatura ambiente, isto é, o torno estava em equilíbrio térmico com o ambiente. Apesar de a temperatura variar espacialmente, adotou-se um único ponto na tampa do cabeçote fixo, como referência para todos os ensaios.

3.2. Medição da Energia Dissipada no Motor

De acordo com a NBR 5383-1, a potência elétrica medida com o motor operando em vazio, isto é, sem estar acoplado a qualquer tipo de carga, corresponde à soma das perdas no estator (D_{ME}), no núcleo (D_{MN}) e aquelas de natureza mecânica (D_{MM}). Este método é utilizado para medição das perdas D_{MN} e D_{MM} , pois as perdas no estator são determinadas pela expressão I^2R , onde I é a corrente elétrica e R a resistência do enrolamento.

Entretanto, está fora do escopo deste trabalho a decomposição da perda de energia que ocorre no motor elétrico. Dessa forma, o objetivo deste registro foi indicar o valor dissipado apenas pelo motor, quando este se encontra totalmente desacoplado da transmissão. Em atendimento à NBR 5383-1, item 5.3.3.1 “Estabilização de perda no mancal”, os registros, após observação da condição de estabilização, corresponderam a uma média das potências lidas durante 5 min.

3.3. Medição da Energia Dissipada na Transmissão

A avaliação das perdas na transmissão foi realizada em duas etapas, com a máquina operando em vazio, isto é, sem formação de cavacos. Na primeira foi considerado apenas o cabeçote fixo (reductor principal), tal como justificado na Seção 2.2. Com o sistema previamente aquecido, foram efetuadas 12 medições, correspondentes às doze rotações disponíveis. Dessa forma, foram estimados, para cada um dos doze engrenamentos, os somatórios das parcelas D_M , D_{PC} e D_T , correspondentes, respectivamente, às perdas no motor, no conjunto polia-correia e na transmissão do cabeçote fixo.

Na segunda etapa, o redutor principal foi colocado em posição neutra, isto é, sem transferência de movimento para o eixo árvore (placa). O motor foi acoplado somente ao conjunto polia-correia e efetuou-se a medição da potência com o intuito de estimar a soma das perdas D_M e D_{PC} . Todos os valores registrados, em ambas as etapas, correspondem a uma média aritmética da potência ativa lida durante 3 minutos.

3.4. Medição da energia dissipada durante o Corte

Durante a etapa de corte todos os sistemas que compõem o torno estão acoplados. A medição durante essa etapa propicia realizar uma avaliação da perda de energia total do torno. Uma forma simplificada de se realizar isto, seria, para a rotação e avanço selecionados, medir a potência em vazio (D_{Z1}) antes que a ferramenta toque a peça e depois subtrair-la do valor medido durante o corte (ferramenta em contato com a peça). O resultado dessa subtração poderia ser utilizado como estimativa da potência de corte.

Entretanto, essa simplificação pode implicar em um erro grosseiro na determinação da potência de corte. Isto irá acontecer nos casos em que o carregamento e, por conseguinte, a corrente elétrica forem muito elevados. Isto ocorre

porque as perdas no estator (D_{ME}) e no rotor (D_{MR}) aumentam com o quadrado da corrente elétrica (Auinger, 2011). Além disso, as perdas suplementares (D_{MS}), assim como as perdas na transmissão (D_T) também aumentam com o aumento do carregamento.

Com o intuito de prover uma melhor estimativa para a perda total, foram adotados, neste trabalho, os resultados reportados por Marques et al (2015) referentes à determinação da potência de corte em operações de torneamento longitudinal.

No referido trabalho, a potência de corte (P_C) foi determinada por meio da relação $P_C = F_C v_c$. A força de corte (F_C) foi diretamente medida por meio de uma plataforma piezoelétrica com dinamômetro modelo 9122, marca Kistler e demais acessórios. A rotação real (N_R) foi medida sobre a placa de três castanhas por meio de um foto tacômetro (modelo MDT-2238 - marca Minipa).

Nesses ensaios, a rotação nominal foi mantida constante (515 rpm), assim como o avanço (0,25 mm/rev). A profundidade de corte foi a única variável (0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,25; 1,50; 1,75 e 2,0) mm. O material de teste foi uma barra de aço (ABNT 1045) com diâmetro inicial de 99mm e comprimento em balanço de 60mm. As oito operações de torneamento foram executadas por uma única ferramenta composta por uma pastilha de metal duro (WNMG060404-NF-IC907 - marca Iscar) montada em um porta-ferramenta (MWLN2020K-06 marca Sandvik).

As medições da potência elétrica contemplaram, para cada valor de profundidade de corte, três diferentes estágios. No primeiro, com a placa girando em rotação nominal de 515 rpm, a ferramenta percorreu, em velocidade de avanço, um comprimento de, aproximadamente, 30mm. A medição neste estágio foi realizada com o objetivo de estimar a perda de energia com a máquina operando em vazio, denominada aqui como D_{Z1} .

No segundo estágio, aonde ocorre o corte propriamente dito, a ferramenta desloca em um percurso de 50mm. A potência medida neste estágio (P_E) corresponde às somas de D_{Z1} , P_C e D_{Z2} . Se a soma ($D_{Z1} + P_C$) for subtraída de P_E , o resultado (D_{Z2}) será a estimativa para a perda decorrente do efeito do carregamento (potência de corte) sobre a transmissão e o motor.

Nos dois primeiros estágios, a velocidade de rotação foi registrada pelo tacômetro. No terceiro estágio, o movimento de avanço foi interrompido e a placa permaneceu girando, em rotação nominal, por um período aproximado de 20s.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2(a) contém os resultados das temperaturas medidas no cabeçote fixo durante 90min para as três rotações avaliadas. No instante inicial ($t = 0$) as três temperaturas apresentam valores ligeiramente diferentes (variação entre 18 a 20 °C). A explicação para essa diferença está na variação da temperatura ambiente, pois os três ensaios foram realizados em dias diferentes.

Pode ser observado também que após um intervalo de, aproximadamente, 30min existe um ordenamento dos valores de temperatura em função das rotações, isto é, quanto maior for a rotação maior será a temperatura. Este comportamento acontece porque a potência aumenta com o aumento da rotação, o que por conseguinte implica em maior transferência de calor dentro do cabeçote fixo.

Apesar do baixo tempo de monitoramento (90min), pode-se inferir que os valores das temperaturas apresentam um comportamento assintótico. Isto ficaria mais evidente, caso o tempo fosse maior. Entretanto, os dados obtidos estão em consonância com os resultados reportados por Magalhães et al (2009) em um estudo realizado para avaliar perdas de energia em caixas de câmbio sob diferentes condições de carga, rotação, engrenagens e lubrificantes.

A Figura 2(b) contém os resultados das variações das potências em função do tempo para as três rotações avaliadas. Pode-se observar que, até o instante de, aproximadamente 30min, a potência diminui para as três rotações. Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da temperatura (vide Fig. 2(b)) e, por conseguinte, em redução da viscosidade do óleo. Essa redução na viscosidade, por sua vez, implica na redução das perdas por agitação.

Após o tempo de 30min, valor aproximado para as três rotações, ocorre uma aparente estabilização da potência ativa. As diferenças observadas entre as três rotações podem ser explicadas pela Eq. 1

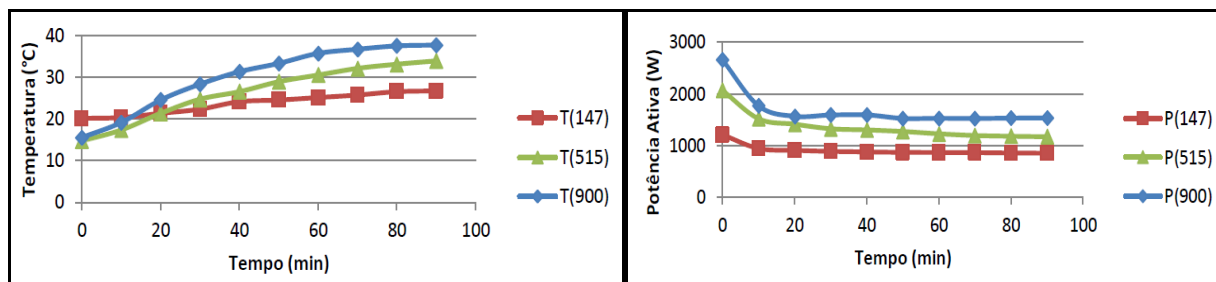


Figura 2. (a) Variação da temperatura em função do tempo para três diferentes rotações. (b) Variação da potência elétrica ativa em função do tempo para três diferentes rotações

A partir das medições realizadas com o motor totalmente desacoplado da transmissão (D_T) foi observado o comportamento apresentado na Fig. 3(a). Esse comportamento é semelhante aquele registrado na Fig. 2(b), isto é, marcado pela presença do período de estabilização. Para o motor partindo em temperatura ambiente, a potência inicial foi de, aproximadamente, 385W. Todavia, para os primeiros 120s, observou-se sua redução a uma taxa bem elevada ($\approx 0,33$ W/s). Após 20s, foi observado um patamar de estabilização, com um valor médio de 344W. Esse valor permaneceu, praticamente constante, mesmo após o encerramento dos ensaios para determinação do tempo de estabilização (vide Fig. 2(b)).

Deve ser observado que o valor de 350 W, registrado como perda para o motor operando em vazio, corresponde apenas a uma parte das perdas que, de fato, ocorrerão quando o motor estiver acoplado à carga. Apesar de ser subestimado, o valor de D_{MZ} possibilita afirmar que a eficiência energética do torno não poderá ultrapassar o limite de 91%, tendo em consideração que o motor aqui avaliado possui uma potência nominal de 4kW.

A Fig. 3(b) é uma montagem de duas medições realizadas em tempos distintos. O primeiro intervalo (0-120)s refere-se à potência medida com o motor totalmente desacoplado da transmissão e é equivalente ao patamar de estabilização mostrado na Fig. 3(a), cujo valor médio foi de 344W. O segundo intervalo (120-210)s contém as medições realizadas com o motor acoplado somente ao conjunto polia-correia, cujo valor médio foi de 662W. Subtraindo-se desse valor aquele medido somente no motor, poder-se-ia estimar, por volta de 406W, a perda D_{PC} referente apenas ao conjunto polia-correia. Entretanto, deve ser observado que esta estimativa está superdimensionada pois, por limitações de ordem prática, a polia conduzida não foi desmontada do eixo motor do cabeçote móvel. Por causa disso, esse eixo e suas engrenagens permaneceram em movimento durante as medições.

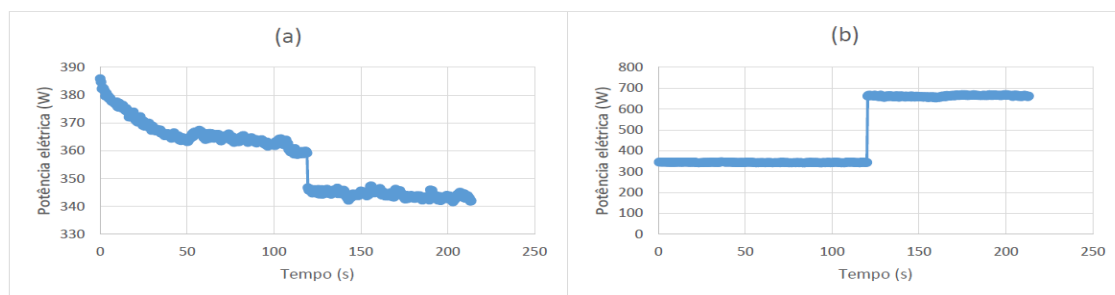


Figura 3. (a) Perdas medidas com o motor operando em vazio (D_{MZ}). (b) Perdas medidas com o motor em vazio e depois acoplado ao conjunto polia-correia

O gráfico apresentado na Fig. 4 foi construído supondo que a rotação possa variar continuamente no intervalo (50-1800) rpm. Deve ser observado que tal suposição foi adotada apenas fins de ilustração e análise. Na prática, a rotação do torno varia de forma discreta e apenas 12 valores podem ser selecionados.

Ainda baseando-se na suposição de um intervalo contínuo de rotação, foi adicionada uma linha de tendência a partir de uma regressão linear ($Y=1,221X+747,16$), onde Y representa a potência elétrica (W) e X as rotações (rpm). Vale a pena registrar que essa equação é equivalente à Eq. 1, a qual estabelece uma relação linear entre o produto torque-rotação e a potência. A diferença aqui está no valor 747,16, que corresponde à interseção da reta com o eixo das ordenadas. Baseando-se apenas na equação, esse valor deve ser interpretado com sendo a perda de potência para a rotação zero. Entretanto, para fins práticos essa interpretação é confusa, pois com rotação zero não existe movimento. O que deve ser entendido é que a rotação zero significa que o cabeçote fixo está desacoplado do sistema motor-polia-correia. A grosso modo, o valor de 747 W corresponde ao valor de 662W reportado como perdas do sistema motor-polia-correia operando em vazio (D_{MPCZ}).

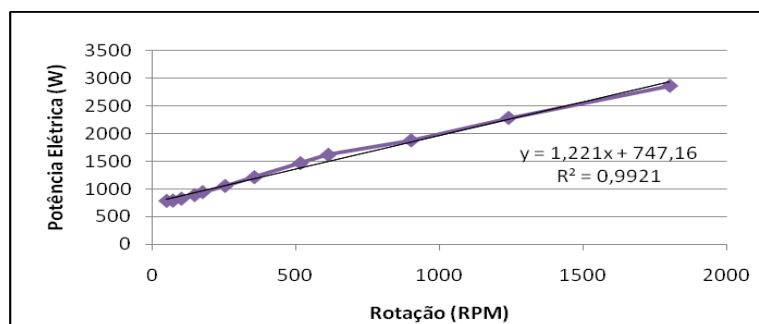


Figura 4. Perdas de potência em função da rotação

A medição da potência dissipada durante o corte foi efetuada, para cada um dos oito valores de profundidade de corte (a_p), em três estágios (R1, R2 e R3), tal como ilustrado na Fig. 5. No primeiro estágio (R1) a potência medida corresponde às perdas no motor, na polia-correia, no cabeçote fixo, na caixa de avanços e nas guias do barramento longitudinal. O valor médio, estimado para este estágio, foi de 1385W.

No segundo estágio (R2) a ferramenta já está em contato com a peça e ocorre a remoção de cavacos. Neste trecho o valor da potência sobe para 4342W, incluindo aqui as perdas do primeiro estágio, a potência de corte ($P_C = F_C v_c = 2704W$), mais as perdas devido ao efeito dos esforços de corte (carregamento) sobre o motor-transmissões, estimadas aqui em 253W.

No terceiro estágio (R3) o movimento de avanço foi interrompido e a ferramenta já está afastada da peça. As perdas registradas (valor médio = 1370W) correspondem somente à energia dissipada na transmissão (cabeçote fixo e polia-correias) e no motor. A diferença entre o primeiro e o terceiro estágio (15W) pode ser creditada às perdas devido ao movimento de avanço (reductor auxiliar e guias).

A Tabela 1 contém os resultados das medições de potência (elétrica e corte) realizadas para diferentes valores de profundidade de corte (a_p). Todos os ensaios foram realizados com a rotação nominal de 515 rpm. Entretanto, deve ser observado que as rotações reais (N_R), medidas diretamente com o foto tacômetro, são superiores a esse valor nominal. Além disso, a rotação do motor diminui com o aumento do carregamento (potência de corte) devido ao fenômeno conhecido como escorregamento (ABNT, 2002). Nas medições realizadas foi constatado uma relação linear entre a potência elétrica ativa (P_E) e a rotação (N_R), com uma elevada correlação ($R^2 > 0,999$), tal como indicado na Fig. 6(a).

A partir dos dados registrados na Tabela 1, foram estabelecidas as relações entre a potência elétrica ativa (P_E), a potência de corte (P_C) e a perda global (D_G). D_G corresponde à soma das parcelas D_{Z1} e D_{Z2} , conforme estágios R1 e R2 representados na Fig. 5.

Pode ser observado, vide Fig. 6(b), que os valores de P_C e D_G podem ser estimados por uma função quadrática com elevada correlação, pois, tal como discutido na Seção 2.1, as perdas que ocorrem no estator e no rotor do motor possuem dependência quadrática em relação à corrente elétrica (carregamento). Isto possibilita afirmar que, para as condições aqui adotadas, a potência elétrica ativa (P_E) medida na alimentação do motor é condição suficiente para estimar o valor da potência de corte (P_C).

A partir da análise das duas curvas apresentadas na Fig. 6(b), pode-se observar que para valores de P_E inferiores a 3000W a energia despendida com o corte foi inferior àquela perdida no motor e na transmissão. Nessas condições a máquina está sendo operada com um rendimento muito baixo.

Tabela 1. Medições de potência realizadas para a rotação nominal de 515 rpm e avanço de 0,25 mm/rev.
Adaptada de Marques et al (2015).

a_p [mm]	N_{med} [rpm]	P_C [W]	D_{Z1} [W]	P_E [W]	P_{me} [W]	D_{Z2} [W]	D_G (W)
0,25	557	433	1352	1799	447	14	1366
0,5	554	842	1351	2227	876	34	1385
0,75	552	1204	1379	2647	1268	64	1443
1	549	1510	1375	2965	1590	80	1455
1,25	547	1866	1366	3353	1987	121	1487
1,5	545	2172	1381	3717	2335	163	1544
1,75	542	2520	1365	4100	2736	216	1580
2	541	2704	1385	4342	2957	254	1639

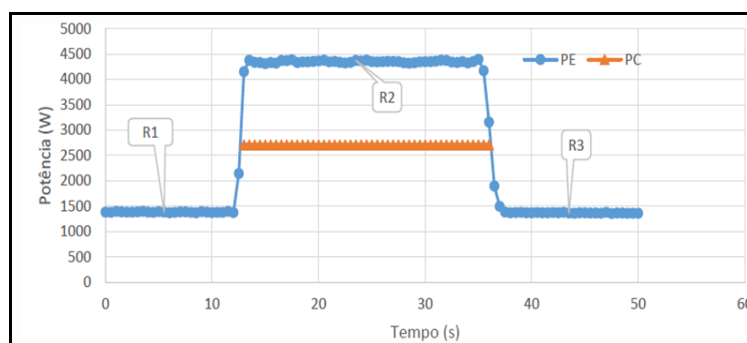


Figura 5. Medição da energia dissipada durante o corte ($N = 515$ rpm; $a_p = 2$ mm e $v_c = 140$ m/min e $f = 0,25$ mm/v)

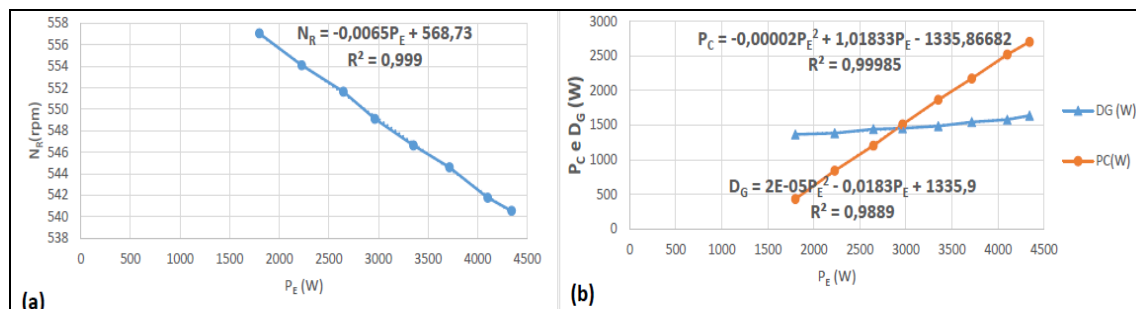


Figura 6. (a) Variação da rotação em função da potência elétrica ativa. (b) Relações entre a potência elétrica ativa (P_E), a potência de corte (P_C) e as perdas totais (D_{Z1-2})

Para as condições aqui ensaiadas (avanço = 0,25 mm/rev e $N = 515$) o rendimento da operação poderia ser melhorado com o aumento da profundidade de corte (a_p). Entretanto, esse aumento de a_p não pode ser decidido apenas pelo ponto de vista da melhoria da eficiência energética. Outros fatores, como por exemplo, o tipo de torneamento (desbaste ou acabamento) e o valor do sobrematerial disponível restringem esse aumento de a_p .

Outra alternativa é alteração da rotação. Todavia, o usuário não dispõe de informações sobre qual rotação, dentre as 12 possíveis, resultaria no melhor rendimento. Além disso, variações da rotação implicam diretamente em variações na velocidade de corte, a qual, por sua vez, é limitada por outros fatores, tais como a vida da ferramenta, o tempo e o custo da usinagem.

Tendo em vista que o torno aqui analisado não possibilita a melhoria da eficiência energética a partir de alterações das condições operacionais, mais especificamente v_c e f , deve-se pensar em alternativas para melhorar o seu projeto.

A partir dos dados reportados, pode-se observar que a máquina estudada apresenta um consumo muito elevado quando operada em vazio. Diante disso, as seguintes sugestões podem ser avaliadas para melhoria do seu projeto:

- Utilização de um motor elétrico, do mesmo tipo, mas com maior eficiência. Isto estaria em consonância com a determinação do Decreto Federal nº 4.508 de dezembro de 2002.
- Utilização de um motor elétrico de alto rendimento. Isto exigiria um investimento inicial maior, mas com um bom retorno, tal como reportado por Garcia et al (2007).
- Estudo da viabilidade de eliminação da transmissão por engrenagens existente no cabeçote fixo. Aparentemente, isto teria um pequeno impacto econômico, pois o custo com as engrenagens seria substituído por um inversor de frequência. Estudos realizados sobre a eficiência energéticas, vide por exemplo Waide e Brunner (2011), indicam que essa alternativa é muito promissora, não para a melhoria do desempenho de uma única máquina, mas sim para aumentar a eficiência de um parque de máquinas.

5. CONCLUSÕES

O objetivo proposto neste trabalho foi alcançado após a realização de vários ensaios e da reanálise dos dados publicados por Marques et al. (2015) sobre a eficiência energética da mesma máquina aqui avaliada.

Dentre as principais conclusões, destaca-se que o torno convencional aqui avaliado apresenta uma elevada perda de energia, mesmo quando operando em vazio. Ao se ligar a máquina, com todo o sistema em temperatura ambiente, a potência necessária para a sua movimentação, mesmo em vazio, é muito elevada. Isto decorre devido à energia dissipada como perdas pela agitação do óleo no redutor principal (cabeçote fixo).

Durante o estágio de corte, as perdas no motor aumentam com o aumento da potência de corte e apresentam uma relação aproximadamente quadrática. Devido às restrições deste tipo de máquina, o usuário possui quase nenhuma alternativa para melhorar a eficiência energética do processo. Foram sugeridas algumas melhorias no projeto, ou mesmo para máquinas já construídas, para o aumento de sua eficiência, dentre elas, destaca-se a avaliação da substituição das engrenagens do cabeçote fixo por um sistema eletrônico de variação de frequência.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. REFERÊNCIAS

- Altintas, Y., Verl, A., Brecher, C., Uriarte, L., Pritschow, G., 2011, Machine Tool Feed Drives, Annals of CIRP 60/2:779-797.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2002, "NBR 5383-1: máquinas elétricas girantes parte 1: motores de indução trifásicos: ensaios". Rio de Janeiro, Brazil.

- 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.
- Balta, B., Sonmez, F.O. and Cengiz, A., 2015, "Speed Losses in V-Belt Drives", Mechanisms and Machine Theory, vol. 86, pp. 1-14.
- Da Costa, D.D., et al., 2010 "Monitoramento da eficiência elétrica em processos de usinagem", Máquinas e Metais, Vol. 46 (533), pp. 88-107.
- Garcia A.G.P., et al., 2007, "Energy- Efficiency Standards for Electric Motors in Brazilian Industry", Energy Policy, Elsevier, Vol. 35, pp. 3424-3439.
- Gates, 2014, "Energy savings from synchronous belts", available at: <<http://designcenter.gates.com/wp-content/uploads/2015/05/Gates-Energy-Saving-from-Synchronous-Belt-Drives-White-Paper.pdf>>
- Gutowski, T., Dahmus, J., Thiriez, 2006, "A. Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes". Proc. 13th CIRP Intl. Conf. on Life Cycle Engineering, pp. 623-627.
- ISO, 2014, "ISO 14955 - Machine tools -- Environmental evaluation of machine tools -- Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools".
- Magalhães, L. et al., 2009, "Influence of tooth profile and oil formulation on gear powerloss". Tribology Internacional.
- Marques, A., et al., 2015, "Avaliação da Eficiência Energética de Tornos Convencionais Baseada no Valor Médio da Energia Específica de Corte", Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Salvador, Brazil.
- P. Waide and C. U. Brunner, 2011, "Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems," International Energy Agency, Tech. Rep.
- Pressman, R. S., Williams, J. E., 1977, "Numerical Control and Computer Aided Manufacturing". John Wiley & Sons, USA, p. 307.
- 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.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ANALYSIS OF ENERGY LOSSES IN THE CONVENTIONAL TURNING PROCESS

Dalberto Dias da Costa, dalbertoddc@gmail.com¹

André Chiconi Rialto, rialtoandre@gmail.com¹

Maurício Klein Gussoli, mauriciogussoli@gmail.com¹

Wesley Menezes Guimarães, wesleyguimaraes@ufpr.br¹

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 Within a given machine park there is a wide variety of types of machines, among which stand out the lathes. These, given its simplicity of design and ease of operation are mandatory choice for the production of parts composed of surfaces of revolution. Despite the widespread use of computerized numerical control (CNC) lathes, the use of conventional lathes still predominates in some companies; Being a good alternative for the machining of small, or unitary lots, and for the maintenance of large parts. Despite being a machine based on an old and widely dominated technology, little has been published regarding the energy efficiency of conventional lathes, both in the constructive (project) and operational (production) aspects. Therefore, the objective of this work is to analyze the energy losses that occur during the operation of conventional lathes and to relate them to their constructive and operational characteristics. The experiments were carried out in a conventional mechanical lathe. The energy losses were evaluated separately, in the electric motor and in the transmission with different gearings, during the idle time and at the cutting time, with different values of depth of cut. In addition, the relationship between the lubricating temperature, measured at the headstock, with the energy losses in the gearbox was also evaluated. From the data obtained, it was possible to conclude that the active power, measured during the machine's idle time, decreases with increasing operating time until the transmission system reaches a stabilization temperature.

Keywords: machining, turning, energetic efficiency, energy losses