



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

MONITORAMENTO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CORTE EM MÁQUINAS CNC

CON-2016-1336

André Franciscão, a.francisciao@gmail.com¹

Francisco de Augustinho, francisco.augustinho@tupy.com.br¹

Valter Vander de Oliveira, valterv@ifsc.edu.br¹

Emerson Luis de Oliveira, emerson.oliveira@ifsc.edu.br¹

Leonidas Cayo M Gilapa, leonidas@ifsc.edu.br¹

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Campus Joinville, Rua Pavão, 1377 - Costa e Silva - CEP 89220-618, Joinville, Santa Catarina.

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo sobre o uso de um sistema de monitoramento relacionando suas variações ao desgaste da ferramenta de corte com a potência elétrica consumida. Para tanto, foi realizada a implantação de um sistema de aquisição de dados para monitorar a potência elétrica consumida pelo motor Spindle de um centro de usinagem vertical CNC no fresamento tangencial de um aço SAE1045. A aquisição do sinal de potência foi feita utilizando um sensor com seu princípio de funcionamento baseado no efeito Hall. As medições da corrente elétrica e simultaneamente da tensão aplicada, resultaram em um sinal analógico proporcional a potência elétrica consumida durante a usinagem. A conversão e o tratamento desse sinal foram obtidos a partir de uma placa de aquisição de dados NI USB-6009 do fabricante National Instruments, e o Software LabVIEW instalado em um computador pessoal. O trabalho também faz uma investigação sobre a vida útil e o comportamento do desgaste de flanco de uma fresa de topo de 16 mm de diâmetro, considerando condições de corte empregadas no experimento. Os resultados mostraram que o sistema de monitoramento baseado em potência é bastante sensível a variações dos parâmetros de corte e aos diferentes níveis de desgaste da ferramenta. Pode-se constatar que existe uma forte correlação entre as variáveis (V_c , F_z , A_p e A_e) e a potência de corte. O mesmo efeito ocorreu com o aumento do desgaste da ferramenta. Do início da utilização da ferramenta com $V_B=0$, até a determinação do final da vida da ferramenta, foi constatado um aumento da potência de aproximadamente 39,4%. O sistema de monitoramento poderá ser utilizado no futuro para estudo de desgaste em outras operações de usinagem no laboratório de fabricação mecânica do IFSC Joinville. Poderá ser associado com outros sistemas de monitoramento e controle de desgaste em ferramentas de usinagem.

Palavras-chave: Monitoramento, Desgaste de ferramentas, Potência de corte, Fresamento.

1. INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem passaram nestes últimos anos por profundas mudanças visando, principalmente, o aumento da produtividade e a garantia da qualidade. Isto tem sido conseguido por meio da automação dos processos através de máquinas CNC. Mas para que se tenha um processo de usinagem totalmente automatizada, é necessário o uso de sistemas de monitoramento que possam estabelecer o momento de troca da ferramenta em tempo real e realizar automaticamente esta troca (MALAQUIAS, 1999).

No Brasil o método mais utilizado atualmente para determinar o momento de troca da ferramenta são baseadas em dados estatísticos, entretanto o grau de complexidade e a imprevisibilidade do processo de usinagem fazem com que a dispersão da vida da ferramenta seja muito grande. Portanto, muitas ferramentas são trocadas ainda em condições de serem utilizadas, acarretando aumento do consumo de ferramentas e maiores tempos de parada de máquina, ou ainda através do colapso da ferramenta, causar danos à máquina CNC (SOUZA, 2004).

Uma alternativa para otimização da vida da ferramenta é o uso de sistemas de monitoramento que contribuem para redução dos custos de produção. O desenvolvimento de sistemas de monitoramento consiste no estabelecimento de relações entre os parâmetros do processo de usinagem e o estado da ferramenta. Durante o processo de usinagem ocorre a deformação plástica e os atritos entre a ferramenta de corte, a peça e o cavaco, produzem variações na potência elétrica consumida pela máquina ferramenta, sendo estas proporcionais à potência mecânica consumida pelo processo e

também as forças de corte. Portanto, um sistema que possibilite o estabelecimento de relações entre a variação da potência elétrica do motor, com o desgaste da ferramenta, poderá ser útil para o monitoramento da vida da ferramenta em tempo real (SHAO; WANG; ZHAO, 2004).

O desenvolvimento de um sistema de monitoramento do desgaste de ferramentas de corte irá permitir que os alunos do curso de tecnologia em mecatrônica possam investigar fenômenos do processo de usinagem nas aulas de CNC. As interações entre a comunicação dos sistemas de potência e os acionamentos permitirão agir na melhoria dos processos produtivos. Atualmente o Instituto Federal possui um centro de usinagem vertical CNC com comando FANUC, considerado um sistema adequado a produção seriada em pequenos lotes e com flexibilidade para diferentes operações de usinagem. A implantação de um sistema de monitoramento adequado ao ambiente educacional permitirá aos alunos estudarem novas estratégias e analisarem os efeitos da usinagem em condições controladas. Os estudos e a transferência tecnológica poderão ser utilizados tanto na escola como em situações industriais.

Este artigo tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um sistema de monitoramento do desgaste de ferramentas de corte para o processo de fresamento em máquinas CNC a partir da potência elétrica. O sistema foi desenvolvido com base em processos de usinagem utilizados nas indústrias em busca de uma melhoria na qualidade e controle do desgaste de ferramentas.

2. MONITORAMENTO DA USINAGEM

O processo de fabricação através da usinagem dos metais é um dos mais importantes processos de fabricação existentes no mundo. Amplamente empregado pelas indústrias são bem conhecidos do ponto de vista da manufatura, entretanto, do ponto de vista da ciência ainda existe muito que aprender para se ter um bom domínio dessa arte que é a usinagem. Como exemplos a serem estudados são os fenômenos que ocorrem durante o processo de usinagem, tais como, a variação da temperatura, da potência necessária para a realização do corte, da intensidade de emissão acústica e da intensidade de vibração. Esses são alguns acontecimentos que ocorrem durante o processo de usinagem e que podem ser muito útil para uma análise das variáveis durante todo o processo de usinagem (SILVA, 2010).

Entre os métodos de usinagem, o fresamento se destaca como sendo um dos mais importantes. Os processos de usinagem são considerados difíceis, porque estão dependentes a um considerável número de variáveis físicas, sendo que em dependência da combinação do estado dessas variáveis, o processo pode alcançar um comportamento indesejado (DINIZ *et al.*, 2008).

A escolha de uma tecnologia adequada de monitoramento para cada aplicação é de suma importância para não trazer perdas ao invés de benefício ao processo de fabricação. Através de um monitoramento adequado são criados dados estatísticos que posteriormente são comparados ao desgaste do flanco da ferramenta de corte. Com isso é possível criar procedimentos e estipular qual é o melhor momento para realizar a troca da ferramenta, sem que afete a qualidade e produtividade da máquina durante o processo de usinagem, nem fazer trocas desnecessárias de ferramentas. Minimizar as falhas e tomar ações adequadas no momento exato é possível ter um melhor aproveitamento da ferramenta. Ao utilizar a ferramenta até o limite máximo de desgaste sem afetar a qualidade da peça nem o tempo de usinagem, diminui-se assim os custos com ferramentas que incorporariam diretamente no produto final (MALAQUIAS, 1999).

Um dos componentes mais importantes de um sistema de usinagem é a ferramenta. A produção automatizada só é possível se houver um método ou uma combinação de métodos disponíveis para monitoramento de condição de ferramenta. O desgaste da ferramenta influencia na qualidade do acabamento da superfície e nas dimensões das partes que são fabricados, enquanto que a quebra da ferramenta é uma das principais causas de parada não programada num ambiente de usinagem (BOTSARIS; TSANAKAS, 2008).

A condição da ferramenta é fortemente afetada por falhas que podem ocorrer durante a usinagem e as falhas podem ser classificadas em dois tipos, as falhas graves e falhas leves. As falhas leves desenvolvem-se progressivamente com o tempo, criando uma deterioração gradual da ferramenta. Por outro lado, ocorrem as falhas graves, causando instantaneamente a parada da operação. Em outras palavras, as falhas leves podem levar a uma situação previsível, um atributo que os torna adequados para monitoramento de desgaste, enquanto as falhas graves são geralmente imprevisíveis (BOTSARIS; TSANAKAS, 2008)..

2.1. Métodos de Monitoramentos

Os principais métodos são o monitoramento direto e indireto da condição da ferramenta.

Métodos diretos oferecem a potencialidade da determinação da condição de ferramenta com base na análise dos parâmetros para prever uma falha grave ou quebra da ferramenta. Enquanto que os métodos de monitoramento indiretos incluem a medição dos parâmetros para uma falha leve que são associados ao desgaste (BOTSARIS; TSANAKAS, 2008).

2.2. Monitoramento da Potência de Corte

O monitoramento de um processo de usinagem é o emprego de parâmetros que possam ser extraídos durante o processo de fabricação, tendo como principal objetivo obter respostas ao que se deseja alcançar. Como exemplo, o

desgaste de uma ferramenta de corte em um processo de usinagem, dentre os parâmetros um que se destaca é a potência de corte. (CISNEROS, 2003).

Para medir a potência efetiva de corte, uma maneira é a através da multiplicação da força de corte pela velocidade. Tendo as forças de corte e avanço, multiplicamos seus valores pela velocidade e fazemos a soma vetorial dos dois valores, feito isso, obtém-se a potência efetiva de corte, sendo essa a potência necessária para realizar o corte. A diferença entre a potência necessária para corte (N_C) e a necessária para avanço (N_f) é muito grande, isso se deve ao fato de que a velocidade de avanço é muito baixa se comparado com a velocidade de corte. Por esse motivo podemos considerar a potência de corte (N_C) como sendo a potência efetiva (N_e). Avaliando que podemos considerar a potência de corte como sendo a própria potência efetiva, chegamos à conclusão que em teoria apenas a potência consumida pelo motor principal da máquina é o suficiente para determinarmos a potência consumida em um processo de usinagem (SILVA, 2010).

A corrente consumida por um motor elétrico tem uma direta relação com a potência que ele consome para realizar trabalho, sendo assim, medindo a corrente elétrica consumida pelo motor que realiza o movimento para o corte é possível chegar ao valor da potência consumida no processo de usinagem. As perdas que existem entre o eixo árvore e a máquina ferramenta podem ser desconsideradas, pois se houver uma variação na corrente elétrica é porque houve uma mudança nos mecanismos de corte durante o processo de usinagem. Com isso o monitoramento do processo de usinagem através da potência consumida pelo motor principal do eixo árvore é uma boa alternativa para estimar o desgaste da ferramenta (SHAO; WANG; ZHAO, 2004).

O monitoramento da potência de corte durante o processo de usinagem é baseado no fato de que uma corrente elétrica menor é consumida quando se utiliza uma ferramenta nova, comparado com a utilização de uma ferramenta já gasta. Esse fator interfere diretamente na potência consumida para realizar o corte durante o processo de usinagem. O fator que predomina para esse aumento da corrente elétrica é o desgaste do flanco da ferramenta, à medida que esse desgaste se processa, a um aumento da área de contato da ferramenta com a peça. Esse fenômeno acaba gerando mais atrito e dificultando o corte, causando um aumento da corrente elétrica e conseqüentemente um aumento da potência de corte (SHAO; WANG; ZHAO, 2004).

Yoon *et al.* (2014) realizaram um estudo com foco em economia do consumo de energia, fazendo uma investigação com o objetivo de decompor o consumo de energia de uma máquina-ferramenta. O consumo de energia de uma fresadora CNC foi medido utilizando um medidor de potência total do equipamento de usinagem. Os dados foram coletados por meio de equipamentos de aquisição de dados, com uma frequência de amostragem de 4HZ. Para o processo de corte uma fresa de acabamento diâmetro de 3 mm foi usada para usinar um aço S45C. As condições de corte foram fornecidas pelo fabricante da ferramenta. A largura de corte foi de 3 mm para todas as condições. O objetivo dos ensaios foi obter um melhor entendimento sobre o relacionamento entre os parâmetros de potência e do processo de corte.

Em um experimento, o desgaste de flanco da ferramenta foi registrado a cada 100 mm de distância de usinagem. Os autores observaram que o desgaste de flanco aumentava lentamente a medida que a distância de usinagem aumentava. Em certo momento foi notado um aumento abrupto no desgaste flanco, foi observado e associado esse aumento com o estágio severo de desgaste da ferramenta. Concluíram que a potência de corte é responsável por aproximadamente 7,6% do consumo de energia do equipamento. No entanto, os cálculos do consumo de potência provaram ser bastante complicados e foram afetados pelo desgaste de flanco da ferramenta. Um aumento linear na potência de corte foi observado, e a diferença de potência entre o uso de uma ferramenta desgastada e uma ferramenta nova foi notado. Por outro lado, o modelo de construção foi baseado nos resultados empíricos, portanto, a potência de corte pode variar no que diz respeito aos detalhes do processo, tais como os tipos de máquinas ferramenta ou material de trabalho (YOON *et al.*, 2014).

Lacerda e Diniz (2014) observaram os parâmetros elétricos do motor *Spindle* da máquina, o ruído gerado durante a operação de fresamento em desbaste de pás de turbina hidráulica. O objetivo era estabelecer uma relação entre esses parâmetros e o real desgaste sofrido pela ferramenta durante o processo de fresamento. Todos os ensaios foram realizados com uma ferramenta toroidal com diâmetro de 160 mm e oito dentes (insertos ISO M35). Analisando as curvas de potência que foram geradas ao longo dos ensaios, foi possível notar que a potência durante os primeiros minutos de usinagem esteve próxima aos 30 kW. A medida que o ensaio evoluía, a potência também ia crescendo, mostrando que o desgaste nos insertos possui influência direta na potência consumida.

Medir os parâmetros elétricos do motor da máquina significa medir os esforços de corte. Isso porque o motor da máquina ao gerar a potência mecânica necessária para executar a operação de usinagem consome corrente elétrica em uma quantidade diretamente proporcional à potência e à força de corte gerada. Além disso, também se constatou, durante os ensaios, a relação entre a potência consumida e o fim de vida dos insertos. Sendo possível afirmar que, durante os últimos cinco minutos de fresamento para o fim de vida ocorreu um aumento expressivo da potência consumida, variando de 40 kW para mais de 50 kW, o que representa um aumento superior a 25% (LACERDA; DINIZ, 2014).

Esse fato confirma que a potência consumida pode ser utilizada como parâmetro para definição de fim de vida dos insertos durante o processo de usinagem, possibilitando que o operador a use como parâmetro para auxiliar na decisão sobre o fim da vida da ferramenta (LACERDA; DINIZ, 2014).

Shao; Wang e Zhao (2004) realizaram experimentos em fresamento tangencial e monitoramento de potência do motor da máquina em uma fresadora horizontal. Os ensaios de corte foram realizados numa fresadora horizontal (X62W). O sistema de aquisição de dados foi composto por um transdutor de potência no motor, uma placa de

conversão A/D e um computador pessoal. O desgaste de flanco da pastilha de metal duro foi medida usando um microscópio.

Os experimentos de fresagem foram realizados em diferentes condições de corte na usinagem de ferro fundido com resistência de 1680 N/mm^2 e sem a utilização de fluido lubri-refrigerante. Foram realizados ensaios para verificar a relação proporcional entre V_B e a potência média de corte. Em um experimento foi utilizada uma ferramenta de dente único e os sinais de potência foram investigados. Em outro experimento, os sinais de potência de corte foram medidos com uma ferramenta multidentada de 5 arestas. Em ambos os experimentos, foram utilizadas uma ferramenta nova ($V_B=0$) e uma ferramenta desgastada ($V_B=0,98 \text{ mm}$) e profundidade de corte de 4 mm , observando que há uma mudança significativa nos sinais de potência entre uma ferramenta nova e outra desgastada (SHAO; WANG; ZHAO, 2004).

Em ambos os casos, os sinais simulados e sinais medidos estão de acordo, exceto nas áreas onde os dentes começam e terminam o corte. Nessas áreas, os sinais medidos têm algumas flutuações. Isso ocorre porque há um aumento repentino (impulso positivo) da carga de corte no sistema de acionamento do eixo quando o dente entra na zona de corte. Este ganho de carga brusca provoca um salto no sistema de medição de potência e gera uma flutuação nos sinais medidos (SHAO; WANG; ZHAO, 2004).

Da mesma forma, enquanto que o dente sai da zona de corte, um impulso negativo, devido à perda súbita da carga de corte também pode causar flutuações nos sinais. Também foi observado que os sinais de potência medidos são geralmente proporcionais ao V_B . Isto sugere que a potência de corte média pode ser um bom índice para o controle do desgaste da ferramenta (SHAO; WANG; ZHAO, 2004).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizado um experimento preliminar com o objetivo de verificar a sensibilidade do sistema de monitoramento de potência em função dos diferentes estágios de desgaste da ferramenta, ajustar a estabilidade do sistema de aquisição e definir os parâmetros de corte a serem usados na curva de vida e experimento final. Na etapa foram feitos experimentos para construir a curva de vida da ferramenta e determinar o final da vida a partir do desgaste de flanco V_B .

Na etapa final foram realizadas medições de potência elétrica usinando com a ferramenta em quatro níveis diferentes de desgaste. O objetivo foi avaliar a variação da potência elétrica consumida em função do aumento do desgaste na ferramenta. Para todos os experimentos foi utilizado o corte a seco sem nenhum tipo de lubri-refrigeração.

Todos os experimentos foram realizados no laboratório de fabricação mecânica do IFSC. Conforme ilustrado na figura 1, a arquitetura do experimento é composta por um centro de usinagem vertical *Skybull 600* do fabricante *Diplomat*, transdutor de potência montado no painel elétrico da máquina, placa de aquisição de dados e computador pessoal. Os desgastes de flanco (V_B) foram medidos em um estereó microscópio.

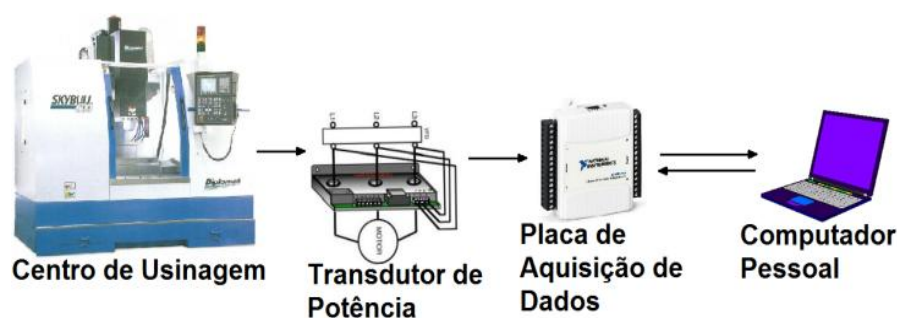


Figura 1. Arquitetura dos experimentos.

Todos os experimentos foram realizados no centro de usinagem vertical *Skybull 600* do fabricante *Diplomat*, equipado com comando *Fanuc Oi*. A programação da usinagem foi feita diretamente no painel da máquina. Para fixação dos corpos de prova foi utilizada uma morsa com sistema de fixação hidráulico.

Os centros de usinagem verticais são normalmente usados para usinagem de peças que exigem alta precisão, grandes quantidades de fabricação, processos múltiplos e formatos complexos. Principalmente nas indústrias de transformação, tais como, indústria bélica, indústria aeroespacial, indústria de motores, indústria de moldes, instrumentos, medidores, etc. Este tipo de máquina é empregada para lotes pequenos e médios, e na execução automática de produção de lotes de peças. A tabela 1 apresenta as características técnicas do equipamento conforme dados do fornecedor.

Tabela 1. Principais especificações técnicas da máquina CNC SkyBull 600.

Item	Especificação
Modelo	<i>Skybull 600</i>
Sistema de comando	<i>Fanuc Oi-Mate MC</i>

Curso do eixo x	600 mm
Curso do eixo y	400 mm
Curso do eixo z	480 mm
Velocidade Máx.	8000 r/min
Potência do motor principal	7,5 kW
Velocidade avanço dos eixos x - y - z	24 m/min

O transdutor UPC-E foi o sensor utilizado para fazer a aquisição dos dados referente a potência do motor do *Spindle* da máquina CNC. O transdutor tem saídas de sinal analógico que pode ser ligada a medidores, computadores, controladores programáveis, gravadores gráficos e registradores de dados. Podendo este ser usado para controlar e aperfeiçoar um processo de usinagem, alterando a velocidade de corte, taxas de avanço, gerar alarmes para avisar o operador ou até mesmo parar o processo e situações de risco. O transdutor fornece uma saída analógica com sinal de tensão de 0 a 10Vcc, sinal este que é proporcional a potência elétrica consumida durante o funcionamento do motor elétrico. Esse sinal analógico de saída é isolado eletricamente do restante do circuito, resultando com isso em um baixo nível de ruído ao sistema (LOAD CONTROLS, 2014). No transdutor a saída resultante de um sinal de tensão DC é então proporcional à potência (Volts x Amperes x Fator de Potência). Este é um vetor de multiplicação instantânea que também calcula os desvios da corrente (Fator de Potência). Os sinais para cada uma das três fases é calculado e o sinal de saída analógica é proporcional à potência trifásica (kW ou HP). Utilizando o transdutor UPC-E de efeito *Hall*, em vez dos transformadores de corrente tradicionais e transformadores de tensão, simplifica-se muito a instalação. A precisão também é melhorada, eliminando os erros de mudança de fase dos TCs e dos TPs que pode ser grande em baixos fatores de potência. Os dispositivos de efeito *Hall* também funcionam em tensões alternadas não senoidais (LOAD CONTROLS, 2014).

O transdutor de potência modelo UPC-E do fabricante *Load Controls* foi o sensor utilizado para medir a potência elétrica consumida durante o processo de usinagem que definimos para fazermos a avaliação do desgaste da ferramenta. Segundo a *Load Controls* esse sensor foi especialmente projetado para medição de potência elétrica consumida em motores trifásicos instalados nos mais diversos tipos de máquinas, em especial para o motor *Spindle* de máquinas CNC, nas quais a alimentação tem frequência e tensão variáveis, esse é o modelo de motor onde foi realizada a aplicação.

3.1. Instalação do Sensor

Na lateral do painel elétrico da máquina, na parte interna foram feitas duas furações no lugar definido como a melhor posição para o sensor no painel, conforme mostrado na figura 2.

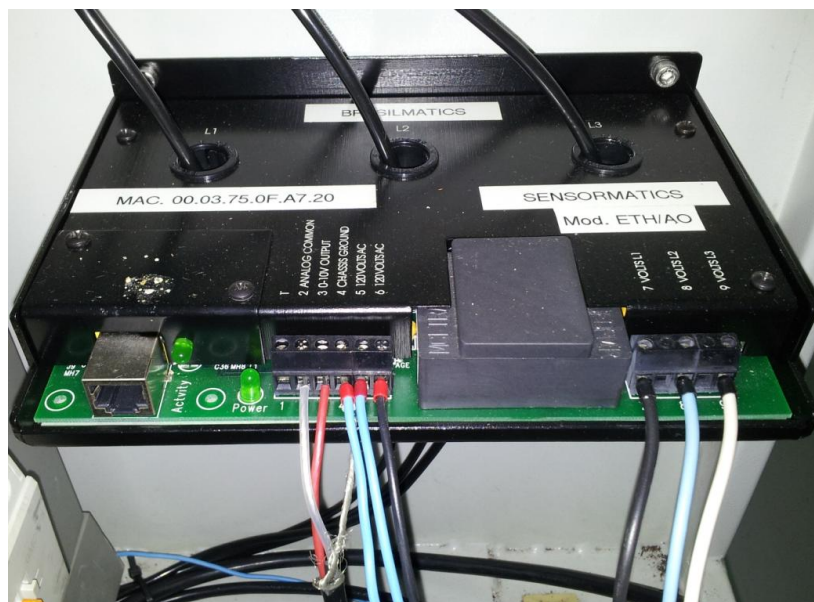


Figura 2. Fixação do sensor UPC-E no painel da máquina CNC.

Para determinar a distância entre os furos foi aproveitado a própria base de fixação do sensor para fazer as marcações, na realização dos furos foi utilizado broca de aço rápido com 4 mm de diâmetro. Depois de feito os furos foram cortados as roscas utilizando um macho de aço rápido M5, e utilizando dois parafusos M5x20 com cabeça cilíndrica sextavado interno, foi feita a fixação do transdutor. Foram realizadas as conexões elétricas com os bornes do

circuito de saída da potência do *drive* que fazem a alimentação do motor trifásico do *Spindle*, que é o motor principal da máquina. Os cabos de potência foram passados através dos sensores de corrente do transdutor e ligados ao motor, onde L1, L2 e L3 são as três fases que vêm da saída de potência do *Drive* de controle do Motor *Spindle* da máquina CNC. Em uma das saídas disponíveis da fonte da máquina, foram instalados os cabos necessários para alimentar o sensor com uma tensão de 110Vca.

Foi criada no diagrama de blocos a função DAQ Assistant, que é a função responsável pela aquisição de dados, onde em uma tela interativa foram inseridas as configurações necessárias para fazer a aquisição. Para interface entre o computador e o sensor, foi utilizado o dispositivo de aquisição de dados NI USB-6009 da National Instruments. O sensor fornece um sinal de tensão de 0 a 10Vcc e através da entrada analógica do dispositivo esse sinal é recebido, tratado e convertido em um sinal digital que é transmitido através de um cabo USB para o computador. No computador foi instalado o software Lab View, que com uma programação específica faz a aquisição, gravação e análise das informações coletadas através do nosso sistema de aquisição de dados. Tanto a exibição em tempo real, como as informações registradas, podem ser visualizadas e analisadas em gráficos criados pelo próprio programa de aquisição, no momento, ou logo após adquirir os dados, conforme ilustrado na figura 3.

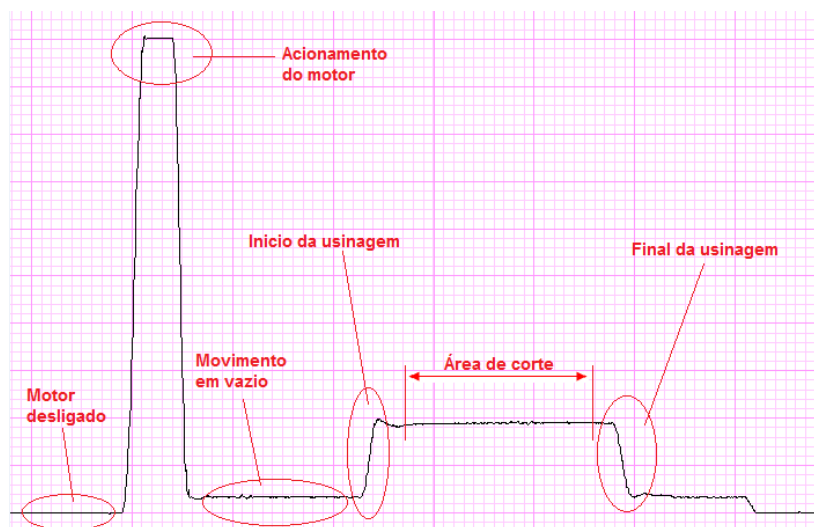


Figura 3. Dados da potência adquiridos em tempo real.

Também é possível gerar gráficos para análise dos dados através dos arquivos salvos em disco. Os dados coletados foram utilizados para construção dos gráficos para análises do comportamento da usinagem, tanto com variações de parâmetros de corte como os níveis de desgaste da ferramenta, também foram utilizados para construir a curva de vida da ferramenta.

3.2. Ensaio de usinagem

O ensaio preliminar foi definido com a variação de quatro parâmetros de corte (V_C , A_p , V_F e A_e). Ao todo foram feitos 81 experimentos, sendo que cada um foi repetido três vezes para posterior comparação dos resultados. Antes da realização dos testes, foram criadas tabelas contendo os parâmetros de corte para serem usados na usinagem do corpo de prova. Na construção dessas tabelas foi levado em conta o material já definido para ser usado como corpo de prova, no caso, aço SAE1045. Para fixação dos corpos de prova foi utilizada uma morsa com sistema de fixação hidráulico. A morsa foi presa à máquina através de parafusos ancorados nas ranhuras da mesa.

Tabela 2. Parâmetros de corte dos experimentos preliminares.

V_c (m/min)	A_p (mm)	F_z (mm/dente)	A_e (mm)
100	1	0,1	8
200	1,5	0,2	12
300	2	0,3	4

Tanto no experimento da curva de vida, como no teste final, o material utilizado para o corpo de prova foi uma barra quadrada de aço SAE1045, com dimensões 19x19x152,9 mm, este material foi escolhido por estar disponível no laboratório. O comprimento foi calculado levando em conta o método de fixação e o tempo gasto em cada passada. Como o avanço para a fresa de topo de Ø16 mm foi de 1592 mm/min, o corpo de prova foi cortado com comprimento

de 159,2 mm, dessa forma a cada passada o tempo gasto é 0,1 minuto, totalizando 1 minuto a cada 10 passadas. Essa estratégia foi adotada para facilitar o controle do tempo de usinagem.

O experimento final teve como objetivo avaliar o comportamento da potência em quatro diferentes níveis de desgaste para o fresamento tangencial. Foi utilizado uma fresa de topo de Ø16 mm com duas arestas sendo esta a mesma ferramenta e suporte utilizado nos experimentos da curva de vida. Ao todo foram realizados quatro testes, sendo um para cada nível de desgaste. Cada teste foi repetido três vezes para comparação dos resultados. As condições de corte foram escolhidas nos experimentos preliminares, a partir dos resultados da potência de corte e são mostrados na tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de corte dos experimentos finais.

Vc (m/min)	Fz (mm/dente)	Ap (mm)	Ae (mm)	S (rpm)	F (mm/min)
200	0,2	1,5	8	3979	1592

Nesta etapa foram definidos quatro diferentes níveis de desgaste da ferramenta. Sendo o primeiro a ferramenta nova, sem nenhum desgaste, o último o final da vida com 0,33 mm e dois desgastes intermediários de 0,06 mm e 0,11 mm. Para o teste de 0,33 mm de desgaste foram utilizados os insertos já desgastados no ensaio da curva de vida da ferramenta. Para os desgastes intermediários foi necessário fazer uma operação para desgastar os insertos até os níveis desejados. Com a finalidade de diminuir o tempo dessa operação, foi utilizado um corpo de prova de material endurecido. Nesta etapa todos os dados de potência foram adquiridos e gravados através do sistema de aquisição para posterior análise.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados do experimento preliminar foi feita através da análise visual dos gráficos, para cada experimento foi gerado um gráfico correlacionando a potência elétrica em função do tempo. Nos gráficos é possível visualizar as três repetições de cada experimento realizado.

Para escolha dos parâmetros que utilizaríamos no experimento na fase final, foi analisado apenas o espectro da potência elétrica consumida durante o corte da usinagem. Foram desprezadas as regiões do início e final de usinagem, também quando a ferramenta entra ou sai da região de corte na peça, conforme ilustrado na figura 4.

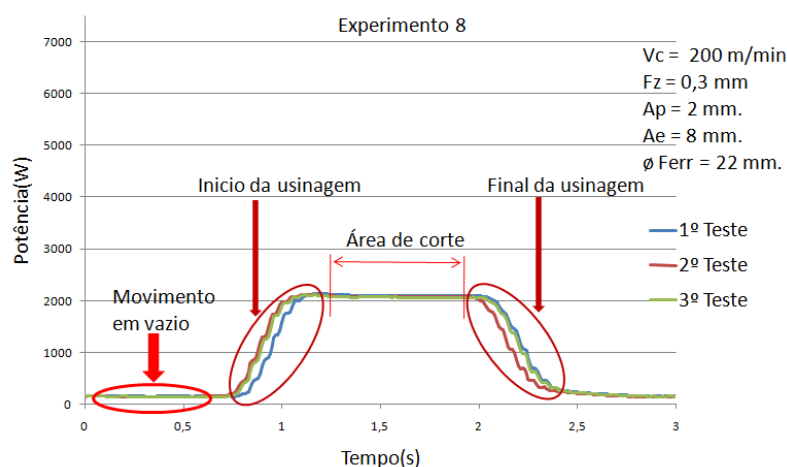


Figura 4. Gráfico do teste preliminar 08.

Durante os testes foi observada uma fiel sensibilidade do sistema de aquisição quanto à variação dos parâmetros de corte e uma uniformidade nas repetições para um mesmo teste, ou seja, uma boa estabilidade no sistema. Notou-se também que os níveis de potência sofriam variações as mudanças dos parâmetros para cada teste realizado. Essas variações eram influenciadas pela alteração de um parâmetro de corte, ou uma combinação destes, como a velocidade, o avanço, a profundidade e a largura de corte.

Para realizar o experimento final foram feitos quatro testes com quatro diferentes níveis de desgaste da ferramenta. A intenção foi comparar a variação do consumo da potência em relação aos diferentes níveis de desgastes preestabelecidos. Para cada teste do experimento final foram feitas três repetições, e comparado os desgastes para cada valor de V_B .

Na ilustração do gráfico da figura 5, é mostrado um comparativo entre os quatro níveis de desgastes (V_B 's), mostrando as diferenças das potências consumidas para cada nível. Para construção do gráfico comparativo, foram usados os valores médios entre as repetições de cada teste, usando os dados adquiridos durante a usinagem e

desprezando os dados do início e final da usinagem. Conforme os níveis de desgaste aumentavam foi possível notar um aumento na variação dos sinais medidos e uma maior diferença entre as repetições.

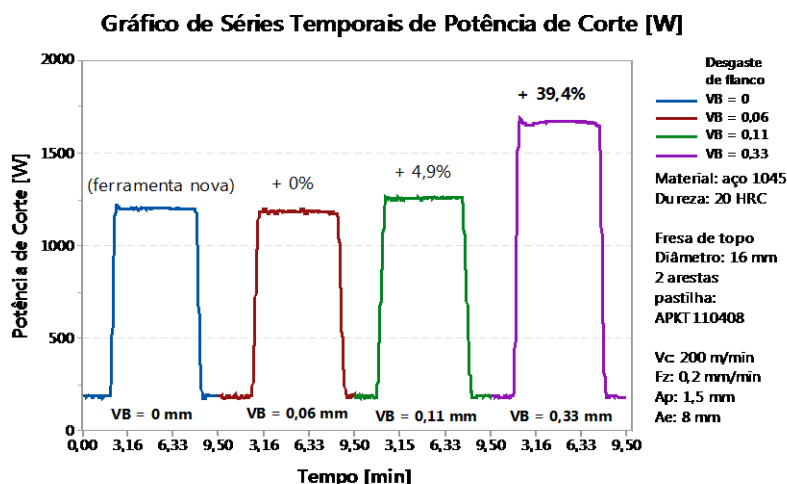


Figura 5. Gráfico comparativo da evolução do desgaste e comportamento da potência.

Nas medições iniciais constatou-se que praticamente não há diferença no valor da potência consumida entre a ferramenta nova com desgaste $V_B=0$ mm comparando com a ferramenta usada e com desgaste $V_B=0,06$ mm. Para o desgaste $V_B=0,11$ mm houve um aumento de aproximadamente 4,9% na potência elétrica. No teste de desgaste $V_B=0,33$ mm ocorreu um aumento maior, em torno de 39,4% na potência elétrica.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final deste trabalho de conclusão de curso considerou-se que os objetivos foram alcançados, tanto a implementação do sistema de aquisição da potência elétrica como os testes práticos foram realizados com sucesso.

A aplicação do transdutor para obter os sinais de potência foi muito importante para o desenvolvimento do trabalho. Com a utilização do transdutor foi possível simplificar a construção do sistema, eliminar a necessidade de confecção e instalação de peças adicionais e reduzir assim consideravelmente o número de componentes utilizados.

A partir dos testes práticos, foi observado que o sistema de monitoramento através da potência elétrica é bastante sensível às mudanças dos parâmetros de usinagem e do estado da ferramenta durante o processo de fresamento. Porém são necessários mais estudos para identificar o quanto cada fator contribui para essas alterações na potência consumida pelo motor principal.

Nos experimentos finais constatou-se que o desgaste de flanco gerou um aumento na potência consumida pelo motor durante a usinagem, percebe-se então que a potência elétrica do motor *Spindle* é um fator importante para monitorar o desgaste de flanco e conseqüentemente estimarmos a vida útil da ferramenta.

Apesar dos resultados já obtidos pretende-se continuar a investigação realizando a aquisição dos dados relacionados à potência elétrica sem a utilização da placa de aquisição, para isso deve-se conectar o transdutor diretamente ao computador, usando os benefícios de comunicações Ethernet. Para que isso fosse possível seria necessário utilizar uma comunicação utilizando o modo TCP/IP via protocolo UDP, disponíveis para o modelo de transdutor utilizado.

Também pretende-se integrar o sistema de monitoramento da potência elétrica consumida ao sistema de controle da máquina CNC podendo, por exemplo, gerar a parada do processo quando atingido um nível de desgaste pré determinado. Feito isso também será possível interferir em alguns parâmetros de usinagem, com o objetivo de reduzir o desgaste da ferramenta sem interferir na qualidade e acabamento da peça usinada.

Integrar o sistema a outras técnicas de monitoramento, como emissão acústica, vibração, temperatura ou forças de corte, tendo assim um sistema de monitoramento com uma confiabilidade mais apurada e com outras opções para tomadas de decisão.

Realizar testes usinando outros tipos materiais, diferentes tipos de ferramentas e testar o sistema de monitoramento em outras operações no fresamento.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, por nos dar forças, persistência, saúde e determinação para conclusão desse trabalho.

A nossas esposas, filhos, pais, irmãos, todos os familiares que nos deram apoio e tiveram paciência.

A todos os setores do IFSC que de alguma forma através da sua estrutura nos deram as condições necessária, favoráveis à nossa capacitação e desenvolvimentos de trabalhos e pesquisas institucionais.

Ao IFSC Joinville, por fornecer conhecimentos necessários para termos chegado a esse estágio de desenvolvimento.

A todos os nossos colegas que de alguma forma ajudaram a realizar o trabalho de pesquisa, desenvolvimento e conclusão do nosso sistema de monitoramento e aquisição.

Aos professores que nos guiaram e instruíram através dos teores das disciplinas, e pelas atitudes assumidas diante da nossa proposta de trabalho.

Um agradecimento em especial ao nosso orientador, o professor Valter Vander de Oliveira, por sua disponibilidade, cooperação, orientação e assistência durante todo o transcorrer da idealização, desenvolvimento e finalização do trabalho.

Ao professor Leo Schirmer, pela disposição e dedicação que nos estimulou, apoiou e orientou em algumas etapas do desenvolvimento e montagem do sistema de aquisição de dados.

7. REFERÊNCIAS

- BOTSARIS, P.N. and TSANAKAS, J.A. State-of-the-art in methods applied to tool condition Monitoring (TCM) in unmanned machining operations: a review. The International Conference of COMADEM, Prague, 2008, pp. 73-87.
- CISNEROS, C.A.F. *et al.* Melhorias na instrumentação no sistema de monitoramento de desgaste de fresa de topo por emissão acústica. Congresso Brasileiro de engenharia de fabricação. Maio de 2003.
- CUS, F. and ZUPERL, U. Real-Time Cutting Tool Condition Monitoring in Milling. *Journal of Mechanical Engineering* 57(2011)2, 142-150.
- DE PAULA, Leonam João Leal. Estudo e desenvolvimento de sistema de refrigeração MQL (mínima quantidade de lubrificantes). 15º Congresso de Iniciação Científica, 2007.
- SOUZA, A.J. Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte em Torneamento. 2004. Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica. Março de 2015.
- DINIZ, Anselmo Eduardo. Tecnologia da usinagem dos materiais / Anselmo Eduardo Diniz, Francisco Carlos Marcondes, Nivaldo Lemos Coppini. 6. Ed São Paulo: Artliber Editora. 2008.
- DOUKAS, C. *et al.* On the estimation of tool-wear for milling operations based on multi-sensorial data. *CIRP Conference on Modeling of Machining Operations*. CIRP 8 (2013) 415–420.
- FERRARESI, Dino. Fundamentos da Usinagem dos Metais / Dino Ferraresi. São Paulo Blucher, 1970.
- FUMEP. <http://brasil.fumep.edu.br/~phlbiblio/10023261.pdf>. Acessado dia 29/11/2014.
- GRZESIK, W. Dry and Semi-Dry Machining. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*, 2008, Pages 226 - 245, VIII.
- GRZESIK, W. High Speed Machining. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*, 2008, Pages 213-226, VIII.
- LOAD CONTROLS. Application note. http://www.loadcontrols.com/application_notes/application_notes.html. Acessado em 06/11/2014.
- KIM, D and JEON, D. Fuzzy-logic control of cutting forces in CNC milling processes using motor currents as indirect force sensors. *Precision Engineering*, 2011, pp 143–152.
- KIM, J.S; KANG, M.C; Ryu, B.J. and Ji, Y.K. Development of an on-line tool-life monitoring system using acoustic emission signals in gear shaping. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 39, pp. 1761-1777, 1999.
- KULJANIC, E. and SORTINO, M. TWEM, a method based on cutting forces—monitoring tool wear in face milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005) 29–34.
- LACERDA, R.S. Fresamento em desbaste de pás de turbina hidráulica / Anselmo Eduardo Diniz. *Revista Digital O Mundo da Usinagem*.
- MACHADO, A.R.; SILVA, M.B. Usinagem dos Metais – Apostila Didática. Uberlândia: Edufu (Editora UFU), 2004.
- MALAQUIAS, J.C. Otimização e gerenciamento em usinagem para cenário de fabricação flexível, 1999. Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba.
- MANUAL DE INSTRUÇÕES SKYBULL 600. Manual de instruções do centro de usinagem vertical *Skybull* 600. Acessado em fevereiro 2015.
- MANUAL DE INSTRUÇÕES NI USB-6009. <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303m.pdf>. Acessado em março 2015.
- MARANHÃO, C; SILVA, L.R; DAVIM, J.P. Comportamento termomecânico na microusinagem do aço aisi 4140: Simulação numérica com validação experimental. *Ciência & Engenharia*, v. 21, n. 2, p. 19 – 28, jul. – dez. 2012.
- MITSUBISHI, Tooling Technology. Primeira Edição em Português, 2007.
- NATIONAL INSTRUMENTS. <http://www.ni.com/manuals/pt/>; User guide and specifications Ni usb-6008/6009.
- POLLI, M.L. Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- RODRIGUES A.R. Micro Usinagem: Crescimento no Brasil e no mundo. Disponível em: <http://www.nei.com.br/artigo/microusinagem-crescimento-no-brasil-e-no-mundo>. Acessado em 25/03/2015.
- SANDVIK COROMANT. Conhecimento fresagem solução de problemas. <http://www.sandvik.coromant.com/engb/knowledge/milling/troubleshootin.aspx>. Acessado em 10/09/2014.

- SANDVIK COROMANT. Desgaste em arestas de corte. http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges/pages/default.aspx. Acessado em 09/09/2014.
- SCHULZ, H.; MORIWAKI, T. High Speed Machining. *Annals of the CIRP*, v. 41, n.2, 637-643, 1993.
- SHAO, H; WANG, H.L and ZHAO, X.M. A cutting power model for tool wear monitoring in milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44 (2004) 1503 -1509.
- SILVA, R.H.L. Monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais. 2010. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- TECMAF. Manual de instruções para Motor *Spindle*. http://www.tecmaf.com.br/upload/downloads/221_manual-motores.pdf. Acessado em dezembro de 2014.
- YOON, H.-S., *et al.*, Empirical power-consumption model for material removal in three-axis milling, *Journal of Cleaner Production* (2014) 1-9.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MONITORING OF CUTTING TOOL WEAR IN NC MACHINE

André Franciscão, a.francisco@gmail.com¹
Francisco de Augustinho, francisco.augustinho@tupy.com.br¹
Valter Vander de Oliveira, valterv@ifsc.edu.br¹
Emerson Luis de Oliveira, emerson.oliveira@ifsc.edu.br¹
Leonidas Cayo M Gilapa, leonidas@ifsc.edu.br¹

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Campus Joinville, Pavão Street, 1377 - Costa e Silva - CEP 89220-618, Joinville, Santa Catarina.

Abstract. *This paper presents a study of use of a monitoring system, linking its variations wear of the cutting tool with the electric power consumed. Therefore, the implementation of a data acquisition system was performed to monitoring the electrical power consumed by the motor Spindle of a vertical machining NC milling tangential in a SAE1045 steel. The acquisition of signal strength was made using a sensor with its operating principle based on Hall effect. The measurements of the electric current and the voltage applied simultaneously, resulting in a proportional analog signal electric power consumed during machining. The conversion and the processing of that signal were obtained from a data acquisition NI USB-6009 card manufacturer National Instruments and LabVIEW software installed on a personal computer. The work also makes an investigation into the life and flank wear behavior of an end mill 16mm diameter considering cutting conditions used in the experiment. The results showed that the power-based monitoring system is quite sensitive to changes of cutting parameters and tool wear at different levels. It can be seen that there is a strong correlation between variables (V_c , F_z , A_p and A_e) and power cut. The same effect was seen with increasing tool wear. The beginning of the use of the tool with $VB = 0$, to determine the final tool life, it was found an increase in power of approximately 39,4%. The monitoring system can be used in the future to wear study in other machining operations in the mechanical manufacturing laboratory IFSC in Joinville. It may be associated with other monitoring systems and wear control in machining tools.*

Keywords: Monitoring, Tool wear, Cutting Power, Milling.