

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA**

**CAMPUS JOINVILLE
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM
MECATRÔNICA INDUSTRIAL**

**ANDRÉ FRANCISÃO
FRANCISCO DE AUGUSTINHO**

**MONITORAMENTO DO DESGASTE DE
FERRAMENTAS DE CORTE EM MÁQUINAS CNC**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANDRÉ FRANCISÃO
FRANCISCO DE AUGUSTINHO**

**MONITORAMENTO DO DESGASTE DE
FERRAMENTAS DE CORTE EM MÁQUINAS CNC**

JOINVILLE, 2015

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE**

**CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM
MECATRÔNICA INDUSTRIAL**

**ANDRÉ FRANCISÃO
FRANCISCO DE AUGUSTINHO**

**MONITORAMENTO DO DESGASTE DE
FERRAMENTAS DE CORTE EM MÁQUINAS CNC**

**Submetido ao Instituto Federal
de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina
como parte dos requisitos de
obtenção do título de Tecnólogo
em Mecatrônica Industrial.**

**Orientador: Valter Vander de
Oliveira, Msc**

JOINVILLE, 2015

Franciscão, André; Augustinho, Francisco.

Monitoramento do desgaste de ferramentas de corte em máquinas CNC. Franciscão, André; Augustinho, Francisco - Joinville Instituto Federal de Santa Catarina, 2015. 135 f.

Trabalho de Conclusão de Curso-Instituto Federal de Santa Catarina, 2015. Graduação: Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial. Modalidade: Presencial. Orientador: Valter Vander de Oliveira, Msc.

1. Monitoramento, 2. Desgaste de ferramentas, 3. Potência de corte, 4. Fresamento.

I. Monitoramento do desgaste de ferramentas de corte em máquinas CNC.

MONITORAMENTO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CORTE EM MÁQUINAS CNC

**ANDRÉ FRANCISCÃO
FRANCISCO DE AUGUSTINHO**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Mecatrônica Industrial do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Joinville, 03 de Julho de 2015.

Banca Examinadora:

**Prof. Valter Vander de Oliveira, MSc.
Orientador**

Prof. Leo Schirmer, MSc.

Prof^ª. Kelly Patrícia Dias Schwede, MSc.

DEDICATÓRIA

Ao Professor Valter Vander de Oliveira, com quem partilhamos a essência daquilo que veio a ser esse trabalho. Nossas conversas durante o desenvolvimento foram fundamentais.

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.

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: 1. Monitoramento, 2. Desgaste de ferramentas, 3. Potência de corte, 4. Fresamento.

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 CNC 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: 1. Monitoring, 2. Tool wear 3. Cutting Power, 4. Milling.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FRESAMENTO FRONTAL E TANGENCIAL	32
FIGURA 2 - TIPOS DE FRESAS	32
FIGURA 3 - FRESAMENTO TANGENCIAL DISCORDANTE.....	33
FIGURA 4 - FRESAMENTO TANGENCIAL CONCORDANTE	34
FIGURA 5 - DESGASTE DE FLANCO	38
FIGURA 6 - DESGASTE DE CRATERA	38
FIGURA 7 - DESGASTE DE ENTALHE	39
FIGURA 8 - DESGASTE POR DEFORMAÇÃO PLÁSTICA	40
FIGURA 9 - TRINCAS ORIGEM TÉRMICA	41
FIGURA 10 - TRINCAS DE ORIGEM MECÂNICA	42
FIGURA 11 - LASCAMENTO DA FERRAMENTA	42
FIGURA 12 - QUEBRA DA FERRAMENTA	43
FIGURA 13 - ARESTA POSTIÇA	44
FIGURA 14 - ARQUITETURA DOS EXPERIMENTOS	63
FIGURA 15 - CENTRO DE USINAGEM VERTICAL CNC SÉRIE VM.....	63
FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO DO SENSOR DE EFEITO HALL	67
FIGURA 17 - FIXAÇÃO DO SENSOR UPC-E NO PAINEL DA MÁQUINA CNC.....	68
FIGURA 18 - DIAGRAMA MULTIFILAR PARA LIGAÇÃO TRANSDUTOR UPC-E	69
FIGURA 19 - TELA DE ACESSO PARA CONFIGURAÇÃO DO TRANSDUTOR UPC-E	70
FIGURA 20 - PLACA DE AQUISIÇÃO NI USB-6009	71
FIGURA 21 - ESQUEMA LIGAÇÃO DAS ENTRADAS DA PLACA NI USB-6009.....	73
FIGURA 22 - PINAGEM E LIGAÇÃO DA PLACA NI USB-6009.....	73
FIGURA 23 - CONFIGURAÇÃO DO BLOCO <i>DAQ ASSISTANT</i> NO <i>LABVIEW</i>	76
FIGURA 24 - CONFIGURAÇÃO DO BLOCO <i>WRITE TO MEASUREMENT FILE</i> NO <i>LABVIEW</i>	77
FIGURA 25 - CONFIGURAÇÃO DO BLOCO <i>READ FROM MEASUREMENT FILE</i> NO <i>LABVIEW</i>	78
FIGURA 26 - DADOS DA POTÊNCIA ADQUIRIDOS EM TEMPO REAL	79
FIGURA 27 - CONFIGURAÇÃO DO BLOCO <i>FILTER</i> NO <i>LABVIEW</i>	80
FIGURA 28 - PROGRAMA DE BLOCOS NO <i>LABVIEW</i>	81
FIGURA 29 - MODO DE MEDIÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA	84
FIGURA 30 - MICROSCÓPIO PARA MEDIÇÃO DO DESGASTE	85
FIGURA 31 - CORPO DE PROVA FIXADO NA MORSA	87
FIGURA 32 - FIXAÇÃO DO CORPO DE PROVA NO DUROMETRO	88
FIGURA 33 - DUROMETRO <i>MICROHARDNESS TESTER FM-800</i>	89
FIGURA 34 - VALOR MÉDIO DA DUREZA DO CORPO DE PROVA	90
FIGURA 35 - GRÁFICO DO TESTE PRELIMINAR 08.....	94

FIGURA 36 - GRÁFICO DO TESTE PRELIMINAR 10	95
FIGURA 37- GRÁFICO DO TESTE PRELIMINAR 18.....	96
FIGURA 38 - GRÁFICO DO TESTE PRELIMINAR 05	97
FIGURA 39 - ADESÃO DE METAL NA FERRAMENTA DE CORTE	98
FIGURA 40 - GRÁFICO DA CURVA DE VIDA DA FERRAMENTA.....	99
FIGURA 41 - GRÁFICO COMPARATIVO DA EVOLUÇÃO DO DESGASTE.....	100
FIGURA 42 - MODO DE OPERAÇÃO DA CAIXA VOLANTE DO CNC.....	115
FIGURA 43 - REPRESENTAÇÃO UM MOTOR <i>SPINDLE</i>	118
FIGURA 44 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 01.....	119
FIGURA 45 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 02.....	119
FIGURA 46 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 03.....	120
FIGURA 47 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 04.....	120
FIGURA 48 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 05.....	121
FIGURA 49 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 06.....	121
FIGURA 50 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 07.....	122
FIGURA 51 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 08.....	122
FIGURA 52 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 09.....	123
FIGURA 53 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 10.....	123
FIGURA 54 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 11.....	124
FIGURA 55 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 12.....	124
FIGURA 56 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 13.....	125
FIGURA 57 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 14.....	125
FIGURA 58 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 15.....	126
FIGURA 59 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 16.....	126
FIGURA 60 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 17.....	127
FIGURA 61 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 18.....	127
FIGURA 62 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 19.....	128
FIGURA 63 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 20.....	128
FIGURA 64 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 21.....	129
FIGURA 65 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 22.....	129
FIGURA 66 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 23.....	130
FIGURA 67 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 24.....	130
FIGURA 68 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 25.....	131
FIGURA 69 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 26.....	131
FIGURA 70 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 27.....	132

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PRINCIPAIS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA MÁQUINA CNC	64
TABELA 2- CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DA PLACA NI USB-6009	72
TABELA 3 - PARÂMETROS DE CORTE DOS EXPERIMENTOS PRELIMINARES	81
TABELA 4 - DADOS PARA OS EXPERIMENTOS PRELIMINARES	82
TABELA 5 - PARÂMETROS DE CORTE PARA CONSTRUÇÃO DA CURVA DE VIDA	86
TABELA 6 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA AÇO SAE1045	87
TABELA 7 - TABELA DE CONVERSÃO DAS ESCALAS E MÉTODOS DE DUREZA	90
TABELA 8 - DADOS DE CORTE DOS EXPERIMENTOS FINAIS	91
TABELA 9 - COMPARAÇÃO DAS VARIAÇÕES DA POTÊNCIA NA USINAGEM	93
TABELA 10 - SIMBOLOGIA PARA PROGRAMAÇÃO DO CNC	110
TABELA 11 - DEFINIÇÃO DOS EIXOS E COORDENADAS DO CNC	111
TABELA 12 - FUNÇÕES DO PAINEL DE OPERAÇÃO DE TECLAS DO CNC	112
TABELA 13 - DADOS TÉCNICOS E MECÂNICOS DO CNC	113
TABELA 14 - DADOS TÉCNICOS E MECÂNICOS DO CNC	114
TABELA 15 - DADOS TÉCNICOS ELÉTRICOS DO CNC.....	115

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS, GRANDEZAS E SÍMBOLOS

<u>Sigla/Símbolo</u>	<u>Significado Original</u>	<u>Tradução/Grandeza</u>
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i>	Controle Numérico Computadorizado
FANUC	<i>Fujitsu Automated Numerical Control</i>	Fujitsu Controle Numérico Automático
A	<i>Ampere</i>	Corrente elétrica
V	<i>Volt</i>	Tensão elétrica
W	<i>Watt</i>	Potência / Fluxo de energia
GND	<i>Ground</i>	Terra
Hz	<i>Hertz</i>	Frequência
m/s	Metro por segundo	Velocidade
s	Segundo	Tempo
Ω	<i>Ohm</i>	Resistência elétrica
\emptyset	Diâmetro	---
N	<i>Newton</i>	Força
kS/s	<i>Sampling rate up to</i>	Taxa de amostragem máxima
k Ω	<i>Kilo Ohm</i>	---
Vcc	Volts em corrente contínua	---
Vca	Volts em corrente alternada	
rpm	Rotação por minuto	RPM
Ks	Constantes relativas ao material	---
kHz	<i>Kilo Hertz</i>	Quilohertz
MHz	<i>Mega Hertz</i>	Megahertz
kW	<i>Kilowatts</i>	Quilowatts
mA	Miliampere	---
mm	Milímetro	---
H _m	Espessura média de cavaco	---
HB	Resistência do material	---
A _p	Profundidade de corte	---
A _e	Largura de corte	---

V _F	Velocidade de avanço mm/min	V _F
V _C	Velocidade de corte em m/min	---
F _Z	Avanço por dente em mm	---
V _B	Desgaste frontal ou de flanco	---
N _c	Potência de corte	---
N _f	Potência de avanço	---
N _e	Potência efetiva	---
P _c	Potência média de corte	---
HSC	Usinagem a altas velocidades	---
Z	Numero de dentes da fresa	---
D	Diâmetro	---
ms	Milissegundos	---
S	Rotação da ferramenta	---
F	Velocidade de avanço	---
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificação	---
EA	Emissão Acústica	---
SAE1045	---	Aço com 0,45% de carbono em sua composição química
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>	Organização Internacional para Padronização
RMS	<i>Root mean square</i>	Média quadrática
PC	<i>Personal Computer</i>	Computador Pessoal
HP	<i>Horse-power</i>	Cavalos de Potência
TWEM	<i>Tool Wear Estimation Method</i>	Desgaste ferramenta método de estimativa
UPC-E	Universal Power Cell - Ethernet	Célula de Potência Universal - Internet
IP	<i>Ethernet Protocol</i>	Protocolo de Internet
TC	Transformador de Corrente	---
TP	Transformador de Potencial	---
NI	<i>National Instruments</i>	Instrumentos Nacionais
USB	<i>Universal Serial Bus</i>	Universal Barramento Serial
Bit	<i>Binary digit</i>	Dígito binário
A/D	<i>Digital / Analog</i>	Analógico / Digital

DAQ	Aquisição de Dados	---
<i>LabVIEW</i>	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>	---
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>	Fabricação Assistida por Computador
CAD	<i>Computer Aided Design</i>	Desenho Auxiliado por Computador
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>	Sociedade de Engenheiros Automotiva
VI	<i>Virtual Instruments</i>	Instrumento Virtual

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	28
1.1 JUSTIFICATIVA	29
1.2 OBJETIVOS	29
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	29
1.4 DIVISÃO DO TRABALHO	30
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1 USINAGEM PELO PROCESSO DE FRESAMENTO	31
2.1.1 FRESAMENTO FRONTAL E TANGENCIAL.....	32
2.1.2 FRESAMENTO DISCORDANTE E CONCORDANTE	33
2.1.3 FRESAMENTO EM ALTA VELOCIDADE	34
2.1.4 FRESAMENTO POR MICRO USINAGEM.....	35
2.1.5 FRESAMENTO SEM LUBRI-REFRIGERAÇÃO	35
2.2 DESGASTES DA FERRAMENTA DE CORTE EM USINAGEM	36
2.2.1 DESGASTE DE FLANCO	37
2.2.2 DESGASTE DE CRATERA.....	38
2.2.3 DESGASTE DE ENTALHE.....	39
2.3 AVARIAS EM FERRAMENTAS DE CORTE EM USINAGEM	39
2.3.1 DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS DA ARESTA DE CORTE.....	40
2.3.2 TRINCAS DE ORIGEM TÉRMICA	40
2.3.3 TRINCAS DE ORIGEM MECÂNICA	41
2.3.4 LASCAMENTO DAS ARESTAS DE CORTE	42
2.3.5 QUEBRA DA FERRAMENTA DE CORTE	42
2.4 MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE USINAGEM	43
2.4.1 ARESTA POSTIÇA DE CORTE.....	44
2.4.2 A ABRASÃO MECÂNICA OU ATRITO.....	45
2.4.3 ADERÊNCIA	45
2.4.4 DIFUSÃO	46
2.4.5 OXIDAÇÃO.....	46
2.5 VIDA ÚTIL DA FERRAMENTA DE USINAGEM	46
2.6 POTÊNCIA DE CORTE EM FRESAMENTO	48
2.7 MONITORAMENTO DA USINAGEM.....	49
2.7.1 MÉTODOS DE MONITORAMENTOS.....	50
2.7.1.1 MÉTODOS DIRETOS.....	50
2.7.1.2 MÉTODOS INDIRETOS.....	51
2.7.2 POTÊNCIA DE CORTE	51

2.7.3	EMISSÃO ACÚSTICA.....	55
2.7.4	VIBRAÇÕES	56
2.7.5	FORÇAS DE CORTE	58
2.7.6	TEMPERATURA DE CORTE	59
2.7.7	CORRENTE ELÉTRICA E FORÇAS DE CORTE.....	60
3.	DESENVOLVIMENTO	62
3.1	MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.2	CENTRO DE USINAGEM <i>SKYBULL 600</i>	63
3.3	TRANSDUTOR DE POTÊNCIA UPC-E	64
3.3.1	SINAIS DE SAÍDA	65
3.3.2	PRECISÃO	65
3.3.3	TEMPO DE RESPOSTA	65
3.3.4	FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO	66
3.3.5	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	66
3.3.6	INSTALAÇÃO DO SENSOR	68
3.3.7	CONFIGURAÇÃO DO TRANSDUTOR DE POTÊNCIA	70
3.4	PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS NI USB-6009	71
3.4.1	CONEXÃO DA PLACA COM TRANSDUTOR.....	72
3.5	FORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	74
3.6	CONFIGURANDO O SISTEMA PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	75
3.6.1	CRIANDO VI	75
3.6.2	RUÍDOS NO SISTEMA	79
3.6.3	PROGRAMA PARA AQUISIÇÃO EM <i>LABVIEW</i>	80
3.7	EXPERIMENTOS PRELIMINARES.....	81
3.7.1	FERRAMENTA PARA OS EXPERIMENTOS PRELIMINARES	83
3.8	CURVA DE VIDA DA FERRAMENTA	83
3.8.1	FERRAMENTA DE CORTE.....	86
3.8.2	CONDIÇÕES DE CORTE	86
3.9	CORPO DE PROVA PARA TESTE FINAL E CURVA DE VIDA.....	86
3.9.1	CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL DO CORPO DE PROVA	87
3.9.2	ENSAIOS DE DUREZA NO CORPO DE PROVA	88
3.10	EXPERIMENTOS FINAIS.....	91
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	92
4.1	RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS PRELIMINARES.....	92
4.2	RESULTADOS DO EXPERIMENTO DA CURVA DE VIDA.....	97
4.3	RESULTADOS DO EXPERIMENTO FINAL	99
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	101

5.1 OPORTUNIDADES DE MELHORIAS	101
REFERÊNCIAS.....	103
ANEXO A	108
ANEXO B	116
ANEXO C.....	119

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).

1.1 Justificativa

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 transferência tecnológica poderão ser utilizados tanto na escola como em situações industriais.

1.2 Objetivos

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

1.3 Objetivos específicos

Para o desenvolvimento do sistema de monitoramento foram definidos os seguintes objetivos específicos;

- Definir a influência dos parâmetros de trabalho de fresamento na potência elétrica;
- Relacionar o comportamento da potência elétrica consumida na usinagem com o desgaste da ferramenta de corte;
- Definir a arquitetura de monitoramento da potência elétrica nas condições de usinagem;
- Coletar e gerar o histórico dos dados referente a variação da potência elétrica consumida durante diferentes processos de usinagem.

1.4 Divisão do trabalho

Neste capítulo, foram descritos os objetivos e a justificativa do nosso sistema de aquisição o monitoramento. No capítulo 2 será descrito a revisão bibliográfica empregada neste trabalho. O capítulo 3 tratará do desenvolvimento do projeto e no capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos. E por último no capítulo 5 serão abordadas a conclusão e algumas sugestões para futuros trabalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Usinagem pelo processo de fresamento

O processo de fresamento é caracterizado pelo movimento relativo entre a ferramenta de corte que gira e entra em contato com a peça. O metal é conformado através da remoção pelas arestas cortantes da ferramenta que giram à medida que a peça realiza movimentos de trajetória, dando assim formas a peça. O fresamento é considerado um processo de corte interrompido e não uniforme, ou seja, as arestas de corte da ferramenta engrenam no material uma após a outra. Durante a operação de fresamento as arestas de corte da ferramenta entram e saem do material, então se considera que o fresamento é uma usinagem interrompida. Por causa do corte interrompido, as arestas de corte da ferramenta sofrem com o choque térmico, devido ao atrito quando estão em contato com o material e posterior resfriamento quando sai da peça (MITSUBISHI, 2007).

Uma vantagem significativa do processo de fresamento é a formação de cavacos curtos, devido ao corte interrompido, ao contrário do torneamento, que forma cavacos em fita, difíceis de serem manipulados e armazenados (DINIZ *et al.*, 2008).

A ferramenta utilizada no fresamento pode apresentar as mais variadas formas, por isso, a operação de fresamento é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria, devido a sua grande versatilidade e possibilidade de gerar os mais diversos tipos de superfície (DINIZ *et al.*, 2008).

Segundo DINIZ *et al.* (2008), o fresamento é dividido em duas categorias, o fresamento frontal e o fresamento tangencial. O fresamento ainda pode ser classificado em horizontal, vertical ou inclinado conforme a posição do eixo árvore da máquina ferramenta.

2.1.1 Fresamento frontal e tangencial

No fresamento frontal, a superfície gerada é perpendicular ao eixo da fresa, e as arestas cortantes estão na parte frontal da ferramenta. As fresas são chamadas de frontais ou de topo (DINIZ *et al.*, 2008).

Para o fresamento tangencial, a superfície gerada é paralela ao eixo da fresa. As arestas cortantes estão na superfície cilíndrica da ferramenta e as fresas são chamadas de fresas tangenciais ou cilíndricas (DINIZ *et al.*, 2008).

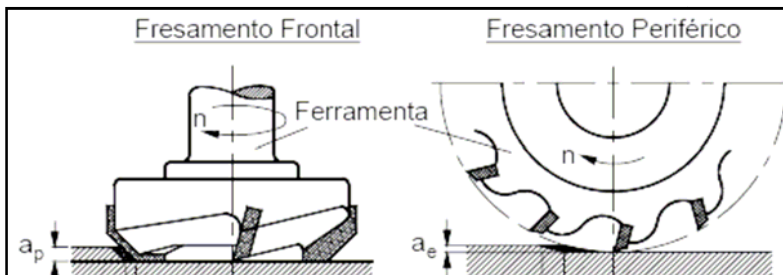


FIGURA 1 - Fresamento frontal e tangencial
Fonte: Blogspot, 2014

A partir dessas duas classificações básicas, existem vários tipos e formatos de fresas para gerar a superfície desejada. Geralmente as fresas são fabricadas em aço rápido, aço rápido com cobertura ou metal duro. Fresas de grandes diâmetros tem seu corpo fabricado em aço carbono e as arestas são feitas de metal duro (DINIZ *et al.*, 2008).

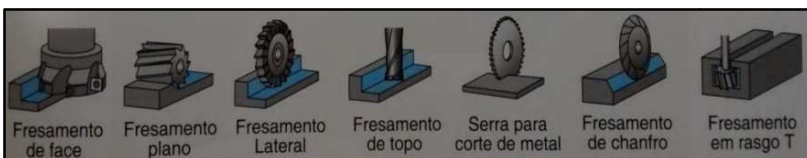


FIGURA 2 - Tipos de fresas
Fonte: Mitsubishi, 2007

2.1.2 Fresamento discordante e concordante

No fresamento discordante o sentido do avanço da mesa da máquina na qual está fixada a peça é contrário ao sentido de giro da fresa. Quando a aresta cortante penetra no material, ela retira uma espessura menor, e quando a aresta sai do material, o cavaco tem sua espessura máxima. As forças resultantes no fresamento discordante geram vibrações e atritos indesejados que podem prejudicar o acabamento da superficial e a tolerância da peça fresada (DINIZ *et al.*, 2008).

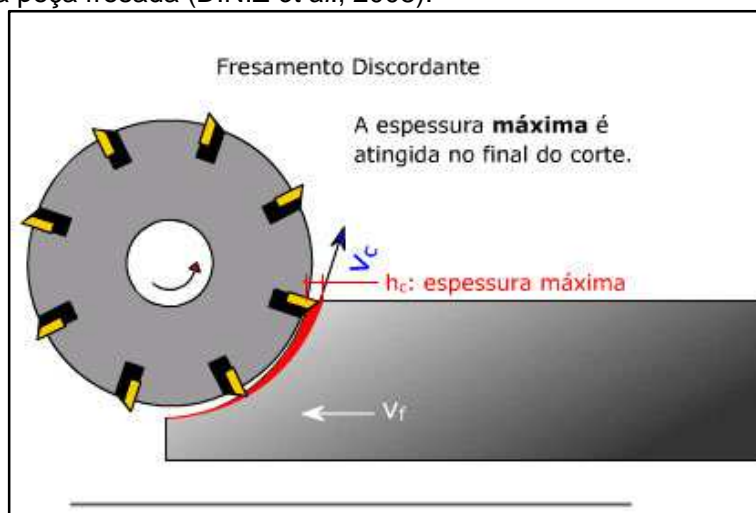


FIGURA 3 - Fresamento tangencial discordante
Fonte: Portal metálica construção civil, 2014

Para o fresamento concordante o sentido de avanço da mesa é o mesmo do giro da fresa, quando a aresta cortante penetra no material o cavaco tem sua espessura máxima, e na saída da arresta, tem-se a espessura mínima. No fresamento concordante as forças resultantes tendem a empurrar a peça em direção a mesa, reduzindo os problemas de vibração (DINIZ *et al.*, 2008).

Conforme Diniz *et al.* (2008) o fresamento concordante não é aconselhado para usinagem de peças com camada superficial

muito dura, com crosta de fundição ou forjamento, pois nesse caso a aresta penetra na peça em condições desfavoráveis, o que pode diminuir a vida útil da ferramenta. Outro inconveniente no fresamento concordante é a vibração causada quando existe folga no conjunto fuso-porca, esse problema pode ser corrigido utilizando sistema de fusos com esferas recirculantes, fato esse que praticamente elimina a folga no conjunto. Dessa forma o fresamento concordante possibilita melhor acabamento, sendo escolhido em muitos casos.

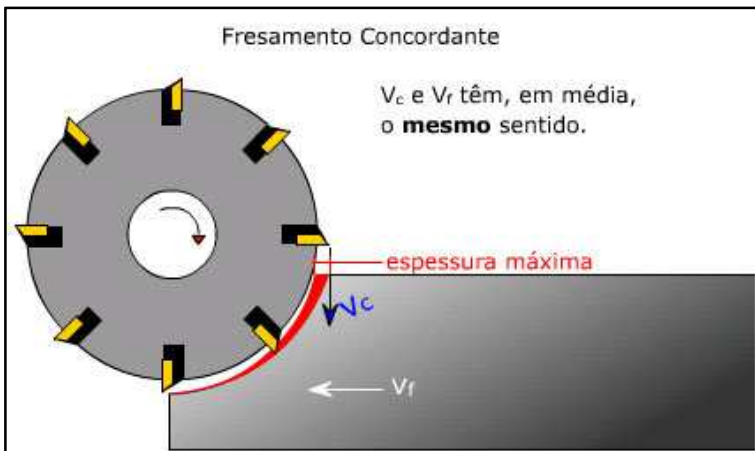


FIGURA 4 - Fresamento tangencial concordante
Fonte: Portal metálica construção civil, 2014

2.1.3 Fresamento em alta velocidade

A definição de usinagem a altas velocidades (HSC) não é simples, uma vez que a velocidade máxima que pode ser atingida depende do tipo de material da peça, tipo da operação de corte e da ferramenta usada (SCHULZ, 1993).

A usinagem a altas velocidades surge com um potencial considerável para o aumento da qualidade e produtividade de empresas de importantes setores industriais, como aeronáutico, automobilístico, produção de moldes e matrizes. Em geral, as velocidades de corte empregadas na usinagem HSC são de 5 a 10 vezes maiores que os da usinagem convencional (POLLI,

2005). As faixas de rotação vão de 1.000 até 100.000 rpm, dependendo da aplicação (GRZESIK, 2008).

Nos últimos anos, aconteceram muitos desenvolvimentos significativos em alta velocidade de usinagem, em relação a centros de usinagem e controles, sistemas de ferramentas e CAD/CAM (GRZESIK, 2008).

Hoje em dia, o corte HSC é dominado por operações de fresamento, principalmente nas indústrias automotivas, de aeronaves e de moldes. Nas indústrias automotivas o HSC é utilizado nas operações de faceamento em blocos de motores ou caixas de câmbio. Nas indústrias de aeronaves, para usinagem de peças grandes e complexas, utilizando fresas de topo pequenas. O HSC também é utilizado para fabricação de peças precisas em setores da indústria eletrônica (GRZESIK, 2008).

2.1.4 Fresamento por micro usinagem

A micro usinagem está se tornando uma tecnologia de fabricação importante, devido à demanda crescente para produtos miniaturizados nos últimos anos. Muitos setores industriais requerem micro-componentes, por exemplo, telecomunicação, automobilístico, tecnologia e biomédica (MARANHÃO, 2012).

O micro fresamento utilizando ferramentas com dimensões inferiores a 1 mm, tem se tornado um importante método de fabricação de micro-peças complexas, que exigem variedades de materiais, formas e interfaces funcionais. Estudos científicos em universidades e empresas, visando ao aprimoramento de processos, máquinas e ferramentas, têm sido realizados cada vez mais em países como Estados Unidos, Japão, China, Alemanha, Canadá, Espanha e Inglaterra. No Brasil, o cenário da micro usinagem pode ser considerado inicial, porém muito promissor (RODRIGUES, 2014).

2.1.5 Fresamento sem lubri-refrigeração

Os fluídos refrigerantes para usinagem, baseados em emulsão, ainda são usados em grande quantidade na indústria de processamento metal-mecânica, gerando elevados custos de consumo e de descarte, além do prejuízo ambiental e danos a saúde dos operadores. No entanto, na última década tem se intensificado cada vez mais as pesquisas a fim de se restringir ou eliminar ao máximo o uso dos fluídos de corte na usinagem. (DE PAULA, 2007).

De acordo com as estatísticas de fabricação, o custo total para adquirir, manter e descartar os líquidos refrigerantes representa entre 7 a 16% do custo total da produção. Assim com o objetivo de reduzir custos, duas alternativas para eliminar o uso do fluido lubri-refrigerante são estudadas atualmente, a usinagem sem lubri-refrigerante e a mínima quantidade de lubrificação (MQL). A técnica de refrigeração MQL consiste em empregar a quantidade mínima de líquido utilizando o ar aplicado a elevadas pressões como veículo para o lubrificante. A função de lubrificação é assegurada pelo óleo, e a de refrigeração, pelo ar comprimido. A retirada do fluído lubri-refrigerante do processo de usinagem, requer características especiais do projeto para as máquinas-ferramentas, especialmente para controlar as tensões térmicas e garantir o controle e expulsão de cavacos da área de trabalho (GRZESIK, 2008).

2.2 Desgastes da ferramenta de corte em usinagem

Existem diversos tipos de avarias e desgastes que podem ocorrer em uma ferramenta. Assim torna-se fundamental definir as diferenças entre avarias e desgaste. O desgaste é a perda gradual e microscópica de pequenas partículas da aresta cortante, enquanto as outras ocorrências são chamadas de avarias (DINIZ *et al.*, 2008).

A medição dos desgastes pode ser feita através de uma lupa, ou com mais precisão utilizando um microscópio com mesa de avanço micrométrico, permitindo a leitura em centésimos de milímetro (FERRARESI, 1970).

O desgaste de ferramenta é um termo que deve ser claramente definido antes de se iniciar a tarefa de monitoramento.

O colapso total da ferramenta é classificado por dois estados que são quebrado ou não quebrado. Para a classificação do desgaste da ferramenta é possível empregar mais de dois estados. O monitoramento do desgaste deve ser feito através de uma avaliação contínua do desgaste e da condição da ferramenta durante todo processo de usinagem. Os parâmetros que definem o desgaste da ferramenta são a largura média e máxima de desgaste de flanco, a profundidade, o comprimento e a largura do desgaste de cratera. Para monitorar o desgaste é necessário estabelecer vários grupos de desgastes que praticamente apresentam uma estratégia de monitoramento promissora. Pode-se dizer que o desgaste é um contínuo monitoramento e que a avaliação contínua seria a mais apropriada a adequar os processos físicos (SOUZA, 2004).

2.2.1 Desgaste de flanco

O desgaste frontal ou de flanco, também chamado de V_B ocorre na superfície de folga (parte frontal da ferramenta) durante o contato da ferramenta com a peça. O desgaste de flanco é considerado o tipo mais comum de desgaste e ocorre em todos os processos de usinagem. Esse tipo de desgaste causa variações de medida na peça e alterações no acabamento da superfície, fenômeno que ocorre devido à alteração da aresta de corte. O desgaste de flanco é medido na superfície de folga, mede-se a largura do desgaste V_B que é um valor médio do desgaste (DINIZ *et al.*, 2008).

Um aumento da velocidade de corte contribui para um aumento do desgaste de flanco, por isso qualquer alteração nesse parâmetro deve ser muito bem estudado. Uma velocidade de corte muito alta e ferramentas com pouca resistência ao desgaste causam índices elevados de desgaste de flanco, nessas condições é aconselhado reduzir a velocidade de corte e utilizar ferramentas com maior resistência ao desgaste (SANDVIK, 2014).

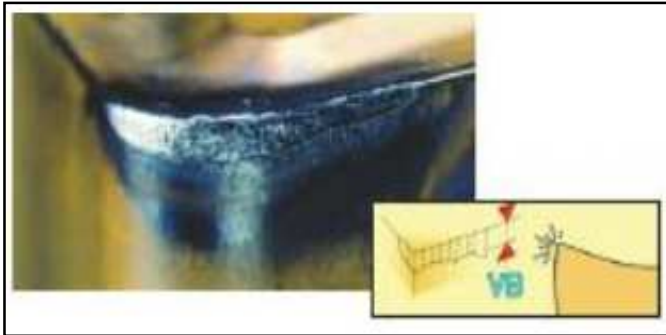


FIGURA 5 - Desgaste de flanco

Fonte: SANDVIK, 2014

2.2.2 Desgaste de cratera

Desgaste de cratera é causado pelo atrito entre o cavaco e a superfície de saída do cavaco, quando o desgaste de cratera encontra-se com o desgaste frontal pode ocorrer à quebra da ferramenta. A craterização pode não ocorrer em alguns processos de usinagem, como aqueles em que o material usinado é frágil e tem formação de cavacos curtos, ou em ferramentas com coberturas especiais, como o metal duro com cobertura ou ferramentas cerâmicas (DINIZ *et al.*, 2008).



FIGURA 6 - Desgaste de cratera

Fonte: SANDVIK, 2014

2.2.3 Desgaste de entalhe

O desgaste de entalhe ocorre nos dois extremos do contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça. Esse tipo de desgaste ocasiona deterioração no acabamento superficial (DINIZ *et al.*, 2008).

Com o desgaste de entalhe ocorre o risco de quebra da ferramenta, pode ser causado na usinagem de materiais temperados ou com cascas. A solução para o desgaste de entalhe pode ser reduzir a velocidade de corte, selecionar uma classe de ferramenta mais tenaz, ou até mesmo aumentar a velocidade de corte (SANDVIK, 2014).



FIGURA 7 - Desgaste de entalhe
Fonte: SANDVIK, 2014

2.3 Avarias em ferramentas de corte em usinagem

São consideradas avarias em ferramentas de corte em usinagem as deformações plásticas, trincas de origem térmica, trincas de origem mecânica e lascamentos das arestas de corte. Todos esses fatores podem levar a quebra da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2008).

2.3.1 Deformações plásticas da aresta de corte

Uma pressão excessiva de corte junto à alta temperatura na ponta da ferramenta pode causar a deformação plástica na aresta de corte, afetando diretamente o acabamento superficial da peça e causando deficiência no controle do cavaco. O aumento da deformação da aresta pode causar a quebra da aresta de corte. A deformação plástica pode ser impedida empregando-se materiais para fabricação da ferramenta com maior dureza, melhor desempenho em altas temperaturas ou mudando as condições de corte e geometria da ferramenta, buscando diminuir os esforços e a temperatura de corte (DINIZ *et al.*, 2008).

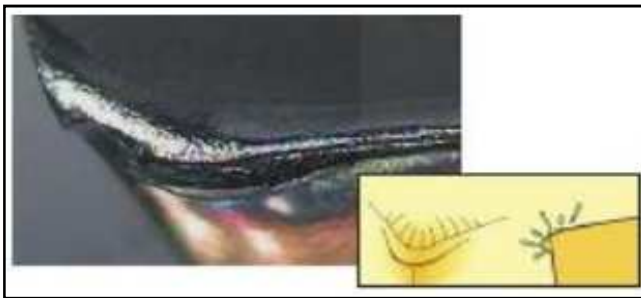


FIGURA 8 - Desgaste por deformação plástica
Fonte: SANDVIK, 2014

2.3.2 Trincas de origem térmica

No fresamento as variações de temperatura são comuns devido ao corte interrompido e a variação na espessura de corte. Isso acontece quando a aresta sai do material em alta temperatura, entra rapidamente em contato com o ar e se resfria rapidamente, então novamente a aresta entra na peça voltando a aquecer. Quando é utilizado fluido lubri-refrigerante o resfriamento é ainda mais rápido. Essas variações de temperatura podem causar trincas de origem térmica. As trincas

de origem térmica são perpendiculares a aresta de corte, por isso, quando se utiliza ferramentas de metal duro em fresamento, a vida da ferramenta é maior no corte sem lubri-refrigeração (DINIZ *et al.*, 2008).

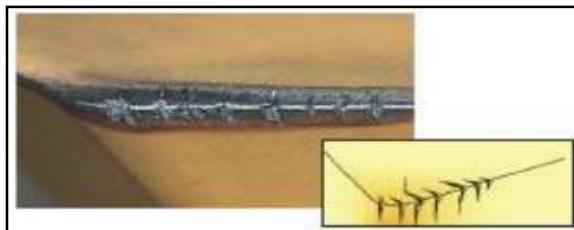


FIGURA 9 - Trincas origem térmica
Fonte: SANDVIK, 2014

2.3.3 Trincas de origem mecânica

Por causa do corte interrompido em fresamento, a aresta de corte sofre um impacto quando entra na peça, podendo com isso causar trincas de origem mecânica. Essas trincas são paralelas a aresta de corte. Tanto as trincas de origem mecânica como a de origem térmica pode causar a quebra da ferramenta. Para diminuir as trincas no fresamento pode-se diminuir o avanço por dente, escolher uma ferramenta mais tenaz e posicionar corretamente a fresa em relação à peça. As trincas de origem mecânica quando somadas as trincas de origem térmica resultam na cunha cortante chamada sulco em forma de pente (DINIZ *et al.*, 2008).

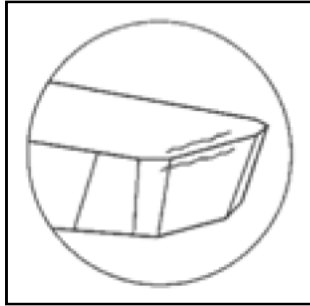


FIGURA 10 - Trincas de origem mecânica
Fonte: FUMEP, 2014

2.3.4 Lascamento das arestas de corte

O lascamento é outro tipo de avaria no qual ocorre a perda de partículas maiores da ferramenta, acontece quando o material da ferramenta é frágil ou em arestas pouco reforçadas, esse fenômeno prejudica o acabamento da peça e pode levar a quebra da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2008).



FIGURA 11 - Lascamento da ferramenta
Fonte: SANDVIK, 2014

2.3.5 Quebra da ferramenta de corte

O desgaste excessivo de uma ferramenta ou as avarias podem levar a quebra da ferramenta, porém a quebra também

pode acontecer de forma inesperada devido a alguns fatores. Pode-se citar como exemplo em fresamento o entupimento dos bolsões de armazenamento de cavaco. Uma quebra pode causar danos no inserto, aos suportes ou porta ferramentas, a peça usinada ou em alguma peça da máquina de usinagem (DINIZ *et al.*, 2008).

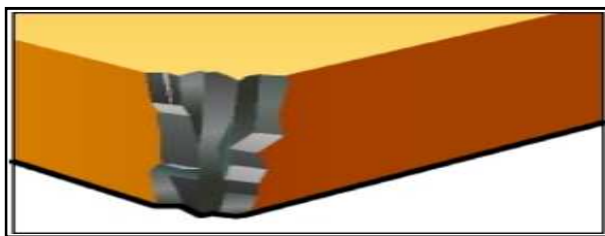


FIGURA 12 - Quebra da ferramenta
Fonte: SANDVIK, 2014

2.4 Mecanismos de desgaste em ferramentas de usinagem

É importante se conhecer os principais mecanismos de desgaste das ferramentas, segundo Diniz *et al.* (2008), os principais são a aresta postiça de corte, abrasão mecânica ou atrito, aderência, difusão e oxidação.

O desgaste frontal ocorre por abrasão em altas velocidades de corte e quando há o cisalhamento da aresta postiça de corte. O desgaste de cratera decorre principalmente devido a difusão e o desgaste de entalhe ocorre devido à aderência e oxidação. É bastante difícil identificar o quanto cada fenômeno contribui para o desgaste da ferramenta, já que muitas vezes eles ocorrem ao mesmo tempo. Mas é possível dizer que em altas velocidades de corte resultam em elevadas temperaturas na região de contato ferramenta-peça, predominando os desgastes por abrasão, difusão e oxidação. Em velocidades de corte mais baixas predominam o desgaste pela formação de aresta postiça e aderência (DINIZ *et al.*, 2008).

2.4.1 Aresta postiça de corte

Aresta postiça de corte é o fenômeno que ocorre principalmente em baixas velocidades de corte, através do atrito entre o cavaco e a superfície de saída do mesmo, causando acabamento superficial ruim na peça. Pequenas partículas de cavaco se aderem à superfície de saída e com o posterior fluxo de cavaco outras partículas se juntam as primeiras. Uma característica da aresta postiça de corte é a elevada resistência mecânica devido à deformação e encruamento, então a aresta postiça acaba fazendo o corte do material, o qual deveria ser feito pela aresta da ferramenta. A aresta postiça vai crescendo até um ponto onde ocorre o rompimento, então uma parte da aresta sai pela superfície de folga, desgastando a parte frontal e a outra é levada pelo cavaco. O desgaste de cratera tende a diminuir, pois o cavaco passa a atritar com a aresta postiça e não com a superfície de saída (DINIZ *et al.*, 2008).

Pode-se evitar a formação de aresta postiça utilizando velocidades de corte mais altas, aumentando o avanço por dente (F_z) e utilizando uma ferramenta com geometria de corte positiva (SANDVIK, 2014).



FIGURA 13 - Aresta postiça
Fonte: SANDVIK, 2014

2.4.2 A abrasão mecânica ou atrito

Desgaste por abrasão é incentivado por partículas duras do material usinado ou partículas da própria ferramenta que são arrastadas para outra região da ferramenta. O desgaste por abrasão é maior no flanco da ferramenta, já que o contato se dá em uma região rígida da peça. O desgaste de cratera por abrasão é menor, pois o contato é com o cavaco que tem a característica de ser flexível. Outro fator que aumenta o desgaste por abrasão é a alta temperatura de corte que diminui a dureza da ferramenta, por isso é indicado usar ferramentas com maior dureza a quente para evitar desgaste por abrasão (DINIZ *et al.*, 2008).

2.4.3 Aderência

O fenômeno da aderência ocorre quando há baixas velocidades de corte e baixas temperaturas, onde partículas de um metal aderem ao outro metal. Acontece aderência também na formação da aresta postiça, entretanto pode ocorrer aderência sem a formação de aresta postiça. Quando as partículas de material de elevada dureza são levadas pelo fluxo de cavacos ou pelo movimento da peça em relação à ferramenta, acabam atritando com outras regiões da ferramenta causando desgaste abrasivo. Geralmente a zona de escorregamento, a profundidade irregular, o corte interrompido e a falta de rigidez facilitam o fenômeno da aderência (DINIZ *et al.*, 2008).

Algumas medidas que podem diminuir a aderência são, por exemplo, o uso de óleos de corte com ação lubrificante, o uso de ferramentas com coberturas que diminuem o atrito, como o nitreto de titânio, com o intuito de melhorar a rigidez e desempenho na usinagem (DINIZ *et al.*, 2008).

2.4.4 Difusão

A difusão é um fenômeno ativado pela alta temperatura na zona de corte, acontece a nível atômico e consiste na transferência de átomos de um material para o outro. Essa passagem de átomos ocorre se houver afinidade física química entre o material da ferramenta e o material da peça. Um exemplo de desgaste por difusão é a usinagem de ligas ferrosas com ferramentas de diamante, o carbono do diamante tem afinidade com o ferro, então o processo de difusão é estimulado. Entretanto, não ocorre difusão em ferramentas de aço rápido, devido às baixas velocidades de corte usadas com essa ferramenta e baixas temperaturas (DINIZ *et al.*, 2008).

Além disso, não ocorre difusão nas ferramentas de cerâmica usinando materiais ferrosos e também no caso do metal duro com revestimento cerâmico. A difusão pode ser a grande responsável pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte, porque na superfície de saída ocorrem as condições necessárias para a difusão (DINIZ *et al.*, 2008).

2.4.5 Oxidação

A oxidação dos metais é gerada mesmo em condições normais de corte, devido ao aquecimento da ferramenta próximo a aresta cortante e a presença de ar e água (presente nos fluídos de corte). Esse fenômeno ocorre principalmente nas extremidades do contato do cavaco com a ferramenta, devido à presença de ar nessa região. A formação de filmes de óxidos é posteriormente levada pelo atrito, gerando desgaste (DINIZ *et al.*, 2008).

2.5 Vida útil da ferramenta de usinagem

A vida útil da ferramenta de usinagem é o tempo que a mesma trabalha até perder sua capacidade de corte dentro de

um critério previamente estabelecido. Após o fim da vida útil a ferramenta deve ser substituída ou reafiada (DINIZ *et al.*, 2008).

Nas operações de desbaste são tolerados desgastes mais altos, porque as tolerâncias dimensionais são grandes e o acabamento superficial ainda não é importante, porém deve-se fazer a substituição antes que ocorra a quebra por um desgaste excessivo da aresta cortante. Já em operações de acabamento, a ferramenta deve ser substituída com valores baixos de desgaste frontal, devido às tolerâncias apertadas e exigências de bons acabamentos de superfície (DINIZ *et al.*, 2008).

Nas operações de acabamento torna-se mais fácil de perceber o desgaste, porque quando ocorre um desgaste elevado na ferramenta, a peça começa sair de suas tolerâncias dimensionais. O desgaste da ferramenta é detectado pelo operador que faz a medição da peça através de instrumentos, ou utilizando calibradores do tipo passa- não-passa, ou utilizando alguma outra forma de medição. Em máquinas CNC não é necessário fazer a troca imediatamente, pois é possível corrigir a posição, compensando o desgaste. (DINIZ *et al.*, 2008).

O operador pode ser o responsável por decidir o momento da troca da ferramenta, porém no meio industrial torna-se difícil para o operador medir os desgastes da ferramenta ou medir a rugosidade da peça para saber a hora exata da troca. O que acontece na prática é que o operador acaba fazendo a troca antecipada da ferramenta, com receio de que ocorra a quebra, ou que a mesma danifique a peça (DINIZ *et al.*, 2008).

A solução para o problema da troca prematura de ferramentas está no monitoramento indireto do desgaste, utilizando sistemas equipados com sensores de emissão acústica, vibração, torque, medindo os parâmetros elétricos do motor da máquina e também o investimento em treinamento de operadores (DINIZ *et al.*, 2008).

Os principais fatores que influenciam na vida da ferramenta são as condições de usinagem e a geometria da ferramenta. Analisando primeiramente as condições de usinagem, o fator que tem maior influência no desgaste é a velocidade de corte, seguida pelo avanço e a profundidade de corte. Dessa forma o aumento da velocidade de corte ou do avanço, reduz o tempo de vida da ferramenta, entretanto a contribuição da velocidade de corte no desgaste em geral é muito maior (DINIZ *et al.*, 2008).

A geometria da ferramenta também influencia no desgaste. O ângulo de ponta da ferramenta deve ser o maior possível para evitar o enfraquecimento da aresta. Aumentando o ângulo de folga se diminui a cunha da ferramenta enfraquecendo a mesma, em compensação contribui para um menor desgaste frontal, pois ocorre a diminuição da área de atrito entre ferramenta e peça (DINIZ *et al.*, 2008).

2.6 Potência de corte em fresamento

A potência requerida para o corte em fresamento varia a todo instante devido às características do processo como o corte interrompido e a variação do número de dentes em contato com o material usinado. Para fazer o dimensionamento da potência requerida para o corte é usado o cálculo da potência média de corte dado pela fórmula abaixo. O cálculo da potência média de corte pode ser usado tanto para fresamento tangencial como frontal (DINIZ *et al.*, 2008).

Fórmula para realizar o cálculo da potência média de corte em usinagem.

$$K_{s_m} = K_{s_1} \cdot h_m^{-z}$$

$$P_c = \frac{K_{s_m} \cdot a_e \cdot a_p \cdot v_f}{60 \cdot 10^6} \quad (\text{kW})$$

Onde:

K_{s_1} e $-z$ = constantes relativas ao material da peça.

P_c = Potência média de corte consumida pelo processo.

h_m = espessura média de cavaco.

a_p = profundidade de corte.

a_e = largura de corte.

v_f = velocidade de avanço.

2.7 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).

2.7.1 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).

2.7.1.1 Métodos diretos

Métodos diretos são aqueles que incluem a medição direta do desgaste, como exemplo o desgaste de flanco ou de cratera,

utilizando sistemas à base de visão. Sistemas baseados em visão são geralmente muito mais adequados a inspeção *off-line*, ou seja, aquela que não ocorre durante a usinagem, é o mais adequado para a detecção de quebra da ferramenta. Vários pesquisadores têm examinado o uso de visão para a medição do desgaste da ferramenta, no entanto, percebeu-se que o principal problema enfrentado nesse método era a hostilidade do ambiente de corte. A poeira e partículas de cavacos acumulados no instrumento óptico podem resultar em falsa indicação de desgaste da ferramenta (BOTSARIS; TSANAKAS, 2008).

2.7.1.2 Métodos indiretos

É a medição realizada durante o processo de usinagem, medição do desgaste ou detecção da quebra da ferramenta, essa medição é feita através do monitoramento de sinais que possuem relações com o processo de corte. A principal vantagem dos métodos indiretos é que eles são aplicados *on-line*, ou seja, durante a usinagem. Há uma tendência entre os pesquisadores no sentido de aplicação de certos métodos indiretos, tais como a corrente ou potência do motor *Spindle*, as forças de corte, a temperatura, as vibrações e a emissão acústica (BOTSARIS; TSANAKAS, 2008).

2.7.2 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

crecendo, 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/mm² e sem a utilização de fluido lubrificante. 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 ($V_B=0,98$ 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).

2.7.3 Emissão acústica

Segundo Botsaris e Tsanakas (2008), a emissão acústica (EA) é um fenômeno que ocorre quando, por razões diferentes, um pequeno deslocamento da superfície do material é produzido devido a ondas de pressão geradas quando há uma rápida liberação de energia por um material, ou na sua superfície.

Cisneros *et al.* (2003), propôs um sistema de aquisição de dados via emissão acústica baseado em sensores piezo elétricos montados no porta ferramenta, realizando o monitoramento em tempo real do desgaste de fresas de topo. A frequência dos sinais de EA está na faixa dos 100kHz a 1MHz. Conforme os autores um problema no monitoramento da condição da ferramenta por EA foi o ruído no sinal medido. A solução encontrada foi a utilização de sistema de filtragem dos sinais com o intuito de eliminar ruídos. Para eliminar ruídos de origem eletromagnética que aparecem em frequências acima de 1MHz, foi implementado um filtro passa baixa, logo após o sensor de EA.

Com a finalidade de eliminar os ruídos de origem mecânica (vibrações do sistema de usinagem), foi instalado um filtro passa alta. Após o sistema de filtragem o sinal é amplificado para o posterior processamento de sinal (CISNEROS *et al.*, 2003).

Como o sensor estava montado na parte girante da ferramenta foi necessário construir um sistema adequado para alimentação elétrica do sensor. Diferentes alternativas para a alimentação eletrônica foram propostas, entre elas, a alimentação por escovas e o transformador rotativo. Optou-se pela construção do transformador rotativo, pois a utilização de escovas gera problemas de ruído (CISNEROS *et al.*, 2003).

O projeto do transformador rotativo consiste de uma bobina primária fixa e uma bobina secundária montada na parte girante do porta ferramenta. Concluiu-se que o projeto do transformador rotativo foi aplicado com sucesso, podendo assim fazer medições de EA através dos sinais oriundos da ferramenta (CISNEROS *et al.*, 2003).

Kim *et al.* (1999) apresentaram o desenvolvimento de um sistema de emissão acústica, onde o sensor foi instalado na peça de trabalho com o intuito de monitorar a vida da ferramenta em tempo real na formação de engrenagens. Os experimentos foram realizados sobre a formação da engrenagem de aço carbono SCM 420 com uma fresa de perfil constante para 44 dentes. Os sinais foram coletados por um sensor de emissão acústica conectado a um conversor RMS. O valor de tensão RMS dos sinais de EA foi analisado por um computador pessoal. O valor de tensão (RMS) do sinal aumenta regularmente de acordo com o desgaste da ferramenta. Sugere-se que o valor máximo da tensão RMS é um parâmetro eficaz para monitorar a vida da ferramenta.

O sistema de monitoramento da vida da ferramenta em tempo real foi desenvolvido e aplicado com sucesso no processo de formação de engrenagens (KIM *et al.*, 1999).

2.7.4 Vibrações

Doukas *et al.* (2013) apresentou os resultados de uma investigação experimental sobre desgaste de ferramenta no

fresamento de topo. Sinais de vibrações no fuso foram registrados durante o processo. Um sistema de aquisição de dados baseado em PC foi utilizado no estudo do desgaste, que envolve um módulo de aquisição de sinal e um conversor dedicado analógico-digital. Como sensor de vibração foi utilizado um acelerômetro de três eixos, neste estudo também foi feita uma análise em paralelo com sensores de corrente no motor do *Spindle*, para uma posterior comparação entre os dois métodos.

Uma fresadora CNC de 3 eixos, com motor de 5HP foi usada para usinagem de uma placa projetada e construída para permitir o posicionamento do sensor de aceleração o mais próximo possível da área de usinagem. Os sinais do acelerômetro são monitorados no início, meio e fim de cada passe, por um período de 10 segundos para minimizar a quantidade de dados coletados e permitir um processamento rápido. Conforme os autores o consumo de corrente elétrica sobe inicialmente, logo atinge um patamar mais estável e quando o desgaste da ferramenta tem valores mais elevados o consumo sobe rapidamente. O sinal do acelerômetro tem comportamento semelhante às conclusões da medição de corrente elétrica (DOUKAS *et al.*, 2013).

A análise no domínio da frequência mostrou claramente o aumento do valor do sinal quando o desgaste da ferramenta atinge um nível alto de desgaste. Ambos os sinais, consumo de corrente e aceleração podem ser processados em tempo real, permitindo o uso eficiente de ferramentas de corte para melhorar o desempenho da produção. O valor RMS do sinal de corrente elétrica pode ser usado para a avaliação do nível de desgaste, enquanto que para os sinais do acelerômetro, uma análise no domínio da frequência é necessária para obter uma indicação útil de níveis de desgaste da ferramenta (DOUKAS *et al.*, 2013).

Sinais de vibrações mecânicas são semelhantes a sinais de emissão acústica, porém sua frequência é mais baixa. Conseqüentemente, os sinais de vibração apresentam um comportamento semelhante para os sinais de EA durante o processo de desgaste da ferramenta. Assim, eles são também amplamente utilizados, como indicador de condição da ferramenta (DOUKAS *et al.*, 2013).

2.7.5 Forças de corte

Conforme Botsaris e Tsanakas (2008), o torque, o empuxo e a força de avanço em conjunto com a medição de deformação, são as medidas de forças de corte e estão fortemente correlacionadas com o desgaste da ferramenta. A idéia por detrás de monitoramento de torque e forças de avanço baseia-se no fato de que estes parâmetros dinâmicos geralmente aumentam à medida que a ferramenta desgasta gradualmente, devido ao aumento do atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho.

Kuljanic e Sortino (2005) investigaram o comportamento das forças no fresamento de topo. A máquina utilizada foi um centro de usinagem CNC, com uma fresa (diâmetro $D=100$ mm), ângulo da ponta da ferramenta $X=90^\circ$, o número máximo de dentes $Z=7$). O material da peça de trabalho foi aço DIN Ck45 (aço com médio teor de carbono) de dureza 80HB. As principais forças de corte e torque foram medidas através de um dinamômetro rotativo fixado entre a ferramenta e o fuso. Os sinais do dinamômetro foram armazenados num computador usando uma placa de aquisição de dados. O estudo introduz o conceito de indicadores de desgaste da ferramenta, que pode ser determinado pela análise dos parâmetros de corte e sinais de força. É proposto um método de estimativa de desgaste da ferramenta chamado TWEM (*Tool Wear Estimation Method*). Assim, o método de estimativa de desgaste da ferramenta TWEM, é sugerido para monitoramento de condição ferramenta no fresamento topo com fresa de uma aresta ou fresa multi-aresta, quando a largura da fresa é maior do que a largura da peça.

Cus e Zuperl (2011) desenvolveram um sistema de monitoramento de forças com sensor único. O experimento envolvia o processo de acabamento em fresamento de um aço DIN Ck45, para tanto foram utilizadas fresas de 16 mm e quatro aristas. O dinamômetro foi montado na mesa da máquina para monitorar as forças de corte em x e y. O sistema aplicado foi capaz de detectar as condições da ferramenta com precisão em tempo real. A limitação fundamental da pesquisa foi desenvolver um sistema de monitoramento com sensor único, confiável,

comercialmente disponível e até 80% mais barato do que a abordagem com multisensor.

Observou-se que as forças de corte são afetadas por condições experimentais, tais como as condições de corte, o material da peça de trabalho e do tipo de ferramenta. Tomou-se como exemplo uma velocidade de avanço mais rápida, forças de corte mais elevadas são medidos, fato esse que poderá causar confusão sobre se o aumento das forças de corte é devido ao desgaste da ferramenta ou as mudanças nas condições de corte (CUS; ZUPERL, 2011).

2.7.6 Temperatura de corte

Na busca por melhorias e otimização nos processos de usinagem de alto desempenho e a necessidade do aumento da velocidade de corte, taxa de remoção de cavacos, tem por consequência um aumento da temperatura da ferramenta em contato com a peça (SILVA, 2010).

Quando uma peça é usinada gera calor devido ao atrito do contato com a ferramenta. A temperatura gerada depende diretamente da ferramenta de corte, avanço, velocidade, profundidade de usinagem e o uso ou não de lubri-refrigeração. O aquecimento que ocorre nas arestas de corte tem relação direta com a forma em que a ferramenta se desgasta. O estudo da geração de calor e a forma que essa geração de calor acontece em uma ferramenta de corte é de grande valor para a obtenção dos mecanismos e a forma de desgaste das ferramentas. O calor gerado é considerado um importante fator para medir o desempenho da ferramenta de corte em processos de usinagem (SOUZA, 2004).

São possíveis causa de geração de calor em um processo de usinagem a zona de cisalhamento primário que é o atrito entre duas superfícies, zona de cisalhamento secundário que é a conversão de energia de deformação e zona de interface entre a peça e a ferramenta na superfície de folga. A primeira e a segunda forma de geração de calor geralmente atuam juntas, já que em um processo de usinagem o atrito e a deformação ocorrem ao mesmo tempo. As três zonas de geração de calor

estão ligadas diretamente ao desgaste da ferramenta, deste modo durante todo o processo de usinagem haverá variação no campo de temperatura, sendo assim o monitoramento da temperatura tem extremo valor quando se deseja controlar o desgaste da ferramenta (MACHADO, SILVA, 2004).

A temperatura é um fator importante a ser considerado, pois afeta diretamente na resistência da ferramenta acelerando o desgaste e alterando o dimensional da peça, mas também pode ser útil, pois reduz resistência ao cisalhamento da ferramenta com a peça, com isso acaba diminuindo a força e conseqüentemente a potência necessária para o corte (MACHADO, SILVA, 2004).

2.7.7 Corrente elétrica e forças de corte

Segundo Kim e Jeon (2011), a corrente é uma função não linear da rotação. Este não é um problema porque geralmente a rotação é fixa durante o processo de fresamento. Em seu experimento usaram medições de corrente e um dinamômetro para medir forças de corte usinando uma peça de alumínio (AL6061-T6), foram utilizadas fresas de topo de 8, 10 e 12 mm. A fim de substituir dinamômetros, que são ferramentas caras e pouco práticas, são analisadas as correntes alternadas do motor do sistema do *Spindle*, e em seguida, comparado com as medições do dinamômetro. Correntes do motor do *Spindle* foram comparados como uma alternativa prática para o dinamômetro.

Um valor DC que representa a corrente é necessário para obter uma relação linear com a força. Assim, as correntes de um motor de indução AC foram convertidas para um valor equivalente DC utilizando uma conversão RMS, conforme fórmula a seguir (KIM; JEON, 2011).

Fórmula para conversão da corrente de AC para DC (rms).

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{I_u^2 + I_v^2 + I_w^2}{3}}$$

Onde, I_u , I_v e I_w são as correntes de cada fase. A corrente é uma função não linear da rotação. No entanto, esta relação de corrente e força dependem da velocidade do eixo. Assim, a relação da corrente e força de corte precisa ser reavaliado para diferentes valores de rotação (KIM; JEON, 2011).

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 Materiais e métodos

Neste capítulo será abordado a metodologia da parte experimental do trabalho e materiais utilizados.

Primeiro foi realizado o experimento preliminar com o objetivo de verificar a sensibilidade do sistema de monitoramento de potência em função dos diferentes estágios de desgaste da ferramenta. Outro objetivo foi ajustar a estabilidade do sistema de aquisição e definir os parâmetros de corte a serem usados na curva de vida e experimento final.

Na segunda parte 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 14, 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 estêreo microscópio.

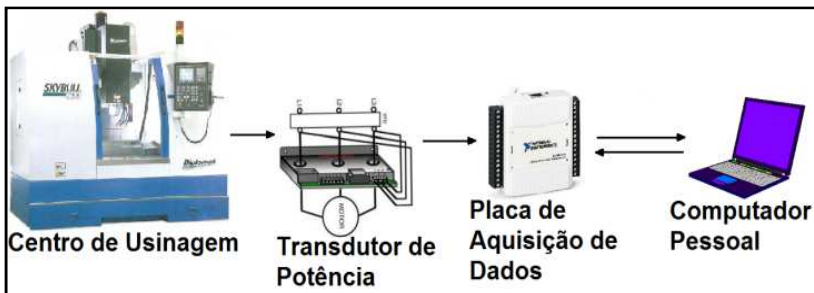


FIGURA 14 - Arquitetura dos experimentos

Fonte: Os autores

3.2 Centro de usinagem Skybull 600

A figura 15 mostra o modelo do centro de usinagem que utilizamos para realizar a usinagem dos nossos corpos de prova. Na tabela 1 são mostrados os principais dados técnicos da máquina, mais informações técnicas estão no anexo A.



FIGURA 15 - Centro de usinagem vertical CNC série VM

Fonte: Manual de instruções Skybull 600

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 (MANUAL DE INSTRUÇÕES, 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

TABELA 1 - Principais especificações técnicas da máquina CNC
Fonte: Os autores

3.3 Transdutor de potência UPC-E

O transdutor UPC-E foi o sensor utilizado para fazer a aquisição dos dados referente a potência do motor do *Spindle* da máquina CNC.

3.3.1 Sinais de saída

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).

3.3.2 Precisão

O transdutor UPC-E trabalha com uma precisão de 0,5% da escala máxima, pode ser configurado para medir cargas em motores trifásicos de 3 kW até 100 kW de potência, sendo possível fazer o ajuste da escala conforme a aplicação (LOAD CONTROLS, 2014)

3.3.3 Tempo de resposta

O tempo de resposta também pode ser ajustado de 50 ms a 16 s, a configuração dos parâmetros para utilização é feita utilizando um computador conectado ao sensor por meio de um cabo de rede via porta *Ethernet*, a comunicação é feita por meio de um IP fornecido pelo fabricante junto ao produto (LOAD CONTROLS, 2014).

3.3.4 Frequência de operação

Uma característica importante do transdutor é a possibilidade de operar em frequências variáveis (3Hz até 1KHz) e poder medir formas de ondas não senoidais. A maioria das máquinas CNC modernas trabalham com inversores de frequência, alterando a forma de onda na saída para fazer o controle da velocidade dos motores, dessa forma é feito o controle da velocidade de corte de usinagem. Este foi um ponto importante para a definição do tipo de transdutor a ser utilizado em nosso o experimento (LOAD CONTROLS, 2014).

3.3.5 Princípio de funcionamento

O funcionamento do transdutor baseia-se em três dispositivos semicondutores equilibrados de efeito Hall que detectam o campo magnético. O dispositivo semiconductor de efeito *Hall* tem as seguintes características: Quando um condutor transporta uma corrente elétrica que passa através de um concentrador de fluxo magnético circular, o sensor de efeito *Hall* capta o sinal e o mesmo é proporcional à corrente. O sinal de tensão é obtido a partir da amostra da tensão de cada fase do sistema trifásico de alimentação do motor elétrico, ligados no mesmo ponto e seqüência de fase que passam pelos sensores de corrente. Internamente o transdutor faz a multiplicação dos sinais de corrente e tensão, corrige o fator de potência e fornece um sinal analógico que é proporcional a potência elétrica consumida em kW ou HP (LOAD CONTROLS, 2014).

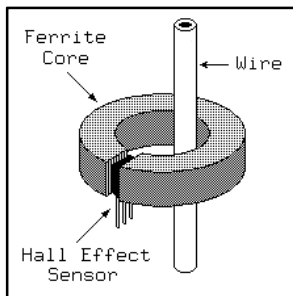


FIGURA 16 - Representação do sensor de efeito Hall
Fonte: <http://homepage.cs.uiowa.edu/~jones/step/current.html>
Acessado dia 20/02/2015

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.

3.3.6 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 figura 17. 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.

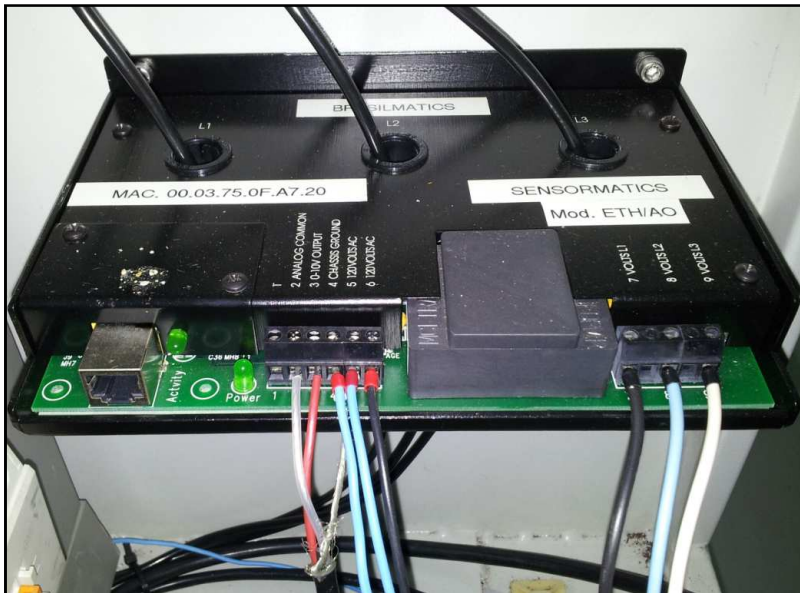


FIGURA 17 - Fixação do sensor UPC-E no painel da máquina CNC
Fonte: Os autores

O esquema de ligação do sensor foi feito como mostrado na figura 18. 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.

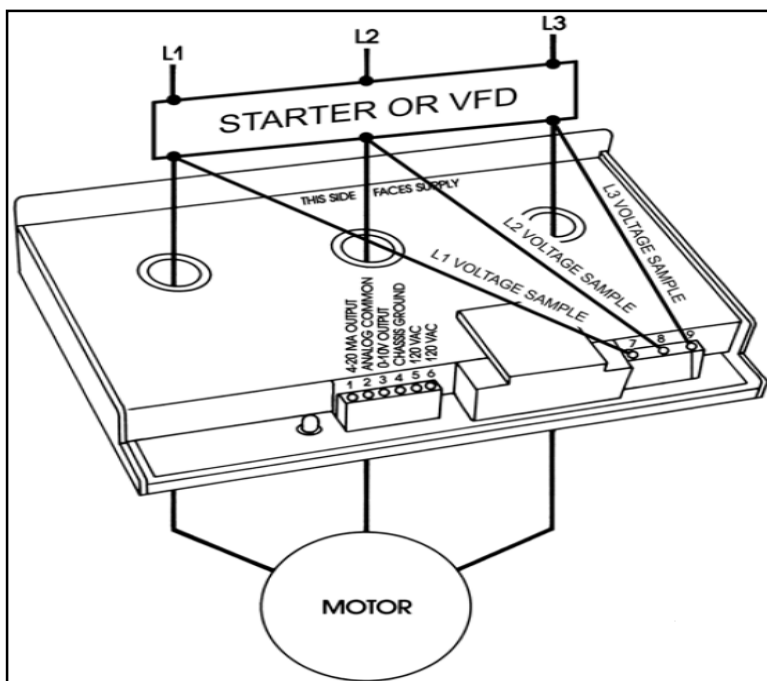


FIGURA 18 - Diagrama multifilar para ligação transdutor UPC-E
Fonte: LOAD CONTROLS, 2014

3.3.7 Configuração do transdutor de potência

Através de um endereço de IP fornecido pelo fabricante junto ao produto conseguimos entrar no modo de configuração do sensor e ajustar todos os parâmetros desejados. O tempo de resposta foi configurado em 200 ms e a potência máxima em 10HP conforme potência nominal do motor *Spindle* da máquina. A configuração dos parâmetros para utilização foi feita utilizando um computador conectado ao sensor por meio de um cabo de rede via porta *ethernet*. A figura 19 mostra a tela onde foram inseridos os dados referentes ao motor, configuração do tempo de resposta o modo que se deseja realizar o monitoramento.

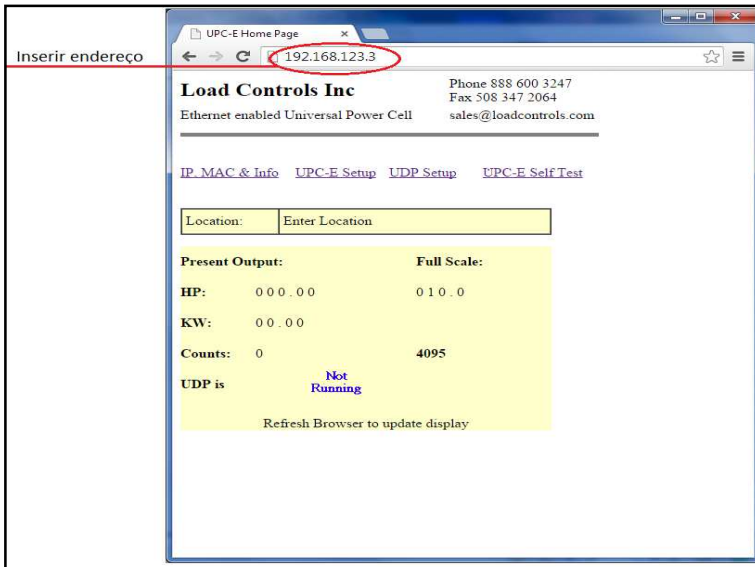


FIGURA 19 - Tela de acesso para configuração do transdutor UPC-E
Fonte: LOAD CONTROLS, 2014

3.4 Placa de aquisição de dados NI USB-6009

A placa NI USB-6009 do fabricante *National Instruments*, mostrada na figura 20, oferece funções básicas de aquisição de dados para aplicações como *Data Logging* simples, medições portáteis, e experimentos em laboratórios acadêmicos. A comunicação com o computador é feita via *interface* USB utilizando um cabo. O dispositivo conta com oito canais de entradas analógicas para sinais de $\pm 10V$, 14bits de resolução, uma taxa de amostragem de 48000 amostras/s e duas saídas analógicas de 0 a 5V. Este dispositivo é capaz de realizar múltiplas tarefas ao mesmo tempo como adquirir sinais, gerar níveis analógicos de saída em tensão, desempenhar leitura e escrita de entradas e saídas de forma simultânea. Com essas funções é possível realizar várias aplicações como leitura e armazenamento de dados e controle com malha fechada. Os canais analógicos são compostos de conversores analógicos Digitais (A/Ds) de 14bits em modo diferencial, ou 13bits em modo *single-ended* (NATIONAL INSTRUMENTS; 2015).



FIGURA 20 - Placa de aquisição NI USB-6009

Fonte: <http://brasil.ni.com/produtos/usb-6009>

Acessado dia 29/01/2015

A impedância de entrada é de 144k Ω e a variação da faixa de leitura das tensões de entrada depende da configuração adotada conforme a tabela 2.

CARACTERÍSTICAS	NI USB-6009
Resolução	14bits diferencial, 13bits-ended única
Taxa de amostragem máx.	48 kS/s
<i>Single-ended</i>	$\pm 10V$
Diferencial	$\pm 20V$; $\pm 10V$; $\pm 5V$; $\pm 4V$; $\pm 2,5V$; $\pm 2V$; $\pm 1,25V$; $\pm 1V$

TABELA 2- Características principais da placa NI USB-6009
Fonte: Manual de instruções NI USB-6009

3.4.1 Conexão da placa com transdutor

Conforme o manual da placa NI USB-6009, os terminais de contato podem ser conectados em modo desbalanceado (*single-ended*) ou em modo balanceado (diferencial). Quando o modo diferencial é adotado o número de canais é reduzido. A escolha de qual entrada utilizar deve ser feita via software no *LabVIEW* através do bloco *Daq Assistant*. No modo *single-ended*, utiliza-se a conexão com uma entrada e o terra (GND). No modo diferencial utilizam-se duas entradas por canal, e tem-se a adoção de um referencial que pode ser diferente do GND, conforme mostra no detalhamento (a) e (b) na figura 21 logo abaixo.

Para fazer a aquisição e armazenamento dos dados em nossa experiência foi utilizado o modo diferencial da placa NI USB-6009, um cabo blindado com malha de cobre e mais duas vias, as quais foram conectadas em duas entradas analógicas, configurado a placa para o modo de aquisição diferencial. A outra ponta do cabo foi conectada na saída analógica de sinal de tensão de 0 a 10Vcc do sensor de potência, o qual foi instalado dentro do painel elétrico da máquina CNC. Utilizou-se a malha de blindagem do cabo para potencializar o sistema, conectado uma ponta da malha no aterramento da máquina e a outra ponta ao GND da placa de aquisição, essa forma de ligação ajudou a diminuir o potencial de interferências eletromagnéticas.

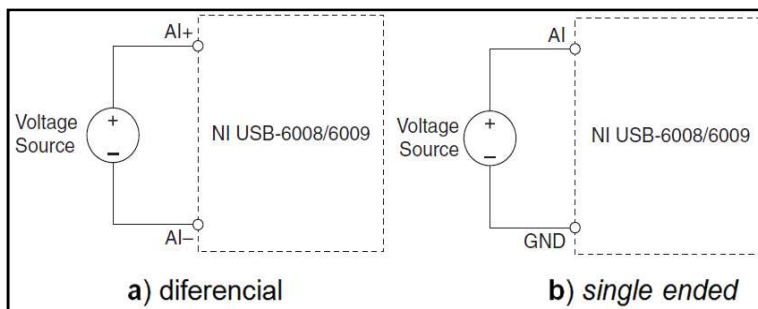


FIGURA 21 - Esquema ligação das entradas da placa NI USB-6009
Fonte: Manual de instruções NI USB-6009

A figura 22 identifica a pinagem e a descrições de cada conexão de entrada da placa USB-2009, foi utilizado para ligação os pinos 2 e 3 em modo diferencial para receber os dados do trasdutor.



FIGURA 22 - Pinagem e ligação da placa NI USB-6009
Fonte: Manual de instruções NI USB-6009

3.5 Forma de aquisição de dados

Um Sistema de Aquisição de Dados (DAQ) é baseado na amostragem de um sinal elétrico gerado a partir de um fenômeno físico que está variando em função do tempo, logo é feita a conversão desta informação em um formato digital para posterior visualização, análise, armazenamento e processamento. Desta forma é possível monitorar, supervisionar e controlar esta variável em todo o processo no qual se deseja obter os dados, o sinal pode ser obtido por meio de sensores e controladores conectados ao sistema (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014)

Aquisição de dados compreende-se de três partes:

- Aquisição de dados;
- Análise de dados e;
- Apresentação dos dados.

Utilizando o *Lab View* é possível obter blocos de funções expressas prontas que não requer programação e sim configuração que facilitam na montagem do sistema de aquisição de dados (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

Na aplicação da instrumentação virtual da NI com *Lab View*, linguagem de programação utilizada para tal recebe o nome de linguagem G, por se tratar de uma linguagem gráfica que utiliza blocos de funções através das bibliotecas de funções de entradas, saídas, análises, apresentação de dados, processamento de sinais e aquisições. Nesse sistema cada função encontra-se dentro de um grupo pré-determinado de blocos empregados no desenvolvimento do programa que fará a aquisição de dados. Neste estudo optou-se por apenas coletar os dados para avaliação e apresentação, não sendo objetivo deste trabalho o controle das variáveis do sistema (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

3.6 Configurando o sistema para aquisição dos dados

O *Lab View* possui duas janelas, uma é o painel frontal onde possui todos os controles e indicadores necessários para montar uma interface com o usuário e a outra é o diagrama de blocos, os quais têm todas as funções usuais numa linguagem de programação, na qual foi montada a lógica do programa. Primeiramente no painel frontal foram criados dois gráficos, nos quais um foi construído para exibir os dados em tempo real e o outro para acumular os dados ao longo do tempo.

3.6.1 Criando VI

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 10 Vcc 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.

A figura 23 apresenta a tela interativa na qual são estabelecidos os parâmetros do assistente *DAQ* para poder receber e tratar o sinal.

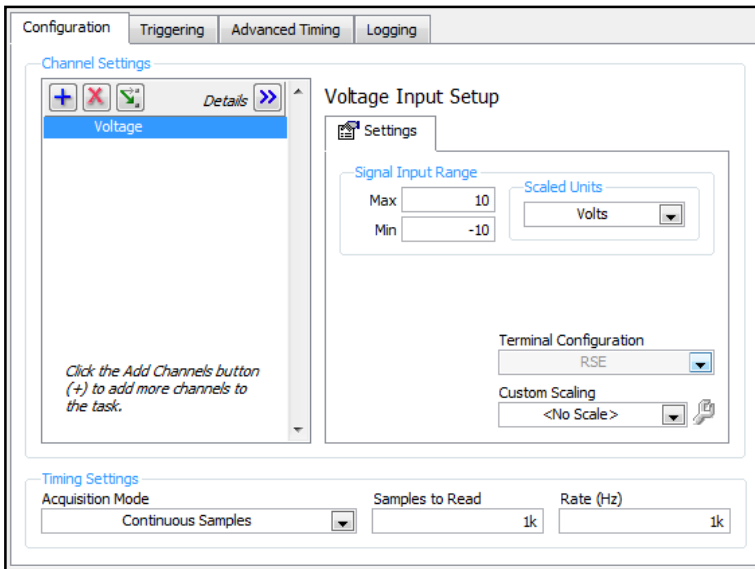


FIGURA 23 - Configuração do bloco *DAQ Assistant* no *LabVIEW*
Fonte: Os autores

Depois de configurado o *DAQ Assistant* para aquisição dos dados foi preciso escrever esses dados em um arquivo, gravando-os em disco para posterior análise, para isso foi utilizado no programa um bloco chamado *Write To Measurement File*. Esse bloco é um assistente para gravação de arquivo de medição, o mesmo auxiliou na configuração da função de gravação dos dados em um arquivo conforme ilustrado na figura 24.

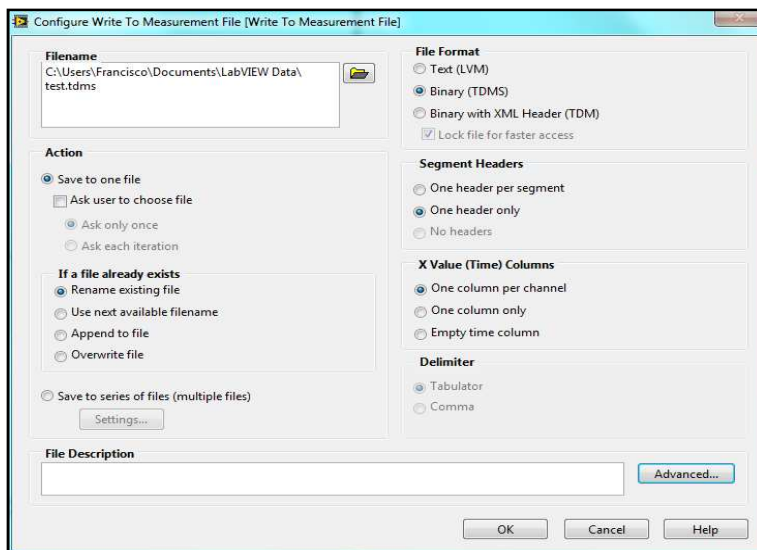


FIGURA 24 - Configuração do bloco *Write To Measurement File* no *LabVIEW*

Fonte: Os autores

Após a aquisição dos sinais foi criada uma função para ler os dados gravados. A intenção foi ver todas essas informações armazenadas durante o período da aquisição. Para isso foi utilizado o assistente para leitura de arquivo de medição que é um bloco chamado *Read From Measurement File*, o assistente abriu uma tela na qual foi possível configurar a leitura desses dados após o término da aquisição, conforme ilustrado na figura 25.

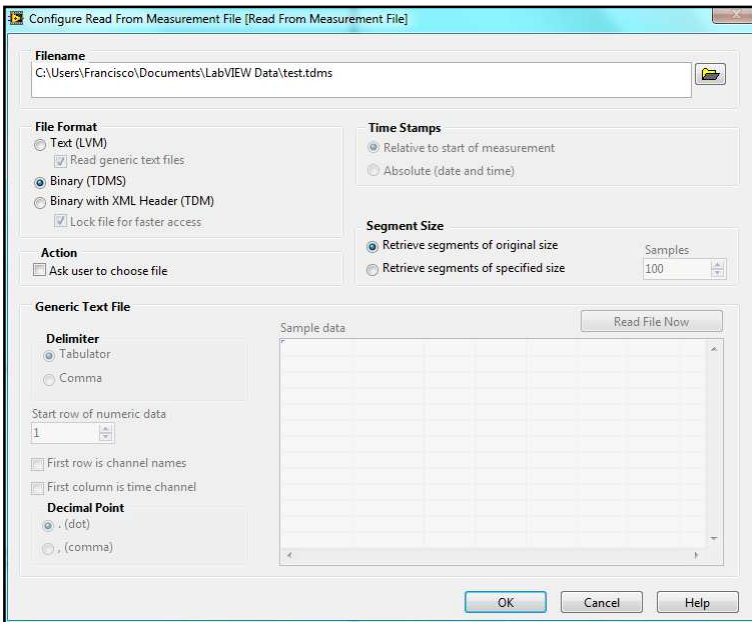


FIGURA 25 - Configuração do bloco *Read From Measurement File* no *LabVIEW*

Fonte: Os autores

Conforme comentado anteriormente, 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 26. 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.

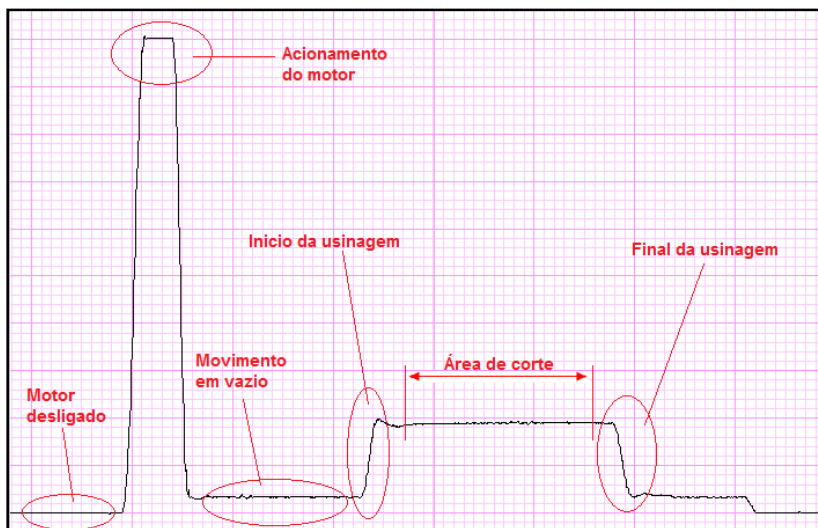


FIGURA 26 - Dados da potência adquiridos em tempo real
Fonte: Os autores

3.6.2 Ruídos no sistema

Ao realizar os primeiros testes de aquisição dos dados, percebeu-se que o sinal que estava sendo representado no gráfico aparecia com muito ruídos. Segundo Cisneros *et al.* (2003) possivelmente esses ruídos eram provenientes da sensibilidade do sistema ou de origem eletromagnética que aparecem em frequências acima de 1MHz.

A solução encontrada foi a utilização de um sistema de filtragem dos sinais. Com o intuito de eliminar os ruídos foi instalado um filtro passa baixa em nosso programa. Assim um bloco chamado *Filter*, que nada mais é do que um filtro pode ser configurado para deixar passar ou bloquear as frequências indesejadas do sistema, ou que não são de interesse nesse estudo.

Nos critérios para ajuste dos filtros também foi levado em consideração o processo de usinagem escolhido para avaliar o desgaste da ferramenta e qual tipo de ferramenta de corte foi

utilizada nesse processo, fazendo isso foi possível uma melhor visualização no gráfico que mostra o comportamento da potência elétrica consumida no processo de usinagem.

A figura 27, apresenta a tela na qual foram feitas as configurações dos parâmetros do filtro de sinal.

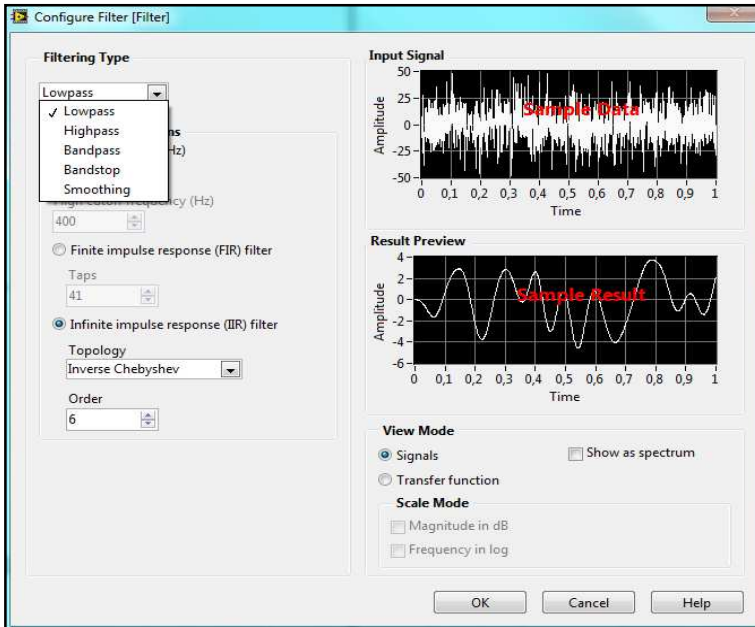


FIGURA 27 - Configuração do bloco *Filter* no *LabVIEW*
Fonte: Os autores

3.6.3 Programa para aquisição em *LabVIEW*

A figura 28 ilustra como ficou a programação gráfica desenvolvida através de diagramas de blocos no *LabVIEW*. Esse programa foi utilizado para fazer a aquisição de dados referentes aos sinais que determinam a potência elétrica consumida pelo motor *Spindle*.

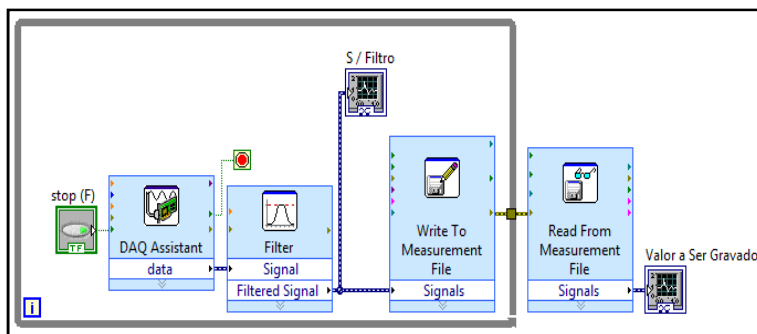


FIGURA 28 - Programa de blocos no *LabVIEW*
 Fonte: Os autores

3.7 Experimentos preliminares

O projeto experimental foi definido com a variação de quatro parâmetros de corte (V_C , A_P , V_F e A_e). Ao todo foram feitos 27 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.

V_c (m/min)	A_p (mm)	F_z (mm/dente)	A_e (mm)	\varnothing mm
100	1	0,1	8	22
200	1,5	0,2	12	22
300	2	0,3	4	22

TABELA 3 - Parâmetros de corte dos experimentos preliminares
 Fonte: Os autores

Na tabela 4 contém informações referentes aos parâmetros de corte utilizados em todos os testes realizados na fase preliminar, a mesma foi criada a partir da tabela 3, na qual para converter a velocidade de corte de m/min para rpm, utilizou-se a equação que determina rotação ($S = (V_c \times 1000) / (\pi \times D)$). Para converter o avanço de mm/dente para mm/min, utilizou-se ($F = F_z \times Z \times S$). Os testes foram feitos em ordem aleatória para que fatores tais como, desgaste da ferramenta, aquecimento da máquina e temperatura da peça tivessem a menor influência possível nos resultados.

EXP	S (rpm)	F (mm/min)	Ap (mm)	Ae (mm)
1	1447	434	1	8
2	2894	868	1	8
3	4341	1302	1	8
4	1447	868	1,5	8
5	2894	1736	1,5	8
6	4341	2604	1,5	8
7	1447	1302	2	8
8	2894	2604	2	8
9	4341	3907	2	8
10	1447	434	1	12
11	2894	868	1	12
12	4341	1302	1	12
13	1447	868	1,5	12
14	2894	1736	1,5	12
15	4341	2604	1,5	12
16	1447	1302	2	12
17	2894	2604	2	12
18	4341	3907	2	12
19	1447	434	1	4
20	2894	868	1	4
21	4341	1302	1	4
22	1447	868	1,5	4
23	2894	1736	1,5	4
24	4341	2604	1,5	4
25	1447	1302	2	4
26	2894	2604	2	4
27	4341	3907	2	4

TABELA 4 - Dados para os experimentos preliminares
Fonte: Os autores

Dessa forma foi possível coletar os dados referentes à potência elétrica consumida em cada experimento, logo esses dados foram registrados e gravados em arquivos para posteriormente serem analisados.

3.7.1 Ferramenta para os experimentos preliminares

Para os experimentos preliminares foi usado um suporte tipo fresa de topo $\varnothing 22$ mm, três arestas e insertos intercambiáveis (APLX100308 - modelo da pastilha) com raio 0,8 mm. A fixação do suporte ao cone (BT40 - modelo do cone de fixação da ferramenta) da máquina foi feita através de uma pinça com aperto manual. O objetivo do uso deste suporte $\varnothing 22$ mm foi preservar o suporte da ferramenta de $\varnothing 16$ mm em bom estado para os experimentos da curva de vida da ferramenta e experimentos finais. Nessa fase foram usadas condições mais severas de usinagem que poderiam danificar o suporte. Nos experimentos de curva de vida e experimentos finais as condições de corte são mais suaves.

3.8 Curva de vida da ferramenta

A finalidade desse teste foi avaliar o comportamento do desgaste de flanco (V_B) para a operação de fresamento tangencial, identificar o mecanismo de desgaste e o valor de desgaste máximo para o inserto usado na usinagem. Para isso, foi realizado um teste de longa duração, foram 309 minutos usinando com uma ferramenta nova até o fim da sua vida. Durante o experimento foram realizadas paradas para medições do desgaste a fim de gerar a curva de desgaste para a operação de fresamento tangencial.

Como o tempo total da vida da ferramenta era desconhecido, no início do teste a ferramenta foi retirada para medição em pequenos intervalos de tempo. Inicialmente foi realizada uma única passada com duração de 0,1 minuto e feito a medição, depois foi realizada duas passadas com duração de

0,2 minutos e feito a medição, logo foi realizado quatro passadas com duração de 0,4 minutos e feito a medição. O objetivo dessas diversas paradas foi entender melhor como seria o comportamento do desgaste logo no início da usinagem.

Utilizando essa estratégia foi observado que o desgaste era pequeno nos primeiros minutos, então os intervalos foram sendo aumentados gradativamente. Foram feitas mais cinco medições com intervalos de 1 minuto, assim conseguimos estimar como seria o comportamento do desgaste da ferramenta durante o decorrer do teste. Os intervalos seguintes foram realizados conforme o desgaste progredia.

Para fazer a captura das imagens no estéreo microscópio, optou-se por não desmontar o suporte do cone da máquina e também não desmontar os insertos do suporte a cada medição realizada. Esta estratégia foi adotada para manter sempre o mesmo alinhamento dos insertos e diminuir o tempo com desmontagens e montagens. Dessa forma a ferramenta era desacoplada do encaixe cônico do eixo da máquina e levada até o estéreo microscópio para efetuar as medições.

Para realizar as medições do desgaste de flanco adotou-se como referência a face do inserto junto ao suporte, medindo-se até o desgaste conforme ilustrado na figura 29. O valor de V_B é igual a medida total do inserto novo menos a distância da face de referência até o desgaste.

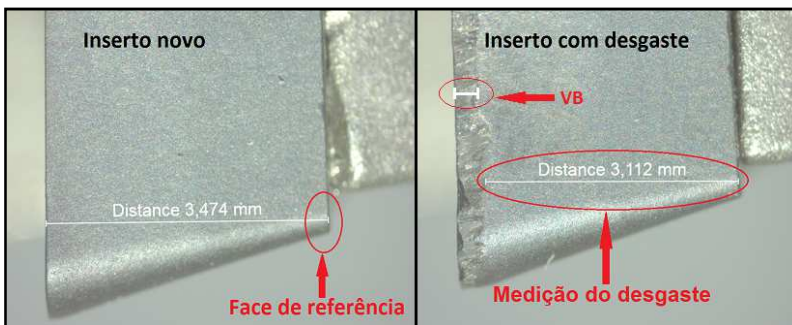


FIGURA 29 - Modo de medição do desgaste da ferramenta

Fonte: Os autores

Os desgastes foram observados e medidos através do estéreo microscópio do fabricante ZEISS modelo *Stemi 2000-C*, com capacidade de ampliação de 10x a 50x. O mesmo é equipado com uma câmera digital integrada modelo *AxioCam ERc5s*, que faz a captura das imagens.

A câmera digital do microscópio foi ligada ao computador através de um cabo USB, com o *Software ZEN 2012* específico para esse aparelho, foi possível analisar as imagens. Antes de iniciarmos as medições de desgaste foi necessário calibrar o sistema para ajustar os parâmetros de escala real em relação à imagem obtida na tela do computador. Este procedimento foi feito através do *Software ZEN 2012*, obtendo a imagem de um bloco padrão de 2,5 mm, onde sua finalidade é na calibragem de instrumentos de medição, principalmente em laboratórios.

A figura 30 ilustra os instrumentos e demais equipamentos utilizados para realizar a captura das imagens e a obtenção das medidas referente ao desgaste das pastilhas.



FIGURA 30 - Microscópio para medição do desgaste

Fonte: Os autores

3.8.1 Ferramenta de corte

Para os experimentos da curva de vida da ferramenta foi usado um suporte de fresa de topo $\varnothing 16$ mm duas arestas, e insertos intercambiáveis de metal duro APLX 100308 com raio 0,8 mm. Esta mesma especificação de ferramenta também foi usada nos experimentos finais.

O sistema de fixação da ferramenta foi realizado através de uma pinça elástica e suporte cônico BT40 montado ao eixo árvore da máquina.

3.8.2 Condições de corte

As condições de corte usadas para construir a curva de vida da ferramenta foram definidas tomando como base o experimento 5. O A_p foi alterado para 4 mm a fim de demonstrar melhor o desgaste na parte lateral do inserto. A largura A_e foi reduzida com o propósito de gerar menor volume de cavaco e economizar material, já que este é um experimento demorado e o objetivo é avaliar o comportamento do desgaste.

Vc (m/min)	Fz (mm/dente)	Ap (mm)	Ae (mm)	S (rpm)	F (mm/min)
200	0,2	4	0,1	3979	1592

TABELA 5 - Parâmetros de corte para construção da curva de vida
Fonte: Os autores

3.9 Corpo de prova para teste final e curva de vida

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 $\varnothing 16$ 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.



FIGURA 31 - Corpo de prova fixado na morsa
Fonte: Os autores

3.9.1 Características do material do corpo de prova

Os corpos de prova são de aço carbono SAE1045, este material é amplamente usado para construção mecânica de peças como eixos, cilindros, parafusos e os mais variados tipos de peças. Tem a característica de boa usinabilidade e resistência mecânica. Pode receber tratamento térmico para aumentar a dureza.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA AÇO SAE1045			
SAE1045	Carbono	Silício	Manganês
	0,43% a 0,5%	0,4% máx.	0,6% a 0,9%

TABELA 6 - Composição química aço SAE1045
Fonte: <http://www.ggdmetals.com.br/aco-construcao-mecanica/sae-1045/>.
Acessado dia 29/01/2014

3.9.2 Ensaios de dureza no corpo de prova

Dureza é a propriedade mecânica de um material sólido em apresentar resistência ao risco ou a formação de uma marca permanente. A dureza de um material depende diretamente das forças das ligações químicas em sua construção.

Um tipo de ensaio de dureza em materiais é o ensaio por penetração, que é avaliar a capacidade de um material em penetrar no outro. Para realizar esse método é utilizado material e marcadores padronizados. As características geométricas da impressão ou marca, são medidas e correlacionadas com um valor numérico que representa a dureza do material.

Dentre os vários tipos de ensaios de dureza conhecidos, escolhemos para realizar o teste em nosso corpo de prova o método *Vickers*, esse é um método por penetração.



FIGURA 32 - Fixação do corpo de prova no durometro
Fonte: Os autores

O método *Vickers* utiliza um penetrador de diamante “indeformável” em formato piramidal de base quadrada e ângulos entre faces de 136° . Os valores obtidos são independentes das cargas aplicadas, isso quer dizer que ensaios realizados com cargas diferentes apresentam o mesmo valor de dureza.

Submeteu-se o material utilizado como corpo de prova a um ensaio de dureza para compararmos as reais características do material com as fornecidas em tabelas pelo fabricante.

Foi utilizada para fazer as medições, uma máquina para ensaios de dureza modelo *Microhardness Tester FM-800*, figura 33, durometro para ensaios de dureza em escala *Vickres*.



FIGURA 33 - Durometro *Microhardness Tester FM-800*
Fonte: Os autores

Com o auxílio de um microscópio acoplado ao equipamento, é tangenciado as linhas da escala do aparelho com as extremidades das diagonais D1 e D2. Essas diagonais são formadas pelos vértices opostas da base da pirâmide, marcação feita no corpo de prova após a aplicação da carga. Feito isso, o valor da dureza é calculado e demonstrado automaticamente em uma tela do aparelho, conforme ilustrado na figura 34.

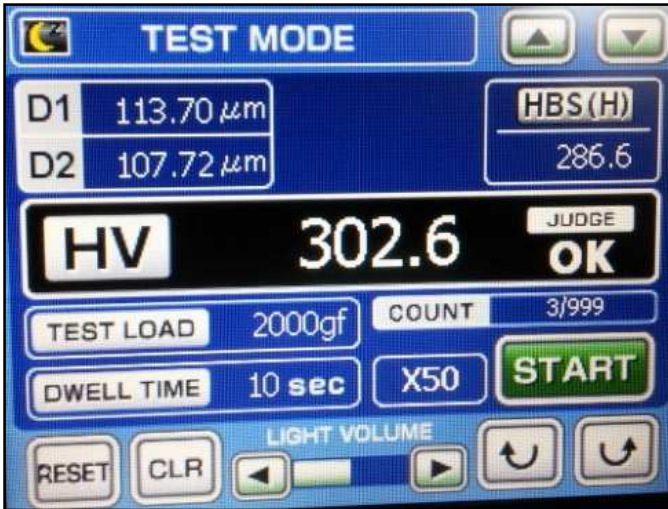


FIGURA 34 - Valor médio da dureza do corpo de prova
Fonte: Os autores

Na tabela 7 é ilustrado o valor medido na máquina de ensaio, que é 302HV, também tem uma conversão para outras escalas e métodos de medição.

Dureza Rockwell "C"	Dureza Brinell	Dureza Vickers	Dureza Rockwell "A"	Dureza Rockwell "B"	Dureza Rockwell "D"	Dureza Shore
HRC	HB	HV	HRA	HRB	HRD	HS
30	286	302	65,3	105,5	47,7	42

TABELA 7 - Tabela de conversão das escalas e métodos de dureza
Fonte: Os autores

3.10 Experimentos finais

Essa etapa do trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da potência em quatro diferentes níveis de desgaste para o fresamento tangencial. Foi utilizado uma fresa de topo de $\varnothing 16$ 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, e são mostrados na tabela 8.

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

TABELA 8 - Dados de corte dos experimentos finais

Fonte: Os autores

O corpo de prova de aço SAE1045 utilizado nos experimentos finais tem as mesmas dimensões e especificações do corpo de prova utilizado nos experimentos da curva de vida da ferramenta.

Nesta fase 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

4.1 Resultados dos experimentos preliminares

A tabela 9 mostra os resultados dos valores de potência elétrica medidos em todos os 27 testes realizados durante os experimentos preliminares. Nessa tabela é mostrada a média dos valores instantâneos medidos de potência elétrica. Também é mostrado um valor médio entre as três repetições para facilitar a avaliação de cada teste. Para auxiliar a análise, foi incluído na tabela informações referente às condições de corte para cada diferente tipo de experimento, nos quais estão variando os parâmetros (V_c , F_z , A_p e A_e).

Ao realizar esses testes, foi possível confirmar que o aumento de qualquer um dos parâmetros de corte sempre leva a um aumento na potência elétrica consumida pelo motor *Spindle* do CNC. Como exemplo é possível citar o teste 19, no qual são encontradas as menores condições de corte, e conseqüentemente o valor de potência elétrica medida também é o menor entre os testes. Outro exemplo para comparação é o teste numero 18, no qual os parâmetros de corte são os mais altos da tabela, e conseqüentemente a potência elétrica medida também é a maior entre os testes. Avaliando a tabela, foi possível observar em todos os testes realizados, que as variações da potência elétrica foram pequenas entre as três repetições em cada experimento, com isso foi possível comprovar uma boa estabilidade do sistema de medição.

Nº do Experimento	Potência de corte Calculada (W)	1º Repetição Potência Elétrica (W)	2º Repetição Potência Elétrica (W)	3º Repetição Potência Elétrica (W)	Valor Médio Potência Elétrica (W)	Velocidade de Corte (V_c – m/min)	Velocidade do Avanço (F_z – mm/dente)	Profundidade de Corte (A_p – mm)	Largura de Corte (A_e – mm)
1	210	389	374	371	378	100	0,1	1	8
2	420	769	653	665	696	200	0,1	1	8
3	630	986	1004	1010	1000	300	0,1	1	8
4	550	758	735	775	756	100	0,2	1,5	8
5	1100	1327	1318	1312	1319	200	0,2	1,5	8
6	1650	1881	1913	1856	1884	300	0,2	1,5	8
7	1050	1202	1185	1178	1188	100	0,3	2	8
8	2100	2103	2083	2074	2087	200	0,3	2	8
9	3150	3175	3129	3133	3146	300	0,3	2	8
10	310	535	520	513	522	100	0,1	1	12
11	630	919	870	894	895	200	0,1	1	12
12	940	1341	1263	1276	1293	300	0,1	1	12
13	830	972	989	1004	988	100	0,2	1,5	12
14	1650	1704	1782	1777	1754	200	0,2	1,5	12
15	2480	2534	2564	2605	2568	300	0,2	1,5	12
16	1570	1515	1581	1598	1565	100	0,3	2	12
17	3150	2676	2749	2702	2709	200	0,3	2	12
18	4730	4368	4458	4619	4481	300	0,3	2	12
19	100	264	251	248	254	100	0,1	1	4
20	210	502	420	428	450	200	0,1	1	4
21	310	670	665	679	671	300	0,1	1	4
22	280	467	444	482	464	100	0,2	1,5	4
23	550	842	788	807	812	200	0,2	1,5	4
24	830	1218	1176	1185	1193	300	0,2	1,5	4
25	520	711	644	667	674	100	0,3	2	4
26	1050	1292	1191	1209	1230	200	0,3	2	4
27	1580	1885	1730	1803	1806	300	0,3	2	4

TABELA 9 - Comparação das variações da potência na usinagem
Fonte: Os Autores

A análise dos resultados do experimento preliminar foi feito com auxílio dos gráficos contidos no anexo c, 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 35.

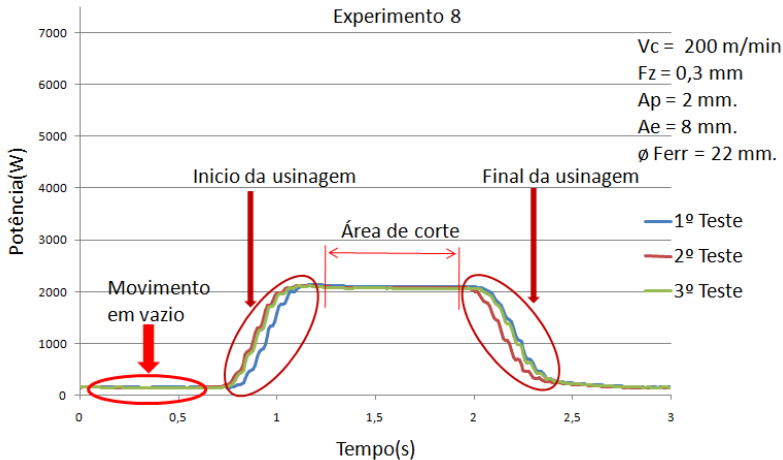


FIGURA 35 - Gráfico do teste preliminar 08

Fonte: Os autores

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.

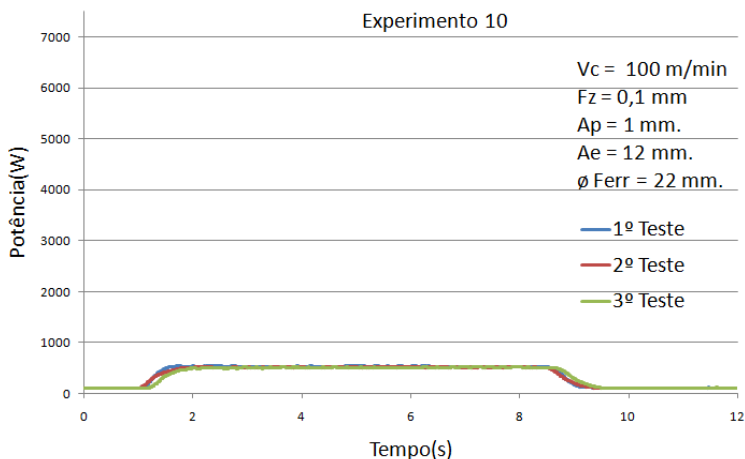


FIGURA 36 - Gráfico do teste preliminar 10
Fonte: Os autores

Fazendo uma análise no experimento 10, conforme mostra a figura 36, optamos por não utilizar este no teste final. Notamos que o mesmo apresentou pouca variação na amplitude dos sinais medidos, porém observou-se que os valores de potência durante a usinagem são muito baixos, devido às condições de corte mais suaves. Um baixo nível de potência consumido durante a usinagem poderia tornar difícil uma análise, quando comparados os valores de potência para diferentes níveis de desgaste da ferramenta de corte. A diferença de potência tornaria quase que imperceptível nessas condições, por isso, este foi o critério de eliminação para os experimentos preliminares semelhantes a esse.

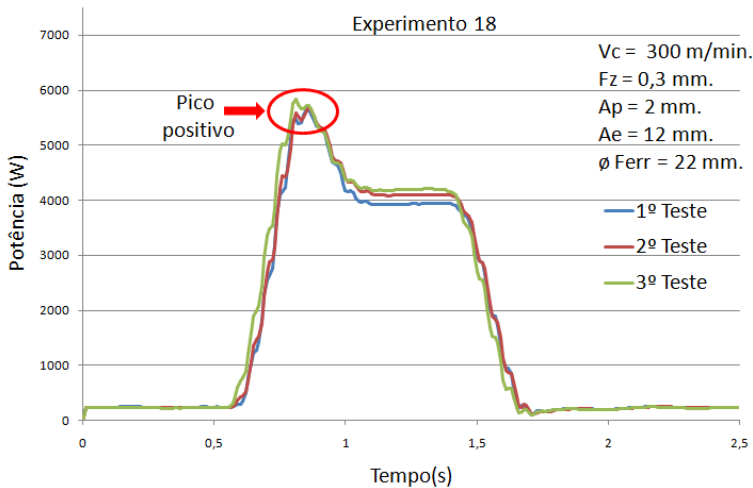


FIGURA 37- Gráfico do teste preliminar 18
Fonte: Os autores

Analisando a figura 37 percebemos um comportamento da potência bem instável. No experimento preliminar 18, no qual as condições de corte foram mais severas foi notada a elevação do consumo de potência durante a usinagem e uma instabilidade em sua representação gráfica na entrada da ferramenta.

No início da usinagem ocorreu um pico positivo no sinal de potência e logo após ocorre uma estabilização do sinal, segundo Shao; Wang e Zhao (2004), esse fenômeno ocorre porque há um aumento repentino da carga no sistema de acionamento do eixo quando o dente entra na zona de corte. Possivelmente também está relacionado a taxa de atualização do nosso sistema de aquisição. Observou-se uma diferença considerável entre as repetições logo após o pulso positivo no sinal de potência quando o mesmo encontra-se estabilizado. Este também foi um critério de eliminação para os experimentos preliminares semelhantes a esse.

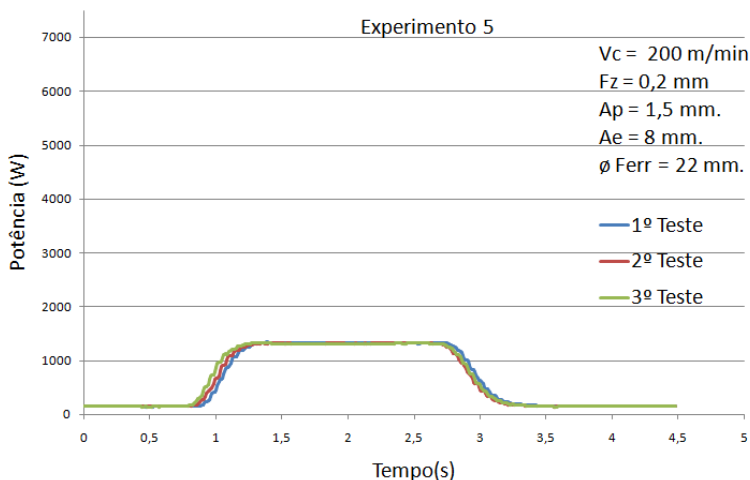


FIGURA 38 - Gráfico do teste preliminar 05
 Fonte: Os autores

Finalmente após uma avaliação e comparação dos 27 experimentos preliminares, chegamos à conclusão de quais parâmetros de usinagem usaríamos para realizar experimento final, no caso foi a teste preliminar 5, mostrado na figura 38.

Esse foi o teste que obteve a menor variação na amplitude dos valores de potência medidos, com um consumo de potência razoável e uma boa repetibilidade a cada passada da ferramenta usinando. Assim foi definido como sendo essas as condições de corte que usaríamos para realizar os testes finais.

4.2 Resultados do experimento da curva de vida

Observou-se durante o decorrer do experimento que o acabamento superficial melhorou logo após os primeiros minutos de usinagem, ficando estável por um longo período e piorou próximo ao final da vida da ferramenta.

Foi determinado o fim da vida útil da ferramenta quando o desgaste de flanco chegou a 0,33 mm e após 309 minutos de usinagem. Nessa fase observou-se grande formação de rebarbas

na peça, adesão de metal a aresta de corte, faiscamento excessivo, e aumento considerável na potência elétrica necessária para realizar o corte.

O fenômeno da adesão deu origem à aresta postiça de corte, e também causava um acréscimo na potência necessária para o corte. Esse fenômeno foi observado após os intervalos de medição quando a aresta postiça era removida e após o reinício do experimento a potência diminuía. A figura 39 mostra como ocorreu a adesão de material na aresta de corte.



FIGURA 39 - Adesão de metal na ferramenta de corte
Fonte: Os autores

O gráfico da figura 40 apresenta o desgaste de flanco em função do tempo de usinagem, e mostra o comportamento do desgaste durante a vida útil da ferramenta para a operação. Esse gráfico mostra a curva de vida da ferramenta.

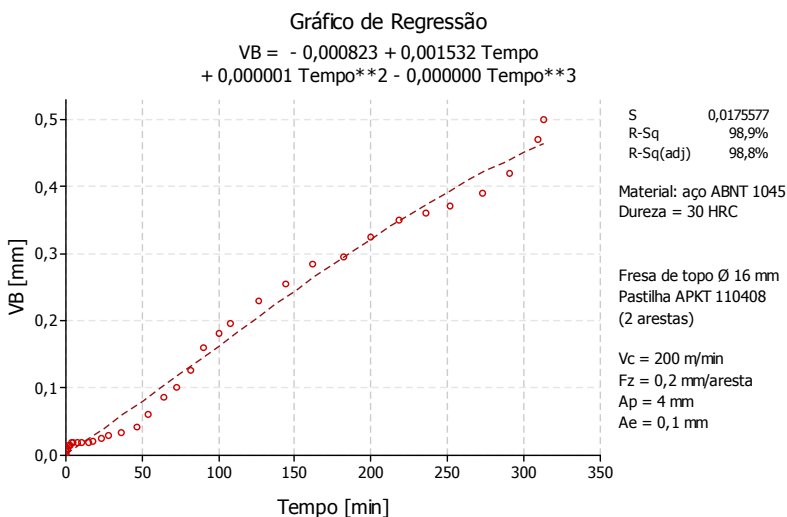


FIGURA 40 - Gráfico da curva de vida da ferramenta
Fonte: Os autores

4.3 Resultados do experimento final

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 41, 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.

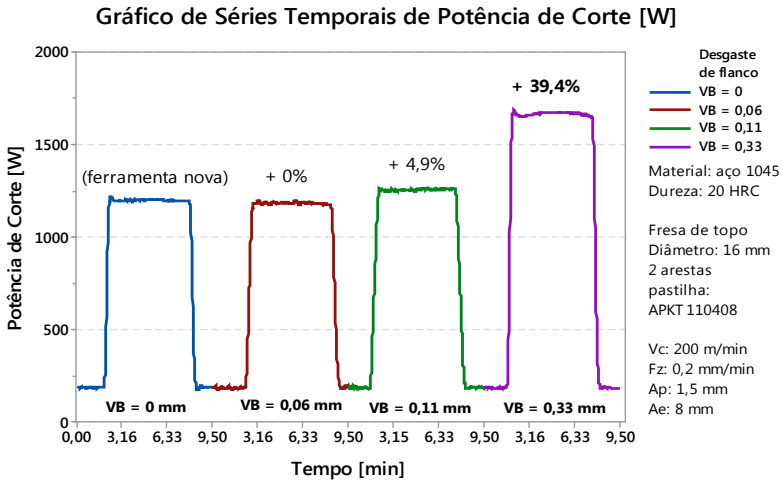


FIGURA 41 - Gráfico comparativo da evolução do desgaste
Fonte: Os autores

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. Devemos observar que estes valores percentuais de aumento na potência são válidos para as condições de corte da tabela 8.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final deste trabalho de conclusão de curso considerou-se que os objetivos foram alcançados, tanto o desenvolvimento do sistema de aquisição da potência elétrica quanto os testes práticos que foram realizados.

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 serão 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.

5.1 Oportunidades de melhorias

Fazer 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.

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.

REFERÊNCIAS

BLOGSPOT.<http://tudosobreusinagem.blogspot.com.br/2012/03/resamento.html>. Acessado em 02/09/2014.

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.

Disponível em <http://www.omundodausinagem.com.br/?p=4791>. Acessado em 24/09/2014.

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>. Acesso 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 INTRUÇÕES 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.

PORTAL METÁLICA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Fresamento e suas finalidades.** <http://www.metalica.com.br/fresamento-e-suas-finalidades>. Acessado em 03/09/2014.

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_e_dges/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.

ANEXO A

Recomendações de segurança da máquina CNC *Skybull 600*

Para poder ter a máquina no seu total desempenho de uma forma segura e para evitar acidentes a pessoas e danos ao equipamento, é necessário que o usuário que vai utilizar a máquina obedeça as seguintes exigências de segurança:

- O operador tem que ser uma pessoa qualificada e que tenha sido devidamente treinada em usinagem da máquina.
- A manutenção elétrica da máquina deverá ser feita somente por técnico que tenham tido treinamento especializado no sistema elétrico da máquina.
- É necessário que o operador leia cuidadosamente e completamente o Manual de Instruções e que entenda o seu conteúdo totalmente antes de operar a máquina.
- É proibido operar qualquer chave ou qualquer botão da máquina com mãos úmidas ou com luvas.
- Não modificar os dados de ajuste da máquina por vontade própria. Se for necessário modificar subprogramas ou macro-programas, é necessário confirmar que não haja qualquer erro na modificação feita antes de iniciar a máquina. Um ajuste errado pode resultar em trabalho anormal da máquina, e mesmo em danos à máquina.
- Durante o tempo de usinagem, quando houver queda de energia, desligue o disjuntor do fornecimento geral de energia de uma vez (deixe o disjuntor na posição DESLIGADO).
- As baterias secas alcalinas de segurança do sistema CNC, e o sistema do servo deverão ser periodicamente trocados com a energia do CNC ligada ou, se não for assim, os dados dos programas de usinagem são perdidos (MANUAL DE INSTRUÇÕES, *SKYBULL 600*).

Luz de alarme da máquina

A luz de alarme da máquina tem 3 cores (vermelha, amarela e verde) e estão localizadas no gabinete elétrico ou no na parte superior da máquina. Enquanto a máquina estiver usinando no modo Automático, a luz verde estará piscando; enquanto a máquina estiver parada a luz amarela estará piscando e quando ocorre algum alarme, a luz vermelha estará piscando (MANUAL DE INSTRUÇÕES, SKYBULL 600).

Sistema de transmissão

O sistema de transmissão do eixo principal é feito a partir do eixo do motor através de conexão por correias de transmissão especiais de alta velocidade e polias para o eixo principal. O eixo é acionado por motor *Spindle* de troca de velocidade tipo contínuo (sem passo) de Corrente Alternada (CA) e sua velocidade máxima é de 8000 r/min (MANUAL DE INSTRUÇÕES, SKYBULL 600).

Movimentação dos eixos

Os movimentos dos eixos X, Y e Z são feitos sobre guias de rolamento para reduzir bastante a força de atrito das guias o que elimina o fenômeno de trepidação que pode ocorrer, para garantir a característica de um movimento suave para as partes móveis e assegurar a precisão do movimento da máquina. Para transmissão de movimento dos eixos X, Y e Z são utilizados fusos de esferas pré-carregados de porca dupla e estes fusos são acoplados aos servos motores de cada eixo. A máquina conta com sistema de lubrificação centralizada e automática com quantidade e tempo ajustáveis. As partes lubrificadas são principalmente os rolamentos, as guias deslizantes e os fusos de esferas (MANUAL DE INSTRUÇÕES, SKYBULL 600).

Troca de ferramentas

A troca de ferramenta da máquina é comandada por um sistema pneumático e pode ser feita de forma manual ou automática. Para o armazenamento das ferramentas existe um magazine que na configuração standard conta com 16 lugares. O movimento de giro do magazine é feito por motor elétrico (MANUAL DE INSTRUÇÕES, SKYBULL 600).

Refrigeração do material usinado

A máquina é equipada com sistema de refrigeração e remoção de cavacos. Existem 3 jatos na face do cabeçote; um é usado para refrigerar a ferramenta com ar, e os outros dois são usados para refrigerar a ferramenta com líquido refrigerante. As funções da refrigeração desta máquina são: refrigerar as ferramentas e expulsar os cavacos. O dispositivo transportador de cavacos desta máquina é manual e é fabricado juntamente com o tanque principal de água como um conjunto, a tabela 10 mostra as definições referente aos eixos da máquina (MANUAL DE INSTRUÇÕES, SKYBULL 600).

















Nº	Símbolo	Nome	Nº	Símbolo	Nome
1		Modo de Edição	9		Segmento simples
2		Modo automático de armazenamento de programa	10		Parada opcional do programa
3		Modo MDI	11		Sobreposição rápida F0
4		Modo de pulso do volante	12		Sobreposição rápida 35%
5		Modo Manual	13		Sobreposição rápida 50%
6		Travamento da Máquina	14		Sobreposição rápida 100%
7		Ciclo de Teste	15		Movimento positivo do eixo X
8		Pular programa	16		Movimento negativo do eixo X

TABELA 10 - Simbologia para programação do CNC
Fonte: Manual de instruções *Skybull 600*

A definição dos eixos de coordenadas se da como mostrado na tabela seguir, pressupondo que o operador esteja na frente da máquina.

Eixos de Coordenadas	Definição
Eixo X	Movimento para a direita e para a esquerda da mesa Direção positiva (+): a mesa se move para a direita. Direção negativa (-): a mesa se move para a esquerda.
Eixo Y	Movimento para frente e para trás do carro Direção positiva (+): o carro se move para frente. Direção negativa (-): o carro se move para a trás.
Eixo Z	Movimento para cima e para baixo da coluna Direção positiva (+): a coluna se move para cima. Direção negativa (-): a coluna se move para baixo.

TABELA 11 - Definição dos eixos e coordenadas do CNC
Fonte: Manual de instruções *Skybull 600*

Funções do painel de operação de teclas

Nº	Símbolo	Nome	Nº	Símbolo	Nome
17		Movimento positivo do eixo Y	35		Eixo para frente
18		Movimento negativo do eixo Y	36		Parada do eixo
19		Movimento positivo do eixo Z	37		Eixo para trás
20		Movimento negativo do eixo Z	38		Espera
21		Movimento positivo do 4º eixo (opcional)	39		
22		Movimento negativo do 4º eixo (opcional)	40		Mostra número da ferramenta
23		Ressetagem do alarme	41		Manipulador da rotação (opcional)
24		Velocidade rápida manual	42		Ferramenta perpendicular (opcional)
25		Re-início do programa	43		Ferramental horizontal (opcional)
26		Refrigeração LIGADA / DESLIGADA	44		Retorno a ZERO do magazine de ferramentas (opcional)
27		Lubrificação LIGADA / DESLIGADA	45		Magazine de ferramentas para frente
28		Intermitente II	46		Magazine de ferramentas para trás
29		Liberção da ferramenta do eixo	47		
30		Ar comprimido para o eixo	48		
31			49		Proteção do programa
32		Retardo do eixo	50		Sobreposição de avanço
33		Aceleração do eixo	51		Início de ciclo
34		Sobreposição do eixo 100%	52		Intermitente I

TABELA 12 - Funções do painel de operação de teclas do CNC
Fonte: Manual de instruções *Skybull 600*

Especificações mecânicas principais da máquina

Servo Motores	Eixo Y	Modelo		β 22/2000is	FANUC 0i-Mate MC		
		Potência	kW	2,5			
		Velocidade máxima	r/min	2000			
Servo Motores	Eixo Z	Modelo		HC152S-A47	Mitsubishi M64A		
		Potência	kW	1,5			
		Velocidade máxima	r/min	2000			
		Modelo		β 22/2000is	FANUC 0i-Mate MC		
		Potência	kW	2,5			
		Velocidade máxima	r/min	2000			
	Eixo Z	Modelo		HC152BS-A47	Mitsubishi M64A		
		Potência	kW	1,5			
		Velocidade máxima	r/min	2000			
Servo Motores	Eixo X	Modelo		α 12/3000i	FANUC 0i-MC		
		Potência	kW	3			
		Velocidade máxima	r/min	3000			
	Eixo Y	Modelo		α 12/3000i			
		Potência	kW	3			
		Velocidade máxima	r/min	3000			
	Eixo Z	Modelo		α 12/3000Bi			
		Potência	kW	3			
		Velocidade máxima	r/min	3000			
	Servo Motores	Eixo X	Modelo			HC202S-A47	Mitsubishi M64A
			Potência	kW		2	
			Velocidade máxima	r/min		2000	
Eixo Y		Modelo		HC202S-A47			
		Potência	kW	2			
		Velocidade máxima	r/min	2000			
Eixo Z		Modelo		HC202BS-A47			
		Potência	kW	2			
		Velocidade máxima	r/min	2000			
Dimensões gerais da máquina	Comprimento	mm	2655				
	Largura	mm	2275				
	Altura	mm	2485				
Peso da máquina	Peso líquido	kg	5500				
Energia Geral	Voltagem/Frequência	V / Hz	AC220/60				
	Faixa de flutuação de voltagem		-15 ~ +10%				
	Energia Geral do Fornecimento de energia	kW	25				

TABELA 13 - Dados técnicos e mecânicos do CNC
Fonte: Manual de instruções *Skybull 600*

Item		Unidade	Especificação	Observações	
Curso	Eixo X	mm	600		
	Eixo Y	mm	400		
	Eixo Z	mm	480		
	Do nariz do eixo à mesa	mm	80-560		
Mesa	Comprimento	mm	800		
	Largura	mm	420		
	Peso máximo sobre a mesa	kg	400		
Rasgo "T"	Largura	mm	18H7		
Eixo	Tipo do furo cônico	r/min	BT40		
	Velocidade		50 ~ 8000		
	Sistema de acionamento		Acionado diretamente através de correias		
Motor principal	Potência	kW	7,5	FANUC 0i-MC	
	Sobrecarga de 15 minutos	kW	11		
	Torque de saída	Nm	47,7		
	Velocidade máxima	r/min	8000		
Avanços	Eixo X	m/min	24		
	Eixo Y	m/min	24		
	Eixo Z	m/min	24		
Dispositivo para troca automática de ferramenta	Capacidade em configuração Standard	Peças	16	16	
	Modo de selecionar a ferramenta		A escolher	A escolher	
	Tipo / Cone do suporte de ferramenta		MAS403 BT40	MAS403 BT40	
	Diâmetro máximo da ferramenta em configuração Standard	mm	Ø 90 (todas as ferramentas instaladas)	Ø 90	
	Peso máximo da ferramenta	kg	7	7	
Servo Motores	Eixo X	Modelo	β 22/2000is	FANUC 0i-Mate MC	
		Potência	kW		2,5
		Velocidade máxima	r/min		2000
		Modelo		HC152S-A47	Mitsubishi M64A
		Potência	kW	1,5	
Velocidade máxima	r/min	2000			

TABELA 14 - Dados técnicos e mecânicos do CNC
 Fonte: Manual de instruções *Skybull 600*

Especificações elétricas principais da máquina

Nº	Nome do Equipamento	Especificação	
1	Capacidade elétrica geral da máquina	Ver o Adendo	
2	Corrente geral da máquina		380v
			220v
3	Fusíveis do fornecimento de energia do usuário		380v
			220v
4	Voltagem / Capacidade do transformador do eixo e do servo		
5	Seção transversal da fiação de entrada do fornecimento de energia externo		
6	Sistema de fiação	Trifásico, 4 fios	
7	Voltagem da fiação da rede	Trifásico básico, 380V	
8	Flutuação de voltagem permitida na rede	± 10%	
9	Frequência da rede	50 Hz	
10	Flutuação de frequência permitida na rede	± 1 Hz	
11	Temperatura no ambiente de trabalho	0°C ~ 45°C	
12	Umidade relativa	Menor que 75%	
13	Vibração (quando em operação)	Menor que 0,5g	
14	Voltagem do comando	CA	
		CC	
		24V	
15	Voltagem / Capacidade da iluminação	CA 220V / 40W	
16	Voltagem / Capacidade do sistema CNC	CC 24V / 300W	

TABELA 15 - Dados técnicos elétricos do CNC
Fonte: Manual de instruções *Skybull 600*

Unidade de operação da caixa volante

Esta unidade serve para movimentar os eixos de uma forma manual, com o intuito de posicionar a ferramenta em um local específico, indicar para o programa de usinagem as coordenadas do ponto zero peça ou fazer manualmente alguns desbastes para normalizar a peça a ser usinada.

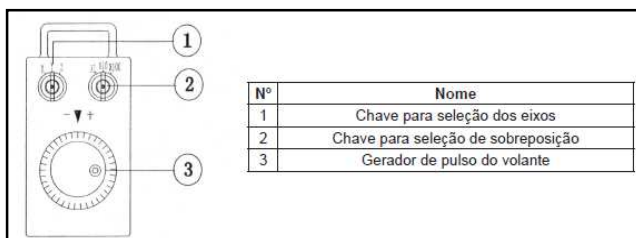


FIGURA 42 - Modo de operação da caixa volante do CNC
Fonte: Manual de instruções *Skybull*

ANEXO B

Motor *Spindle*

Os motores *Spindle* são motores elétricos especiais, motores normalmente trifásicos que podem operar em alta frequência e conseqüentemente em altas velocidades, podendo variar de 0 RPM até a rotação máxima especificada para o motor. O motor *Spindle* tornou-se um dos mais importantes inventos do homem ao longo de seu desenvolvimento tecnológico, é uma máquina de construção moderna, custo reduzido, pequeno dimensional, versátil e não poluente, seus princípios de funcionamento, seleção e utilização necessitam ser conhecidos para que o mesmo desempenhe seu papel relevante nos dias de hoje (TECMAF; 2014).

Aplicação do motor *Spindle*

A velocidade incorreta do *Spindle* é um erro comum na aplicação destes equipamentos quando utilizados em processos de usinagens. Normalmente, cada material possui um aspecto de corte e uma velocidade de corte considerada ideal. Ferramentas de diâmetros maiores requerem velocidades mais lentas, deve-se encontrar o equilíbrio entre a velocidade do *Spindle* e o avanço de corte da ferramenta, permitindo um melhor acabamento de corte e aumento da vida útil da ferramenta e também do *Spindle*. O controle de velocidade do *Spindle* é feito por um Inversor de Frequência, geralmente são motores assíncronos trifásicos. A potência de alimentação do inversor de frequência deve coincidir com a potência absorvida pelo motor.

O avanço de corte da máquina deve ser equilibrado de acordo com a rotação do *Spindle*, mudando um, influencia o outro. Avanços de corte muito lentos diminuem a vida útil da ferramenta, devido ao superaquecimento. Outro fator no aumento de temperatura da ferramenta é a falta de refrigeração na região do corte. O melhor avanço de corte pode ser obtido através de

tentativa e erro, porém, recomenda-se ao usuário consultar o fornecedor de ferramentas para indicar os dados de corte necessários para sua aplicação (TECMAF; 2014).

Ciclo de trabalho de um motor *Spindle*

Quando um motor *Spindle* é classificado em ciclos S1, isto significa que o mesmo é capaz de executar sua potência nominal em 100% do tempo que estiver em operação. O ciclo de trabalho de um motor pode variar, depende do tipo de motor e do sistema de refrigeração que é aplicado. A refrigeração pode ser através de líquidos, ar comprimido, ventilação forçada que é constante independente da velocidade que o motor estiver operando, ou um ventilador acoplado no próprio eixo do motor, variando assim a eficiência da ventilação porque conforme é variado a velocidade do motor muda a quantidade de vento que é aplicado para refrigerar. Em algumas situações deve-se tomar cuidado com o tipo de rolamento utilizado para mancalizar o eixo do motor, pois estes poderão superaquecer e danificar o *Spindle*, mesmo que a potência do ainda esteja em ciclo S1 (TECMAF; 2014).

Falhas por altas cargas radiais

Esta falha ocorre geralmente quando o avanço de corte da máquina é muito rápido em relação aos outros parâmetros de corte para o material a ser usinado, ou quando o avanço empurra uma ferramenta com dentes danificados ou muito chatos. Esta situação pode causar falha no par de rolamentos dianteiros (TECMAF; 2014).

Falhas por altas cargas axiais

É uma falha que pode ocorrer quando o *Spindle* sofre um grande impacto axial, tanto com a peça, quanto com a mesa de trabalho. Esse tipo de falha pode ser detectado através de danos causados no par de rolamentos dianteiros (TECMAF; 2014).

Estator em curto ou aberto

Esta falha ocorre normalmente quando o *Spindle* não recebe a alimentação adequada, falha na refrigeração, passagem do líquido refrigerante para dentro do motor por causa da falha das vedações, parâmetros do Inversor de Frequência não corresponderem adequadamente às características elétricas do motor. Podendo a mesma ser detectada através de medições realizadas com instrumentos de medições elétricas, ou uma inspeção visual do estator após a retirada da máquina e desmontagem do mesmo (TECMAF; 2014).

Esta figura 43 representa um motor *Spindle* bem como seu sistema de refrigeração.



FIGURA 43 - Representação um motor *Spindle*

Fonte: <http://rogercortesi.com/portf/> acessado dia 23/11/2014

ANEXO C

Gráficos referentes aos experimentos preliminares, informações sobre dados de corte encontram-se na tabela 9.

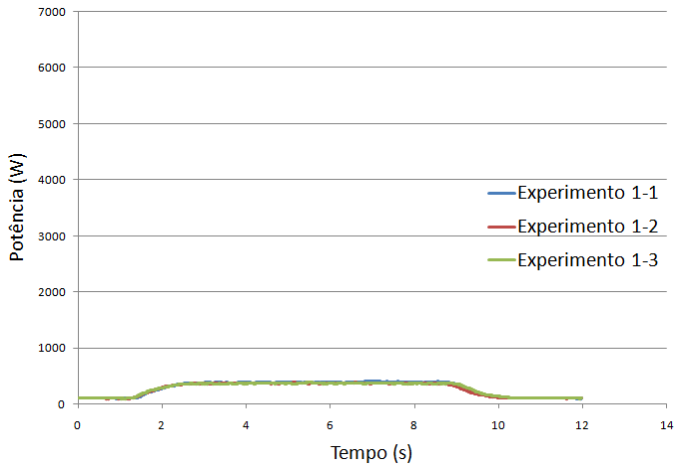


FIGURA 44 - Gráfico do experimento 01

Fonte: Os autores

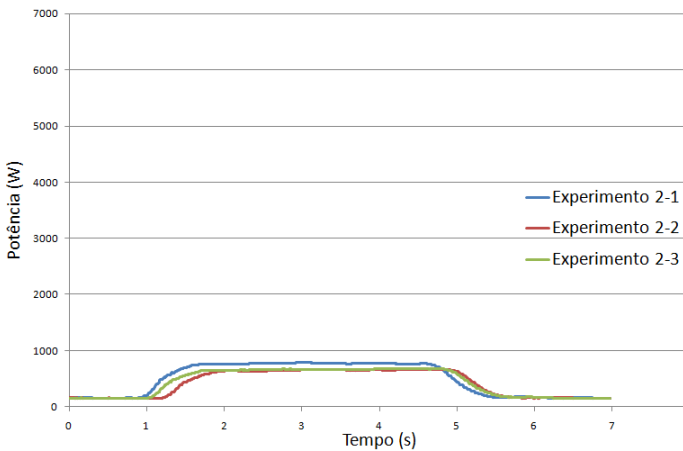


FIGURA 45 - Gráfico do experimento 02

Fonte: Os autores

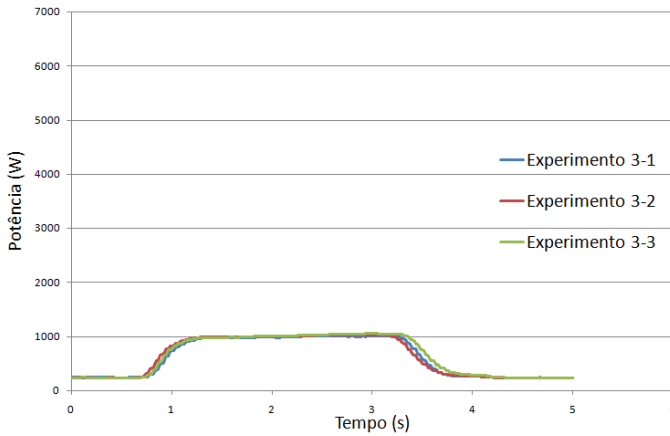


FIGURA 46 - Gráfico do experimento 03
Fonte: Os autores

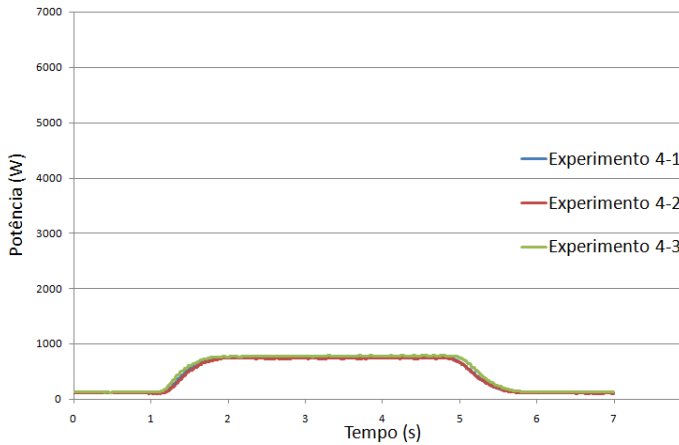


FIGURA 47 - Gráfico do experimento 04
Fonte: Os autores

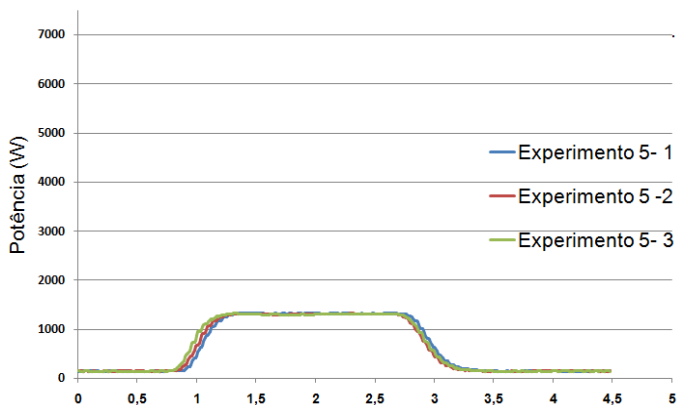


FIGURA 48 - Gráfico do experimento 05
Fonte: Os autores

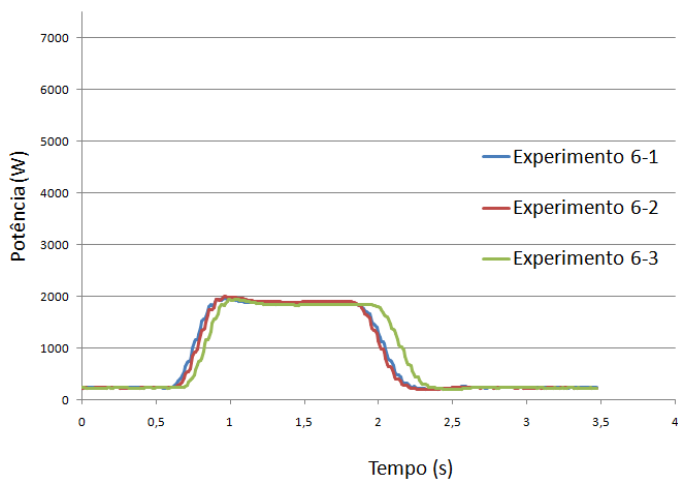


FIGURA 49 - Gráfico do experimento 06
Fonte: Os autores

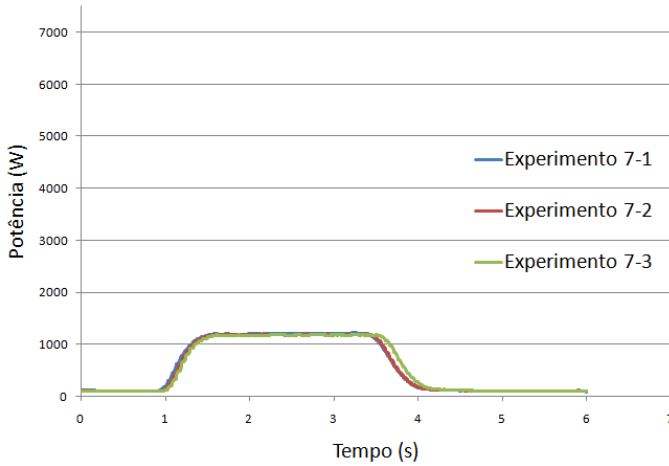


FIGURA 50 - Gráfico do experimento 07
Fonte: Os autores

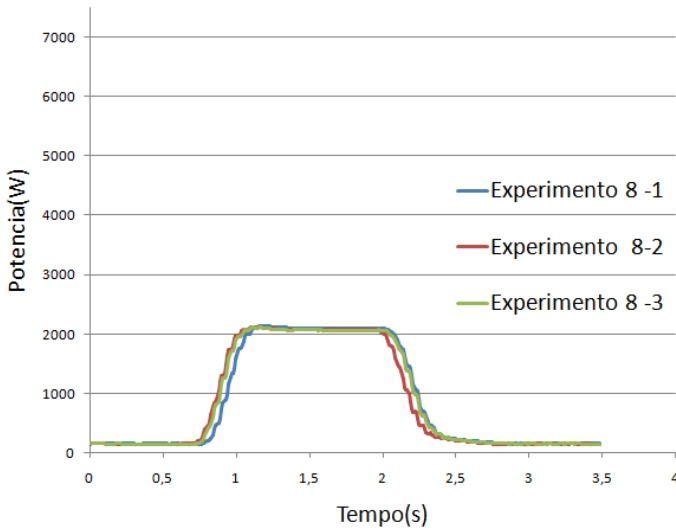


FIGURA 51 - Gráfico do experimento 08
Fonte: Os autores

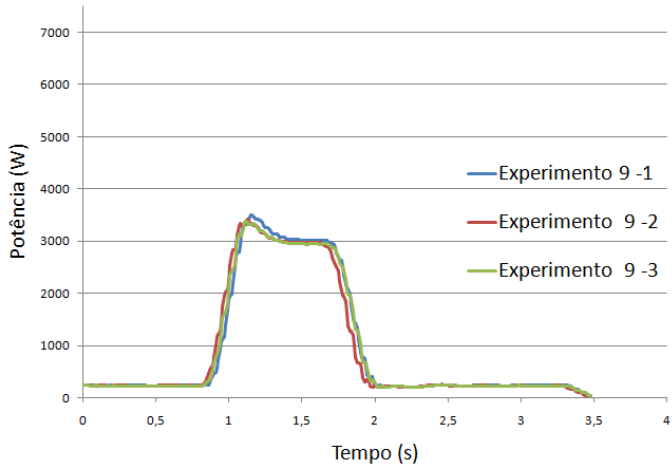


FIGURA 52 - Gráfico do experimento 09
Fonte: Os autores

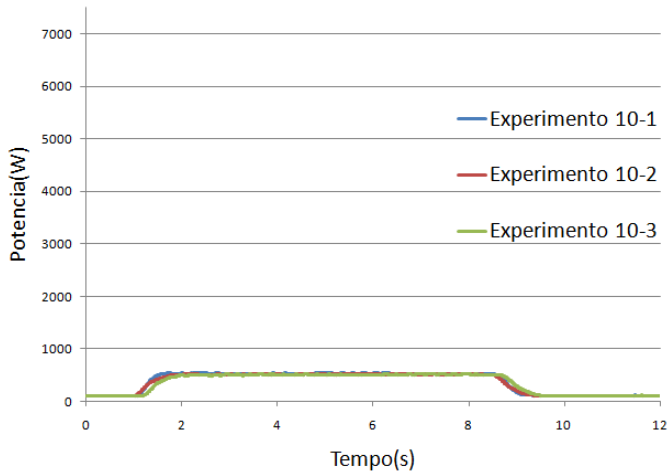


FIGURA 53 - Gráfico do experimento 10
Fonte: Os autores

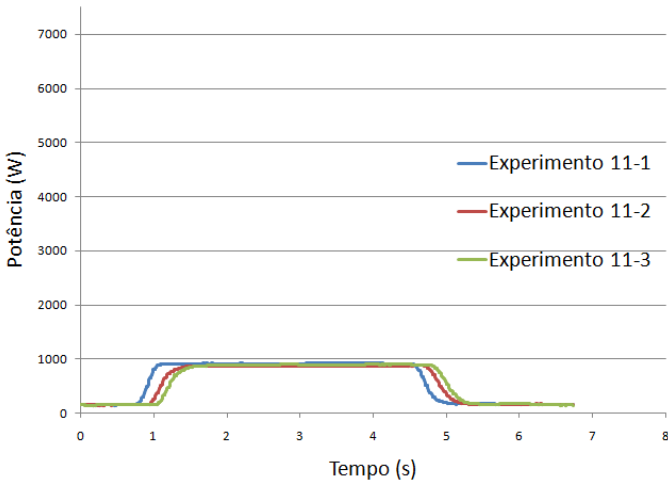


FIGURA 54 - Gráfico do experimento 11
Fonte: Os autores

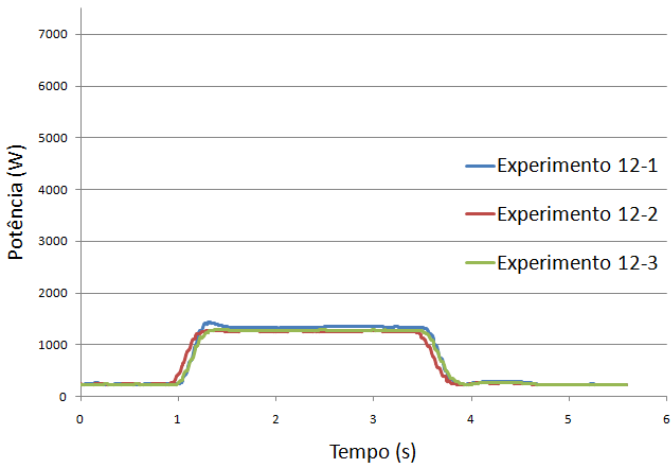


FIGURA 55 - Gráfico do experimento 12
Fonte: Os autores

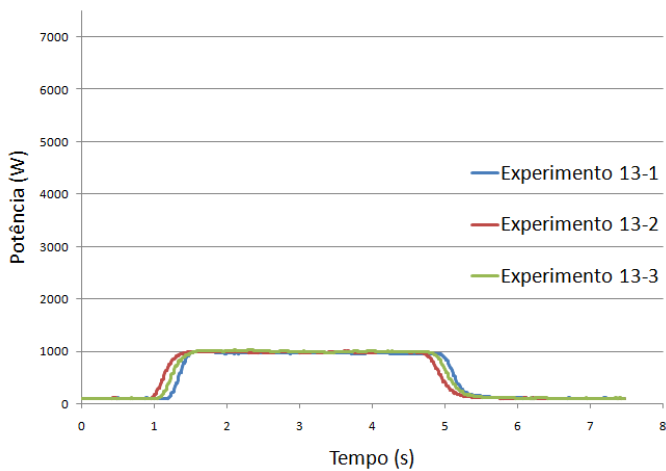


FIGURA 56 - Gráfico do experimento 13
Fonte: Os autores

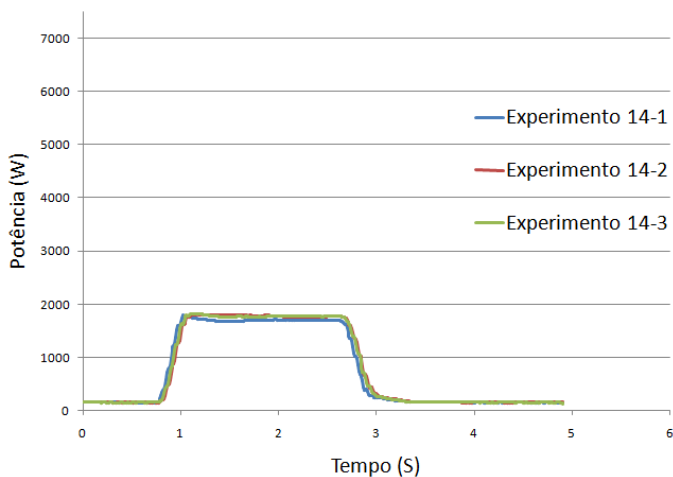


FIGURA 57 - Gráfico do experimento 14
Fonte: Os autores

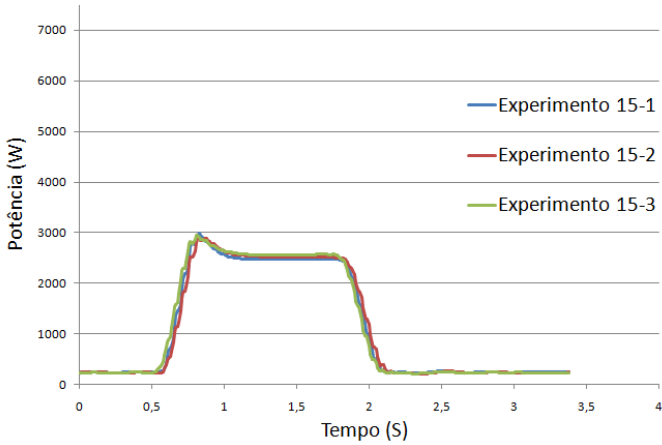


FIGURA 58 - Gráfico do experimento 15
Fonte: Os autores

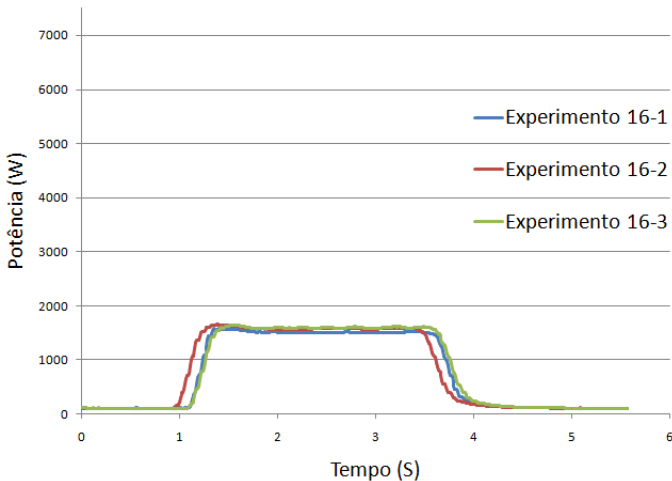


FIGURA 59 - Gráfico do experimento 16
Fonte: Os autores

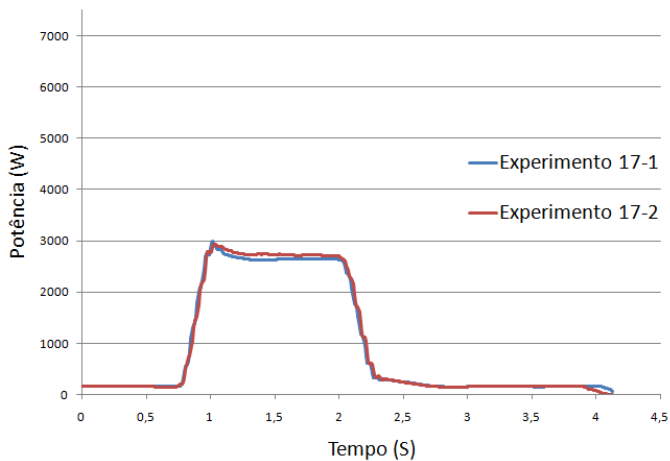


FIGURA 60 - Gráfico do experimento 17

Fonte: Os autores

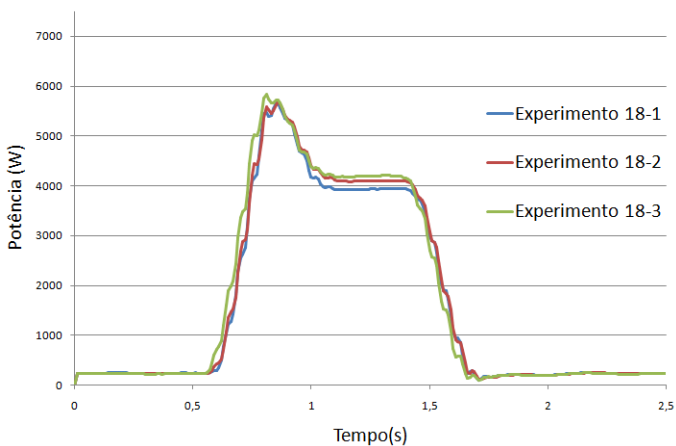


FIGURA 61 - Gráfico do experimento 18

Fonte: Os autores

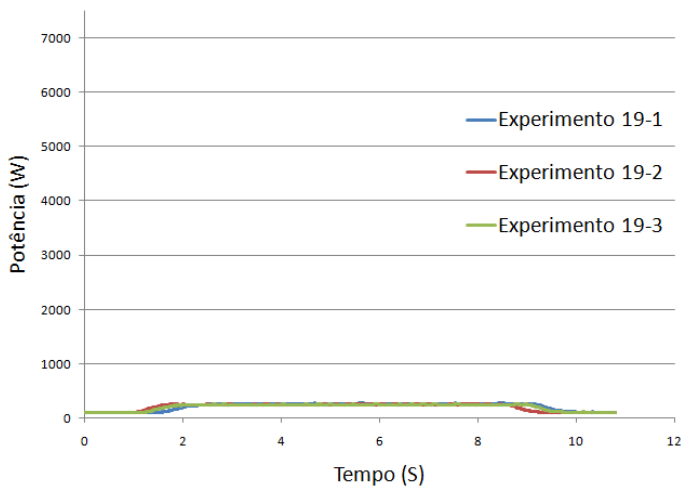


FIGURA 62 - Gráfico do experimento 19
Fonte: Os autores

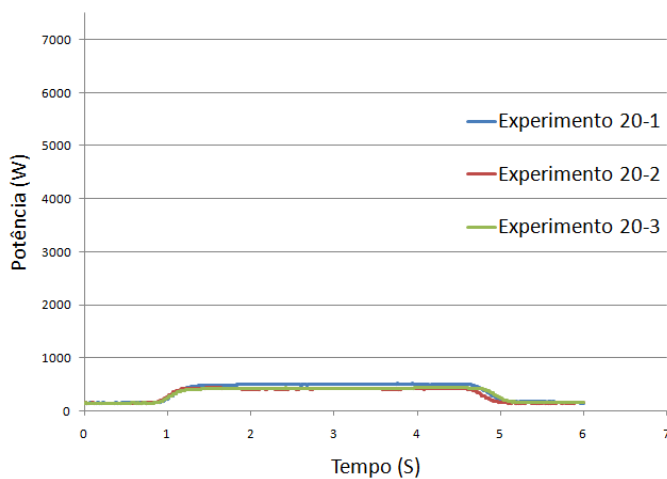


FIGURA 63 - Gráfico do experimento 20
Fonte: Os autores

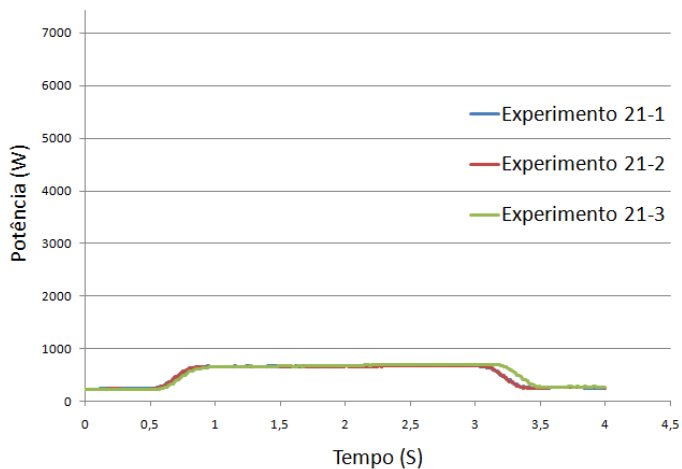


FIGURA 64 - Gráfico do experimento 21
Fonte: Os autores

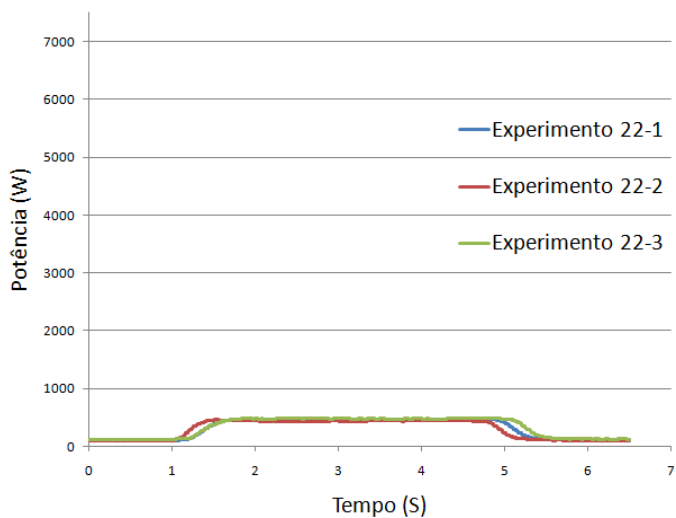


FIGURA 65 - Gráfico do experimento 22
Fonte: Os autores

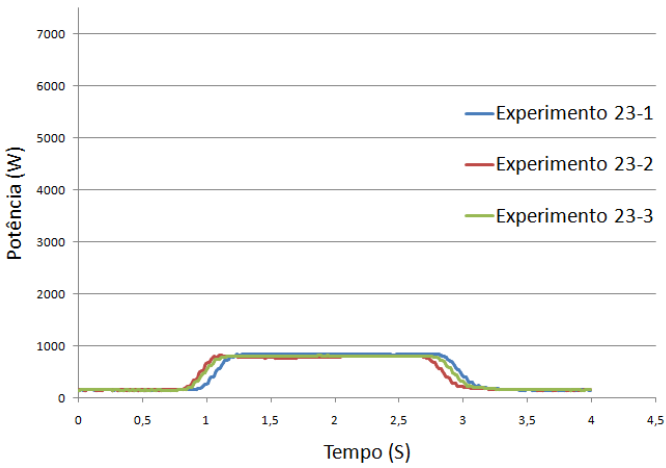


FIGURA 66 - Gráfico do experimento 23
Fonte: Os autores

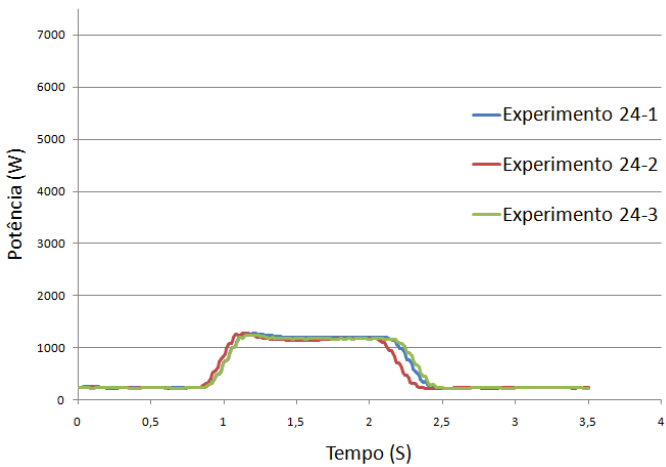


FIGURA 67 - Gráfico do experimento 24
Fonte: Os autores

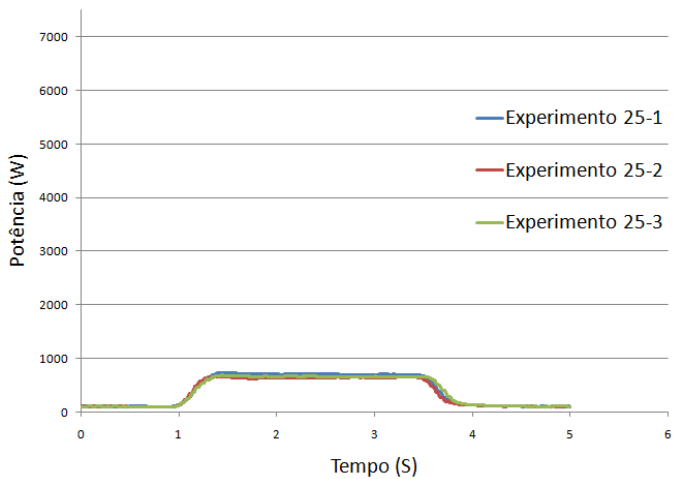


FIGURA 68 - Gráfico do experimento 25
Fonte: Os autores

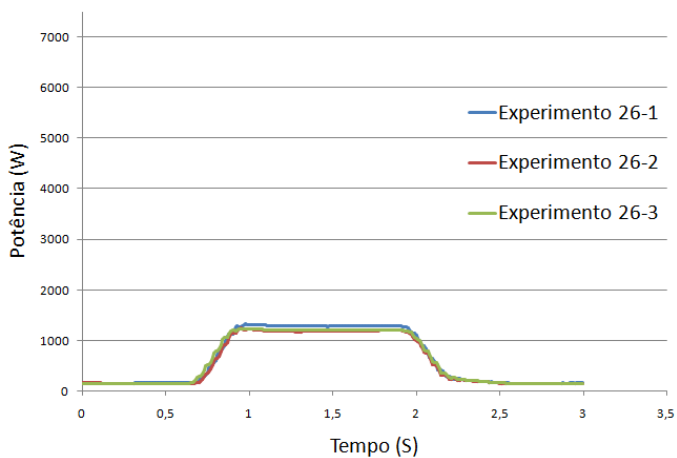


FIGURA 69 - Gráfico do experimento 26
Fonte: Os autores

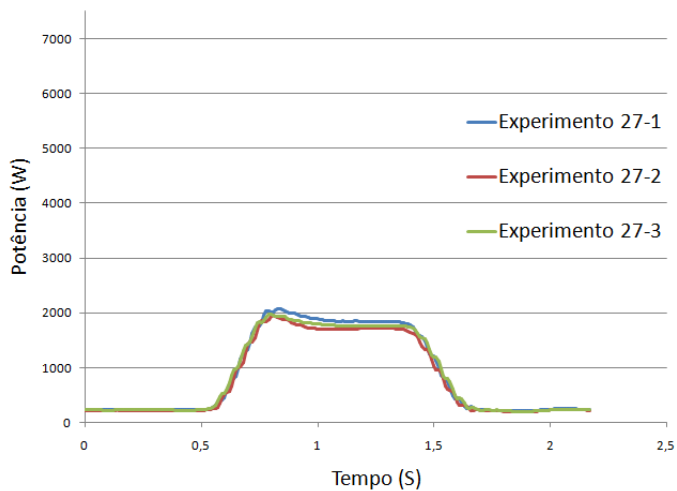


FIGURA 70 - Gráfico do experimento 27

Fonte: Os autores