

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONAL

TIAGO ROSSATO MURARO

**MONITORAMENTO DO DESGASTE DA FERRAMENTA NO PROCESSO DE
FRESAMENTO DE AÇO P20 ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DA POTÊNCIA DO
MOTOR**

CAXIAS DO SUL

2020

TIAGO ROSSATO MURARO

**MONITORAMENTO DO DESGASTE DA FERRAMENTA NO PROCESSO DE
FRESAMENTO DE AÇO P20 ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DA POTÊNCIA DO
MOTOR**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul.

Área de concentração: Projeto e Fabricação.

Linha de pesquisa: Processos de Fabricação e Produção de Componentes, Ferramentas e Matrizes.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

**CAXIAS DO SUL
2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

M972m Muraro, Tiago Rossato

Monitoramento do desgaste da ferramenta no processo de fresamento de aço P20 através da medição da potência do motor / Tiago Rossato Muraro. – 2020.

116 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2020.

Orientação: Rodrigo Panosso Zeilmann.

1. Correntes elétricas. 2. Desgaste mecânico. 3. Fresagem (Trabalhos em metal). 4. Usinagem 5. Motores elétricos de indução. I. Zeilmann, Rodrigo Panosso, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 621.3.026

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

Tiago Rossato Muraro

**Monitoramento do desgaste da ferramenta no processo de fresamento de aço P20
através da medição da potência do motor**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Projetos e Fabricação.

Caxias do Sul, 25 de setembro de 2020.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann (orientador)
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha
Universidade de São Paulo

Profa. Dra. Marilda Machado Spindola
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Leandro Luis Corso
Universidade de Caxias do Sul

Dedico este trabalho à Aline e ao Fernando que sempre me apoiaram nesta jornada de estudos.

AGRADECIMENTOS

À minha família que sempre me incentivou a conquistar os meus objetivos com muito estudo. De forma especial ao meu irmão, professor e colega do Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS) Matias Rossato Muraro, que sempre me incentivou e muito me ajudou durante a realização do mestrado, auxiliando na confecção, testes e ensaios do sistema de aquisição de dados, de modo que este trabalho não teria sido realizado sem ele.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann, que realizou um grande trabalho de orientação e sempre me apoiou em todos os momentos.

Aos meus amigos e colegas Prof. Dr. Ivan Jorge Gabe, Prof. Dr. Patrick Escalante Farias, Prof. Me. Fernando H. Santos, Prof. Dr. Rafael Corrêa, Prof. Me. Matheus Ribeiro, Prof. Me. Vitor Valente, Prof. Me. Leandro Lumbieri, Prof. Ma. Tânia Bertholdo que sempre me apoiaram e me incentivaram.

Aos Técnicos de Laboratório do IFRS, Bruno Nonemacher, Gilmar da Luz Júnior, Jonas Ludwig de Bitencourt, em especial, Everton Silveira, que me cedeu materiais e muitas informações que me auxiliaram e permitiram que eu desenvolvesse os meus estudos e ao aluno Marcelo Schardong que cedeu os microncontroladores para realização dos ensaios.

Aos Técnicos de Laboratório da Universidade de Caxias do Sul (UCS), Gaston Henrique Rossa e Axel Schneider Muller, que me acompanharam durante os ensaios. A verdade é que sem eles não seria possível alcançar os resultados.

Ao Flávio Arí Pedrotti, que auxiliou para o bom andamento das disciplinas e atividades referentes ao curso.

Ao Eng. João Davi Schenkel, que sempre me ajudou e muito me ensinou durante a execução dos ensaios.

Aos professores do Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica da UCS, que me ensinaram neste período de estudos nesta instituição.

“Nunca ande pelo caminho traçado, pois ele conduz somente até onde os outros já foram.”

(Alexander Graham Bell)

RESUMO

Esta dissertação de mestrado propõe desenvolver um sistema de monitoramento de desgaste de ferramenta durante o processo de usinagem através da medição da potência elétrica do motor de fuso. Os métodos diretos de medição são mais confiáveis, mas só podem ser utilizados quando a ferramenta está fora de operação. As soluções para monitoramento online do desgaste podem ser as medições dos seguintes itens: força de corte, emissão acústica, vibração, corrente elétrica, temperatura de corte, dimensões da peça, sinais ultrassônicos e óticos, acabamento superficial, que podem ser utilizados individualmente ou de forma conjunta, para um melhor monitoramento do processo. Inicialmente é realizada uma revisão sobre o processo de fresamento, o desgaste da ferramenta, os métodos de medição do desgaste, de forma especial, o monitoramento através da medição da potência elétrica. Posteriormente, são evidenciados o método para o cálculo da potência elétrica, os princípios de funcionamento de um motor de indução, o controle de velocidade de motores, o processamento digital de sinais e as redes neurais artificiais (RNAs). Em seguida, é apresentada a metodologia de trabalho, ou seja, como foi desenvolvida a placa de aquisição de dados, quais foram os materiais, equipamentos e métodos utilizados nos ensaios. Os resultados experimentais apresentam a construção e calibração do sistema de aquisição de dados, os ensaios para determinação da potência elétrica consumida pelo motor de fuso em função do desgaste utilizando diferentes condições de usinagem. De posse desses dados, é realizado o treinamento da RNA e a verificação dos resultados são feitos, comparando o valor de desgaste medido com aquele estimado pela rede. A RNA utilizada é uma *Feed-Forward*, com treinamento através do algoritmo de *BackPropagation Levenberg-Marquardt*. Este processo obteve resultados satisfatórios e promissores, identificando um potencial grandioso da utilização desta medição da potência elétrica para predição do desgaste da ferramenta de usinagem.

Palavras-chave: Potência Elétrica. Desgaste. Rede Neural Artificial. Fresamento.

ABSTRACT

This master's thesis proposes to develop a tool wear monitoring system during the machining process by measuring the electrical power of the spindle motor. Direct measurement methods are more reliable, but can only be used when the tool is out of operation. The solutions for online wear monitoring can be the measurements of the following items: cutting force, acoustic emission, vibration, electric current, cutting temperature, part dimensions, ultrasonic and optical signals, surface finish, which can be used individually or jointly, for better monitoring of the process. Initially, a review is carried out on the milling process, tool wear, wear measurement methods, in particular, monitoring by measuring the electrical power. Subsequently, the method for calculating electrical power, the operating principles of an induction motor, the control of motor speeds, digital signal processing and artificial neural networks (ANNs) are highlighted. Then, the work methodology is presented, that is, how the data acquisition board was developed, what were the materials, equipment and methods used in the tests. The experimental results show the construction and calibration of the data acquisition system, the tests to determine the electrical power consumed by the spindle motor as a function of wear using different machining conditions. With these data in hand, ANN training is carried out and the results are checked, comparing the measured wear value with that estimated by the network. The ANN used is a Feed-Forward, with training through the BackPropagation algorithm Levenberg-Marquardt. This process obtained satisfactory and promising results, identifying a great potential for the use of this measurement of electrical power to predict the wear of the machining tool.

Keywords: Electric Power. Wear. Neural Network. Milling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – DIREÇÕES DOS MOVIMENTOS DE CORTE, AVANÇO E EFETIVO NO FRESAMENTO.....	29
FIGURA 2 – (A) PROFUNDIDADE DE CORTE (A_P) E PENETRAÇÃO DE TRABALHO (A_E) NO FRESAMENTO PERIFÉRICO E (B) ESPESSURA (H) E LARGURA DE CORTE (B) PARA GUMES RETILÍNEOS.....	30
FIGURA 3 – (A) FRESAMENTO CONCORDANTE E (B) FRESAMENTO DISCORDANTE.	31
FIGURA 4 – DESGASTE DE FLANCO E DESGASTE DE CRATERA E EXEMPLO EM UMA FRESA	35
FIGURA 5 – CAUSAS DO DESGASTE DA FERRAMENTA	35
FIGURA 6 – ESTÁGIOS DE DESGASTE DA FERRAMENTA	37
FIGURA 7 – COMPORTAMENTO DA CORRENTE DO MOTOR DE AVANÇO EM FUNÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA.	43
FIGURA 8 – VARIAÇÃO DA CORRENTE DE FUSO EM FUNÇÃO DO DESGASTE.....	44
FIGURA 9 – VARIAÇÃO DA POTÊNCIA DE FUSO EM FUNÇÃO DO DESGASTE.....	44
FIGURA 10 – A POTÊNCIA INSTANTÂNEA $P(t)$ DE UM CIRCUITO.	46
FIGURA 11 – DIAGRAMA EM CORTE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TÍPICO.	49
FIGURA 12 – COMPONENTES BÁSICOS DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	51
FIGURA 13 – GERAÇÃO DO SINAL PWM.....	52
FIGURA 14 – ESPECTRO DO SINAL PWM.	52
FIGURA 15 – FORMAS DE ONDA DE TENSÃO E DE CORRENTE EM MODULAÇÃO PWM.	53
FIGURA 16 – CONDICIONAMENTO DO SINAL	54
FIGURA 17 – AMPLIFICADOR NA CONFIGURAÇÃO NÃO INVERSORA.	55
FIGURA 18 – DIVISOR RESISTIVO.....	56
FIGURA 19 – FILTRO BUTTERWORTH DE SEGUNDA ORDEM.....	57
FIGURA 20 – REDE MULTI-LAYER PERCEPTRON (MLP).....	60
FIGURA 21 – ETAPAS DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.	63
FIGURA 22 – ESQUEMÁTICO DA LIGAÇÃO DO SENSOR DE CORRENTE E TENSÃO NO MOTOR DE FUSO.	64
FIGURA 23 – DIAGRAMA DE BLOCOS DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	64
FIGURA 24 – FLUXOGRAMA DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.	67
FIGURA 25 – CORPO DE PROVA FIXADO NA MÁQUINA.....	67
FIGURA 26– FRESA UTILIZADA NOS ENSAIOS.	68
FIGURA 27 – INSERTOS UTILIZADOS PARA OS ENSAIOS.	69

FIGURA 28 – FRESADORA UTILIZADA PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.	69
FIGURA 29 – MEDIDOR DE PERFIL UTILIZADO PARA MEDIÇÃO DO DESGASTE.	70
FIGURA 30– REDE NEURAL ARTIFICIAL A SER IMPLANTADA.	70
FIGURA 31 – AQUISIÇÃO DOS DADOS PARA TREINAMENTO DA RNA.....	71
FIGURA 32 – MONITORAMENTO DO DESGASTE DA FERRAMENTA.....	71
FIGURA 33 – PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS: ENTRADA DE DADOS E <i>OFFSET</i>	73
FIGURA 34 - PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS: GANHOS.....	74
FIGURA 35 – PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS: FILTROS.	75
FIGURA 36 – PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS, MICROCONTROLADOR E BLUETOOTH.	77
FIGURA 37 – CALIBRAÇÃO DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	77
FIGURA 38 – LEITURAS REALIZADAS (A) PELA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E (B) PELO WATTÍMETRO.	78
FIGURA 39 – SINAIS DE CORRENTE E TENSÃO OBTIDOS (A) ANTES DO FILTRO E (B) APÓS O FILTRO.....	78
FIGURA 40 – PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS CONECTADA NA MÁQUINA.	79
FIGURA 41 – VARIAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO USINADO E EM TRÊS DIFERENTES ESTÁGIOS.....	81
FIGURA 42 – POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA EM FUNÇÃO DO DESGASTE ($V_{BMÁX}$) PARA CADA CONDIÇÃO DE TREINAMENTO DA RNA NA FERRAMENTA DE 6 MM.	82
FIGURA 43 – POTÊNCIA ELÉTRICA EM FUNÇÃO DO DESGASTE NA FERRAMENTA DE 6 MM.	83
FIGURA 44 – MODELO DE RNA TREINADA.	83
FIGURA 45 – COMPARATIVO ENTRE O DESGASTE DE FLANCO MÁXIMO ($V_{BMÁX}$) MEDIDO E O ESTIMADO PELA RNA PARA A FERRAMENTA 2.	86
FIGURA 46 – COMPARATIVO ENTRE O DESGASTE DE FLANCO MÁXIMO ($V_{BMÁX}$) MEDIDO E O ESTIMADO PELA RNA PARA A FERRAMENTA 1.	89
FIGURA 47 – VARIAÇÃO DO DESGASTE DE FLANCO MÁXIMO ($V_{BMÁX}$) DO INSERTO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE CORTE E TRÊS ESTÁGIOS DE DESGASTE.....	91
FIGURA 48 – POTÊNCIA ELÉTRICA EM FUNÇÃO DO DESGASTE DE FLANCO MÁXIMO ($V_{BMÁX}$) NOS INSERTOS PARA TODAS AS CONDIÇÕES DE USINAGEM.....	92
FIGURA 49 – AUMENTO DO CONSUMO DA POTÊNCIA ELÉTRICA EM FUNÇÃO DO DESGASTE DE FLANCO MÁXIMO ($V_{BMÁX}$) PARA O INSERTO.	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CONDIÇÕES DE CORTE UTILIZADAS NA FERRAMENTA DE 6 MM PARA AQUISIÇÃO DE DADOS.	66
TABELA 2 – POSIÇÃO DA LIGAÇÃO NOS <i>JUMPERS</i> PARA DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE CORTE.	76
TABELA 3 – DADOS EXPERIMENTAIS QUE SERÃO UTILIZADOS PARA TREINAMENTO DA RNA UTILIZANDO A FERRAMENTA DE 6 MM.	80
TABELA 4 – ANOVA PARA OS VALORES DA POTÊNCIA ELÉTRICA.	81
TABELA 5 – COMPARATIVO ENTRE O DESGASTE MEDIDO E O ESTIMADO PELA RNA PARA A FERRAMENTA 2.	84
TABELA 6 – COMPARATIVO ENTRE O DESGASTE DE FLANCO MÁXIMO ($V_{B\text{MÁX}}$) MEDIDO E O ESTIMADO PELA RNA PARA A FERRAMENTA 1.	87
TABELA 7 – DADOS EXPERIMENTAIS QUE SERÃO UTILIZADOS PARA ELABORAÇÃO DA RNA UTILIZANDO OS INSERTOS.	90
TABELA 8 – ANOVA PARA A POTÊNCIA ELÉTRICA DOS INSERTOS	91
TABELA 9 – COMPARATIVO ENTRE O DESGASTE MEDIDO E O ESTIMADO PELA RNA PARA O INSERTO 2.	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a_e	profundidade lateral
a_p	profundidade de corte
A_v	ganho de tensão
A/D	analógico-digital
b	largura do corte
C_1, C_2	capacitor do filtro
CA	corrente alternada
CC	corrente contínua
D	diâmetro da peça ou ferramenta (mm)
f	avanço em cada volta da ferramenta (mm) ou em cada curso da ferramenta (mm/golpe)
f_c	frequência de corte
f_e	frequência elétrica.
f_s	frequência de amostragem
f_z	avanço por dente ou avanço por gumer[mm/dente ou mm/gume]
GPIO	portas de entrada e saída de propósito geral
h	espessura do corte
i_a, i_b, i_c	correntes de fase
I_L	corrente de linha
I_m	valor de pico da corrente de fase
$i(t)$	corrente instantânea
n	número de rotações da peça ou da ferramenta [rpm]
N_{ESC}	velocidade de escorregamento da máquina
N_M	velocidade mecânica do eixo do motor.
N_S	velocidade dos campos magnéticos
$p(t)$	potência elétrica instantânea
P	potência ativa total
P_M	número de polos do motor
R_F	resistor de realimentação
R_1, R_2	resistor do filtro
RPM	rotações por minuto
RPS	rotações por segundo
SV_α	deslocamento do gume no sentido do flanco
SV_γ	deslocamento do gume no sentido do face
T	período da rede
v_{an}, v_{bn}, v_{cn}	tensões de fase
VB	desgaste de flanco
VB_{max}	desgaste de flanco máximo
v_c	velocidade de corte (m/min)
v_e	velocidade efetiva de corte (m/min)
v_f	velocidade de avanço (mm/min)
V_L	tensão de linha
V_{RMS}	valor eficaz da tensão de fase
V_{p-p}	valor de pico da tensão de fase
$v(t)$	tensão instantânea
z	número de dentes da ferramenta
θ_i	ângulo de fase da corrente

θ_v
 ω

ângulo de fase da tensão
frequência angular

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	25
1.1.	JUSTIFICATIVA.....	26
1.2.	OBJETIVO GERAL.....	27
1.3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
1.4.	ESTRUTURADA DISSERTAÇÃO	27
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1.	FUNDAMENTOS DE USINAGEM.....	29
2.2.	DESGASTE DA FERRAMENTA	33
2.2.1.	Desgaste no Fresamento	34
2.3.	MONITORAMENTO DO DESGASTE DA FERRAMENTA.....	37
2.3.1.	Monitoramento do Desgaste da Ferramenta através da Potência da Máquina.....	42
2.4.	POTÊNCIA ELÉTRICA	45
2.5.	MOTORES DE INDUÇÃO.....	48
2.6.	CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES.....	50
2.7.	PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS.....	53
2.8.	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	59
3.	METODOLOGIA	63
3.1.	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	63
3.2.	AQUISIÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA.....	63
3.3.	DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS.....	65
3.3.1.	Ferramentas	68
3.3.2.	Equipamentos	69
3.4.	REDE NEURAL ARTIFICIAL	70
3.4.1.	Treinamento e validação da RNA	70
4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	73
4.1.	CONFECÇÃO E CALIBRAÇÃO DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	73
4.2.	REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS, TREINAMENTO E VALIDAÇÃO DA RNA COM A FERRAMENTA DE 6 MM	80
4.3.	REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS E TREINAMENTO DA RNA UTILIZANDO INSERTOS.....	90
5.	CONCLUSÃO	95

5.1. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	97
REFERÊNCIAS	99
APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	105
APÊNDICE B – DADOS PARA TREINAMENTO DA RNA UTILIZANDO A PRIMEIRA FERRAMENTA DE 6 MM.	108
APÊNDICE C – DADOS PARA TREINAMENTO DA RNA UTILIZANDO A FERRAMENTA DOIS DE 6 MM.	110
APÊNDICE D – DADOS PARA TREINAMENTO DA RNA UTILIZANDO OS INSERTOS.	112
ANEXO A– TRANSFORMADOR DE POTENCIAL	114
ANEXO B– TRANSFORMADOR DE CORRENTE.....	116

1. INTRODUÇÃO

No cenário industrial atual, fabricar peças com um preço mínimo, qualidade superior e no menor tempo possível é uma necessidade. A busca por produtividade leva a aplicação de métodos para melhorar os processos de usinagem e de qualidade das peças trabalhadas. Para isso, são desenvolvidas máquinas cada vez mais precisas, com maior potência e versatilidade. Também é feito o uso de tecnologias paralelas, como a eletrônica aplicada aos comandos das máquinas e o descobrimento de novos materiais e ferramentas (KLOCKE, 2011).

Mesmo com todo o avanço, ainda existem dois problemas não resolvidos nos processos de corte: o desgaste de ferramenta e a quebra de ferramenta. Em usinagem, isso pode ser considerado um ponto crítico: determinar o exato momento da troca da ferramenta, considerando sua máxima utilização e respeitando os limites da qualidade da peça produzida, possibilitando uma diminuição do custo de produção (ERTUNC; LOPARO; OCAK, 2001)¹.

Inicialmente a previsão da falha da ferramenta e a estratégia de troca de ferramentas eram baseadas nas estimativas mais convencionais dos dados de desgaste de ferramentas que foram utilizadas anteriormente ou da experiência adquirida pelo operador (SANTOS; ALMEIDA; TU, 1999). Nas décadas de 1980 e 1990, em que práticas antigas de troca de ferramentas começaram a ser alteradas, e surgiu a possibilidade de se aplicar procedimentos de mudança de ferramentas baseados no monitoramento do desgaste das arestas de corte por meio da implementação de mecanismos adaptativos de inspeção da ferramenta (DIMLA, 2000).

A medição do desgaste da ferramenta pode ser realizada de forma direta ou indireta. Os métodos diretos de medição do desgaste são mais confiáveis, contudo, é necessária a parada do processo para o acompanhamento da variável que se quer estudar, causando uma interrupção do processo, isto é, gerando tempos improdutivos e, conseqüentemente, prejuízo na indústria (SILVA, 2010; TOLEDO, 2015).

Com o objetivo de diminuir estas paradas, várias técnicas de previsão de desgaste de ferramentas têm sido empregadas de forma indireta, através de emissão acústica, medição de potência da máquina, tensão, vibração, calor, corrente elétrica dos motores, etc.

A potência do eixo, as forças de corte, o torque e a corrente do motor são todos relacionados entre si, originados e dependentes inteiramente um do outro. Portanto, ao medir apenas um desses parâmetros já é possível estimar o desgaste da ferramenta. O uso de um sensor de efeito Hall permitiu medir a corrente elétrica fornecida ao motor do fuso de uma fresadora.

¹ Uma vez que possui uma alta taxa de remoção de cavaco, uma grande variedade de geometria das ferramentas, alta precisão, rapidez de execução associado a um baixo custo.

Após ser modelada e ocorrer o desenvolvimento de algoritmos computacionais, as medições da corrente do motor conseguem diagnosticar de forma mais confiável a quebra da ferramenta de corte, especialmente quando comparadas com as estimativas realizadas através da medição de força ou torque. A potência elétrica do motor do fuso de uma fresadora está diretamente relacionada à taxa de desgaste da ferramenta, mas também é afetada pelas condições de corte e pela geometria da ferramenta (DIMLA, 2000).

Segundo Marcelino et al. (2013), a medição de potência dos motores da máquina empregada juntamente com as Redes Neurais Artificiais (RNAs) pode ser utilizada para estimar o desgaste da ferramenta e evitar danos a peça, ao eixo da árvore e a própria ferramenta. As RNAs podem utilizar as informações de vários sensores, como torque, emissão acústica, corrente, potência, vibração, de modo individual ou em combinação com sinais de outros sensores, por exemplo, a entrada do sistema de monitoramento da condição da ferramenta (KHAJAVI; NASERNIA; ROSTAGHI, 2016), detectar implicitamente as relações não lineares complexas entre variáveis e trabalhar com a enorme quantidade de dados que são gerados durante os ensaios.

Este primeiro capítulo apresenta a justificativa deste trabalho, onde são apontados características e problemas provenientes do desgaste da ferramenta de corte. Após, são elencados os objetivos (gerais e específicos) deste trabalho.

1.1. JUSTIFICATIVA

Conforme Li e Tso (1999), o monitoramento do desgaste da ferramenta em tempo real e a substituição dela no momento adequado são fatores importantes para serem desenvolvidos na automatização de processos produtivos e evitar danos às ferramentas, máquinas e peças.

Os métodos diretos de monitoramento têm a vantagem de medição contínua do desgaste real da ferramenta, enquanto um parâmetro correlacionado com o desgaste da ferramenta é medido em um método indireto.

Os métodos indiretos de monitoramento de usinagem têm como principal característica a fácil aplicação e a pouca interferência no processo, pois equipamentos de pequenas dimensões podem ser utilizados e, em vários casos, é possível medir um sinal ou efeito remotamente, ou seja, distante da zona de usinagem, não interferindo no processo. A sua principal desvantagem está no fato de que não apenas o que se quer medir, por exemplo, o desgaste da ferramenta, influencia no sinal medido, mas também outros fatores, como as condições de usinagem, as condições da máquina, etc. (TOLEDO, 2015).

Através do monitoramento do desgaste em tempo real, os custos por paradas devido à quebra são reduzidos e ocorre a utilização máxima da ferramenta, uma vez que não dependerá da interpretação do operador quanto ao nível de desgaste e não deverão ter tantas paradas para verificar o estado da ferramenta.

Com as tecnologias atuais, tais como os sistemas de microcontroladores e a nanotecnologia, é possível criar as condições necessárias para a implantação de sistemas inteligentes de prevenção de falhas em máquinas e equipamentos (CABRAL, 2017). Independentemente do regime de trabalho da ferramenta e do histórico, o método proposto será utilizado para avaliar a condição atual da mesma.

1.2. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral dessa proposta de dissertação é desenvolver uma metodologia para verificar o desgaste da ferramenta utilizada no processo de fresamento através da medição da potência elétrica de alimentação do motor do eixo-árvore da máquina.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Identificar, na bibliografia, as melhores técnicas para a medição de desgaste de ferramentas em máquinas de corte, fresamento ou usinagem;
- b) Implementar um sistema de aquisição de dados para medição dos valores de potência elétrica dos motores das máquinas de fresamento;
- c) Desenvolver ensaios de fresamento para medição do desgaste da ferramenta em diferentes velocidades de corte e de avanço do gume, medição da potência elétrica dos motores, a fim de construir um banco de dados que serão utilizados para treinamento da RNA; e
- d) Verificar o desgaste da ferramenta através da medição da potência elétrica de entrada e utilizando a RNA escolhida.

1.4. ESTRUTURADA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos. O primeiro capítulo é composto pela introdução e apresenta uma caracterização de todos os assuntos que são abordados no trabalho. Também salienta a justificativa, o objetivo geral e os objetivos específicos. O subtítulo 1.4 indica a estrutura desta dissertação.

O segundo capítulo contempla o referencial teórico, onde é feita uma revisão sobre fundamentos de usinagem, medição do desgaste da ferramenta, definição de potência elétrica, motores de indução, controle de velocidade de motores, processamento digital de sinais e redes neurais.

O terceiro capítulo relata o planejamento experimental. Para isso, é realizada a apresentação das ferramentas e dos equipamentos que serão utilizados na elaboração da placa de aquisição de dados. Também são definidos como será a aquisição da potência elétrica e qual será o modelo de rede neural a ser utilizado.

No quarto capítulo são apresentados os resultados experimentais. Este capítulo descreve como é feita a calibração da placa de aquisição de dados, quais são os resultados dos ensaios, como se dá o treinamento e a aplicação da rede neural artificial.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas nesta dissertação, bem como algumas propostas para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão do processo de usinagem, do desgaste de ferramentas, do monitoramento deste desgaste, da potência elétrica dos motores de indução, do controle de velocidade de motores, do processamento digital de sinais e das redes neurais artificiais (RNA).

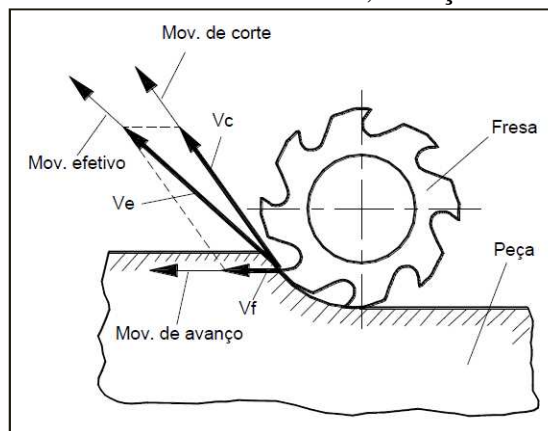
2.1. FUNDAMENTOS DE USINAGEM

O fresamento é um processo de remoção de cavaco através de um movimento circular da ferramenta com um ou vários gumes para produzir superfícies arbitrárias, dando a forma e a dimensão desejada. A direção de corte costuma ser perpendicular, mas também pode ser transversal ao eixo de giro da ferramenta (KLOCKE, 2011).

Atualmente, o fresamento é um dos processos de usinagem com maior emprego na indústria, isso ocorre devido aos seguintes aspectos: alta taxa de remoção de material e produção de formas com boa precisão dimensional e geométrica, além de ser um processo de elevada flexibilidade, sendo utilizado na fabricação de superfícies planas, contornos, ranhuras e cavidades, entre outras (TOLEDO, 2015).

No fresamento, a peça permanece estática, fixada sobre a mesa, que pode se mover ou não, enquanto a ferramenta é rotacionada. A Figura 1 exemplifica as direções de velocidade de corte, avanço e efetivo do fresamento em sua trajetória cíclica.

Figura 1 – Direções dos movimentos de corte, avanço e efetivo no fresamento.



Fonte: Adaptado de Klocke (2011).

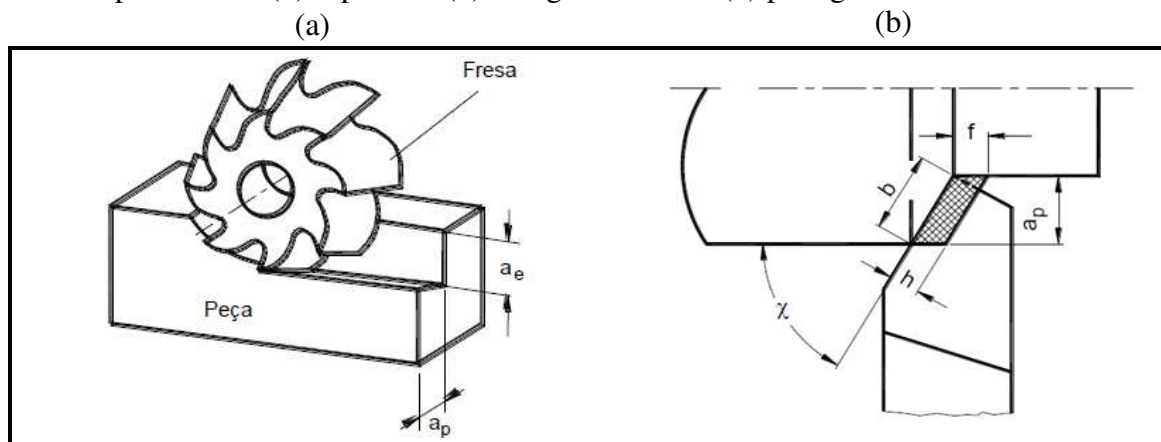
A velocidade de corte (v_c) apresentada na Figura 1 é a velocidade instantânea do ponto de referência do gume da ferramenta, segundo a direção e o sentido de corte. A velocidade de

avanço (v_f) é a velocidade instantânea do ponto de referência do gume, segundo a direção e sentido de avanço. Já a velocidade efetiva de corte (v_e) é a velocidade instantânea do ponto de referência do gume da ferramenta, segundo a direção efetiva de corte.

A Figura 2 apresenta as demais grandezas do corte. Na Figura 2(a) está representada a profundidade de corte (a_p), que é a profundidade de penetração do gume principal, e a penetração de trabalho (a_e), que trata o quanto a ferramenta penetra em relação à peça, numa direção perpendicular à direção de avanço.

Na Figura 2(b), o avanço (f) representa o percurso de avanço em cada volta (mm) ou em cada curso da ferramenta (mm/golpe). No caso de ferramentas que possuem mais de um dente, distingue-se o avanço por dente (f_z), que é o avanço de cada dente medido na direção de avanço da ferramenta e corresponde à geração de duas superfícies de usinagem consecutivas. A largura de corte (b) é a largura da seção transversal de usinagem e a espessura de corte (h) é a espessura da seção transversal de usinagem (KLOCKE, 2011).

Figura 2 – (a) Profundidade de corte (a_p) e penetração de trabalho (a_e) no fresamento periférico e (b) espessura (h) e largura de corte (b) para gumes retilíneos.



Fonte: Adaptado de Klocke (2011).

As principais diferenças entre o fresamento e outros processos de usinagem são a existência do corte alternado do dente de corte da fresa, entrando e saindo da peça, ou seja, durante um giro, ela apresenta um ciclo ativo (efetivamente em corte) e outro inativo (movimento sem corte) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

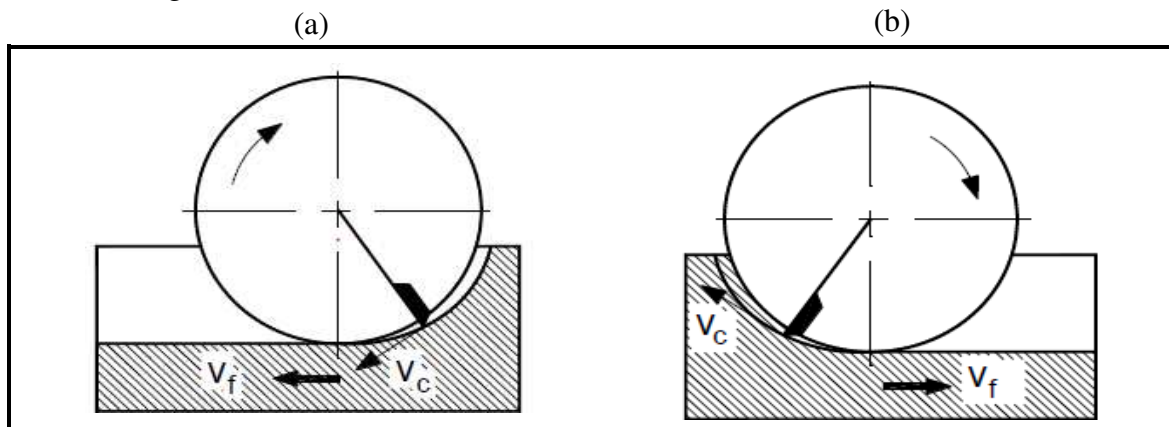
No fresamento, a relação entre o sentido de rotação da ferramenta e o avanço da peça também é de grande importância. Existem dois tipos de movimentos: o concordante e o discordante. No fresamento concordante, a fresa gira no sentido de avanço da peça, ao dar início ao corte, o cavaco tem espessura máxima, que vai sendo reduzida ao mínimo até o momento em que a ferramenta perde contato com a peça, como mostra a Figura 3(a). Já no fresamento

discordante, o sentido de rotação da fresa é oposto ao sentido de avanço, o cavaco tem espessura mínima no início do corte e espessura máxima no fim do corte, conforme pode ser visto na Figura 3(b).

Em geral, o fresamento concordante é o preferido, pois possui algumas vantagens em relação ao discordante: a resultante das forças empurra a peça contra a sua fixação na mesa, minimizando a possibilidade de vibração; menor desgaste e, por consequência, maior vida da ferramenta; melhor qualidade superficial gerada, devido ao movimento relativo entre as velocidades de avanço e de corte; menor potência de avanço; menor caminho percorrido pelo gume. Embora não seja algo óbvio, a redução é, em média, da ordem de 3%, com redução correspondente do nível de desgaste.

Apesar das várias vantagens do fresamento concordante, existem casos em que ele não pode ser utilizado, como: quando existe folga no fuso da mesa da máquina-ferramenta; quando a superfície da peça tiver resíduo de areia de fundição, for muito irregular ou o material for proveniente de processos de forjamento (KÖNIG, 1997).

Figura 3 – (a) Fresamento concordante e (b) fresamento discordante.



Fonte: Adaptado de KLOCKE (2011).

O fresamento é utilizado na usinagem de peças das mais variadas geometrias, tamanhos e complexidades devido à possibilidade de implementação de diferentes eixos de movimentação no equipamento, o que lhe confere maior flexibilidade, especialmente quando comparado a outros processos de usinagem (TOLEDO, 2015).

As máquinas devem ser cada vez mais precisas para garantir o grau de conformidade das peças acabadas em relação às especificações geométricas, tolerâncias do produto usinado e do acabamento superficial. Minimizar os erros envolvidos no processo de usinagem é uma das formas de otimizar o rendimento mantendo o custo de produção (SANTOS, 2018).

Os erros dinâmicos ocorrem tanto nas fases de construção quanto utilização das máquinas-ferramenta, tais como a fabricação imprecisa dos seus elementos, bem como montagem incorreta dos componentes, corrosão, folga e colisão acidental dos eixos em movimento ou da ferramenta na mesa ou na peça de trabalho.

Outro erro muito importante é o erro de posicionamento que pode ser constituído por até 75% de erros térmicos. As principais fontes de erros térmicos são as perdas elétricas devido ao enorme número de componentes elétricos e eletrônicos, incluindo os sistemas de controle, que tornaram as montagens mecânicas mais simples e precisas. O motor do fuso normalmente a principal fonte de calor e sua refrigeração é mandatória nos atuais projetos de máquinas-ferramenta.

Outra fonte é o ambiente onde a máquina está instalada que pode sofrer grandes flutuações de temperatura ambiente, humidade e pressão atmosférica conforme as condições climáticas. Além disso, as radiações do sol e das lâmpadas contribuem com uma parcela adicional de calor. O contato direto entre as pessoas e a máquina também alteram o estado térmico da máquina. A radiação emitida pode contribuir sensivelmente como um fator prejudicial em usinagens de alta precisão ou em operações de medição por exemplo. E também, tanto a estrutura da máquina-ferramenta quanto as peças de trabalho usinadas carregam a inércia térmica de operações anteriores além das flutuações de temperatura (SANTOS, 2018).

A maior parcela de geração de calor em máquinas-ferramenta é causada pelo processo de usinagem e pelo atrito entre as esferas e as pistas dos rolamentos (HARRIS, 2001). Mas, em geral, o calor da usinagem é removido pelo fluido refrigerante e pelos cavacos, de modo que o atrito entre as esferas e as pistas dos rolamentos são o motivo predominante para a elevação da temperatura do sistema (SANTOS, 2018).

Como alternativa para diminuição do erro térmico é necessário realizar o devido aquecimento da máquina, para que ocorra o devido assentamento dos mancais e rolamentos da máquina, seguindo as orientações do fabricante antes de iniciar os trabalhos; usar ferramentas de corte adequadas, bem como a correta refrigeração, para minimizar a geração de calor. (KLOCKE, 2011); o ideal é que a máquina esteja instalada em sala climatizada (SANTOS, 2018); fazer manutenção preventivas periódicas e atentar a correta lubrificação de peças importantes como guias lineares, fusos de esferas e rolamentos, a incorreta lubrificação pode fazer com que estes componentes aumente a geração de calor; é fundamental que o operador da máquina tenha pleno conhecimento do fenômeno térmico, e desenvolva alternativas para corrigi-lo, como de tempos em tempos conferir e corrigir o “zero-peça”.

2.2. DESGASTE DA FERRAMENTA

Por caracterizar um corte interrompido, o fresamento produz solicitações térmicas² e mecânicas alternantes, que eventualmente podem levar à formação de fissuras em forma de pente ou transversais. Além disso, devido à fadiga, essas fissuras podem levar a quebra do gume. As formas de contato entre a ferramenta e a peça têm uma primordial influência sobre o comportamento de desgaste dos materiais das ferramentas de corte, por isso o processo deve ser desenvolvido de modo a suportar a grande variação de cargas estáticas e dinâmicas (OST, 2016).

Os principais parâmetros que podem influenciar no desgaste da ferramenta são a velocidade de corte, a velocidade de avanço, a profundidade de corte radial, a profundidade de corte axial e o diâmetro da ferramenta. A geometria da peça e da fresa geradora, o material da peça e da ferramenta, o seu tratamento térmico, as condições de corte e de refrigeração também podem ser incluídas como causadores de desgaste e diminuição da vida da ferramenta. Estes parâmetros de processos devem ser bem compreendidos para a adequada seleção dos mesmos, com a finalidade de otimizar a produtividade através da diminuição dos tempos de usinagem e do incremento da vida da ferramenta (KLOCKE, 2011).

No processo de fresamento, a velocidade de corte é o parâmetro de maior influência na vida da ferramenta, isso ocorre principalmente devido às altas temperaturas geradas na interface entre a peça e a ferramenta. Contudo, no processo de fresamento de topo³ reto, uma alternativa para aumentar a vida da ferramenta, mantendo a taxa de usinagem constante, pode ser alcançada diminuindo a velocidade de corte e aumentando o avanço por dente, isto dentro de níveis aceitáveis. Outra característica importante é que para a mesma taxa de usinagem, a influência da redução da velocidade de corte na vida da fresa é maior do que aquela que ocorre devido à redução do avanço por dente. Significa que para aumentar a vida da ferramenta sem alterar os tempos de usinagem, pode-se elevar o avanço por dente e diminuir a velocidade de corte proporcionalmente (KÖNIG, 1997).

² Essas solicitações ocorrem principalmente no trabalho com corte interrompido. Durante a entrada da ferramenta, o gume aquece-se rapidamente a elevadas temperaturas. Após a saída da peça ocorre o resfriamento.

³ O fresamento de topo é um processo de fresamento contínuo, circunferencial e frontal que emprega uma fresa de topo. É utilizado com vantagem na execução de superfícies de forma livre, por exemplo, na fabricação de matrizes, no fresamento de rasgos de chaveta, bolsas, bem como rasgos e cortes de todos os tipos e tamanhos.

A falha de uma ferramenta de corte pode ocorrer de três formas distintas: lascamento, desgaste de flanco e desgaste na face.

O lascamento representa uma falha acidental e prematura da ferramenta, ocasionado pelas sobre solicitações de origem mecânica ou térmica do gume. As solicitações mecânicas são causadas por cortes interrompidos ou impactos, usinagem de material muito duro, dimensões excessivas do cavaco e vibrações mecânicas. As solicitações térmicas causam um fissuramento no gume devido a um resfriamento brusco da ferramenta, tanto na afiação, quanto na usinagem (STEMMER, 2005).

2.2.1. Desgaste no Fresamento

Durante o processo de fresamento, a área do gume da ferramenta é submetida a inúmeros esforços e ao atrito, o que gera um desgaste, que acontece devido à progressiva perda de material das suas superfícies. Este desgaste contínuo em suas faces e flancos determina o final de vida em serviço da ferramenta (OST, 2016).

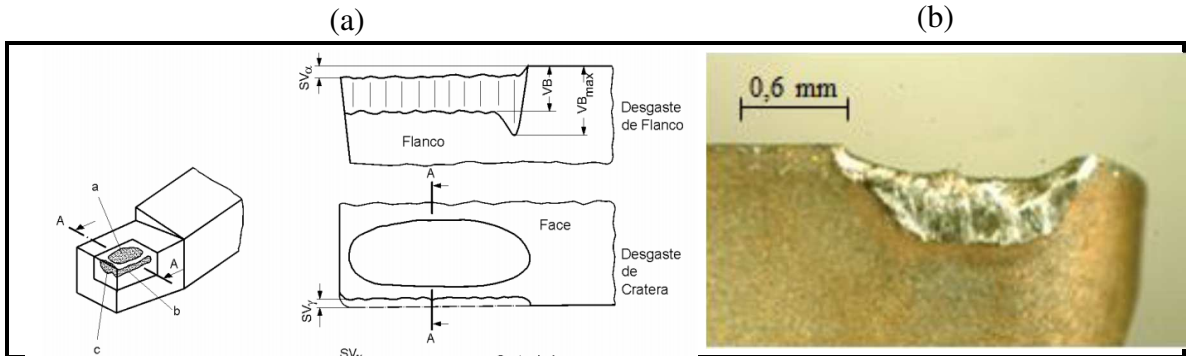
Devido a sua cinemática, o fresamento possui características específicas que aumentam a taxa de desgaste das ferramentas. O processo se caracteriza pela variação de carga térmica e mecânica decorrente da saída e da reentrada da ferramenta. A variação de temperatura pode causar tensões que resultam em trincas térmicas. Já a variação nas cargas mecânicas pode ocasionar o surgimento de trincas devido à fadiga (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Os desgastes mais conhecidos são o desgaste na face da ferramenta, conhecido como desgaste de cratera - representado pela letra “a” na Figura 4(a) - e o desgaste na superfície de saída, conhecido como desgaste de flanco. Conforme mostrado na Figura 4(a), a letra “b” exemplifica o desgaste de flanco no gume principal e a letra “c” demonstra o desgaste de flanco no gume secundário. O desgaste de flanco pode ser representado pelo valor médio do desgaste de flanco (V_B) e pelo seu valor máximo, definido como ($V_{Bmáx}$) (KLOCKE, 2011). Na Figura 4(b) é possível observar um exemplo de desgaste em uma pastilha de fresamento. O fato de a ferramenta possuir o revestimento de coloração dourada propicia um contraste que facilita a visualização da região onde ocorreu o desgaste (ZEILMANN et al., 2010).

O desgaste de flanco pode ter seu máximo na periferia da zona de contato da ferramenta que se desloca na direção do cavaco. O desgaste de flanco surge devido às solicitações térmicas e mecânicas, por conta do caráter abrasivo e da quina afiada do lado inferior do cavaco, bem como por causa do contato direto com a atmosfera. Vale ressaltar que em decorrência das

solicitações térmicas e mecânicas elevadas, o desgaste da ferramenta, de uma forma geral, é relativamente rápido.

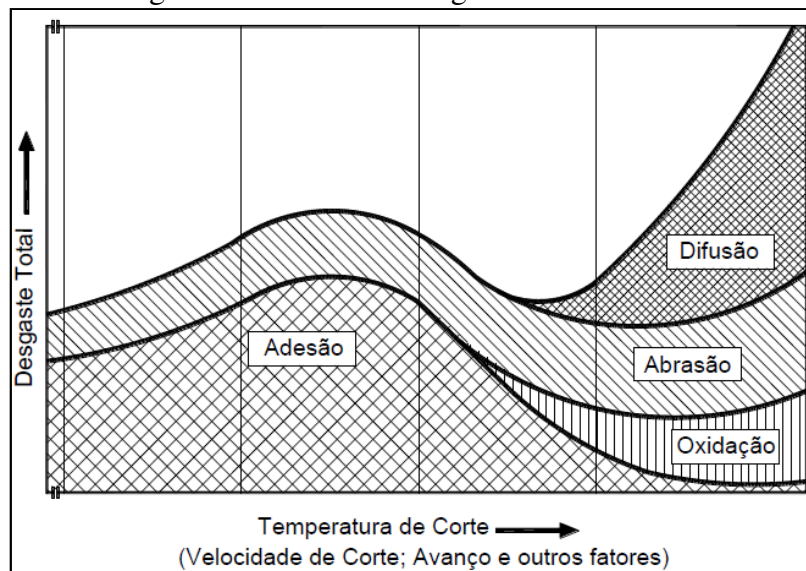
Figura 4 – Desgaste de flanco e desgaste de cratera e exemplo em uma fresa



Fonte: Adaptado de Klocke (2011)(a) e Zeilmann et al.(2010)(b).

Os mecanismos causadores de desgaste de uma ferramenta são: Abrasão Mecânica; Adesão (cisalhamento de microsoldagem ou microcaldeamentos); Difusão; Oxidação, conforme demonstrado na Figura 5 (KLOCKE, 2011). Esses mecanismos de desgaste agem de forma simultânea, o que os torna muito difícil de ser distinguidos entre si.

Figura 5 – Causas do Desgaste da Ferramenta



Fonte: Adaptado de KLOCKE (2011).

A Abrasão Mecânica ocorre devido à presença de partículas duras no material da peça. O cisalhamento de partes do gume postiço e sua extrusão pela interface entre superfície de corte/flanco levam a um desgaste mais acentuado.

Para ocorrer a Adesão, é necessário que exista afinidade entre o material da peça e o material da ferramenta. Além disso, a temperatura, o tempo e a pressão de contato devem estar situados em uma faixa de valores adequados. Para materiais que apresentam um encruamento acentuado, a adesão leva à formação do gume postiço.

No estado sólido, a Difusão consiste na transferência de átomos pertencentes à rede cristalina de um material para a rede cristalina de outro material, constituída de elementos que apresentam afinidade entre si. Quanto maior for a afinidade, a temperatura de contato, o tempo de contato e o nível de agitação atômica, maior será a atividade de difusão entre a ferramenta e o cavaco.

A Oxidação ocorre após o corte do material. Muitas vezes são observadas cores de revenimento⁴ na região de contato entre o cavaco e a ferramenta, sendo que este efeito é provocado pela oxidação da ferramenta. A Oxidação só ocorre se a temperatura for suficientemente elevada e se houver a presença de oxigênio na região aquecida. Na usinagem do aço com ferramenta de metal-duro, sobretudo em temperaturas de corte acima de 800°C, o mecanismo de oxidação ocorre de forma mais intensa (KLOCKE, 2011).

Solicitações mecânicas e térmicas são danificações do gume, tais como microquebras, fissuras transversais e longitudinais, bem como deformação plástica, que advém de solicitações térmicas e mecânicas excessivas (STEMMER, 2005).

O mecanismo de Abrasão ocorre em toda a faixa de temperatura a qual é submetida uma ferramenta de corte. A Adesão se limita às velocidades de corte baixas, ao passo que os mecanismos de Difusão e Oxidação só ocorrem de forma acentuada em velocidades de corte elevadas.

Dentre as citadas acima, uma das principais causadoras de desgaste da ferramenta é a Abrasão. Ela gera principalmente desgaste de flanco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

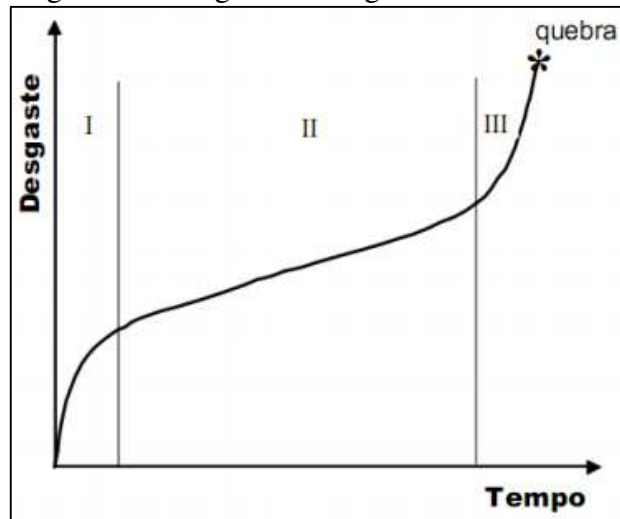
No que diz respeito à evolução do desgaste da ferramenta de corte, na Figura 6 é possível observar o comportamento desse desgaste até atingir o final da vida da ferramenta.

No primeiro trecho (estágio I), a ferramenta apresenta um rápido crescimento do desgaste, que é o resultado de uma acomodação tribológica do sistema. No final deste estágio, há uma diminuição da taxa de desgaste (ocorre uma inflexão na curva). Essa diminuição do

⁴ Revenimento é aplicado nos aços para corrigir a tenacidade e a dureza excessiva, conseguindo o aumento da tenacidade dos aços. Revenimento é o reaquecimento das peças temperadas, a temperaturas abaixo da linha inferior de transformação do aço. Dependendo da temperatura resulta em pequena ou grande transformação da estrutura martensítica.

desgaste do primeiro trecho irá se refletir no segundo trecho (estágio II), em que há uma acomodação da evolução do desgaste, que cresce lentamente e de forma praticamente constante. O último trecho (estágio III) começará quando houver uma nova inflexão na curva no estágio anterior, mostrando que o desgaste está aumentando de forma mais acelerada.

Figura 6 – Estágios de Desgaste da Ferramenta



Fonte: Adaptado de MACHADO et al. (2009).

Neste estágio, a ferramenta atinge rapidamente o seu final de vida. Caso a ferramenta não seja reafiada ou substituída, ela poderá falhar rapidamente, pois sua geometria de corte está comprometida devido ao desgaste, o que acarreta grandes níveis de atrito, geração de calor e elevadas tensões (MACHADO et al., 2009).

À medida que a ferramenta vai se desgastando, a temperatura se eleva, as forças de corte e a potência consumida aumentam, as dimensões da superfície usinada se alteram e o acabamento superficial piora (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014; LI; TSO, 1999; STEMMER, 2005).

2.3. MONITORAMENTO DO DESGASTE DA FERRAMENTA

O monitoramento do desgaste da ferramenta é fundamental para a manutenção da qualidade do produto que está sendo usinado, para o aumento de produtividade e a diminuição dos custos no processo produtivo (PONTES, 2006).

Os métodos diretos de medição, onde são utilizados sensores óticos, equipamentos de medição de geometria e condição de ferramenta, são mais confiáveis, mas só podem ser

utilizados quando a ferramenta está fora de operação (SILVA, 2010; LI; TSO, 1999), ou seja, a parada da máquina para verificar a condição da ferramenta se faz necessária.

As soluções para que ocorra o monitoramento online do desgaste podem ser as medições da força de corte, da emissão acústica, da vibração, da corrente elétrica, da temperatura de corte, das dimensões da peça, dos sinais ultrassônicos e óticos, do acabamento superficial (LI; TSO, 1999; TOLEDO, 2015).

Conforme descrito acima, há diferentes técnicas que podem ser utilizadas em um sistema de monitoramento. Contudo, aplicar de forma pura e simples um destes sistemas não fará com que o objetivo seja atingido com sucesso. É preciso ter conhecimento da dependência do sinal com as variáveis de processo e entendimento dos mecanismos fonte, responsáveis pela geração do sinal. Além disso, alguns requisitos mínimos relativos aos sensores devem ser respeitados no monitoramento indireto (TOLEDO, 2015):

- Estar o mais próximo possível do ponto de corte;
- A rigidez da ferramenta não deve ser reduzida para a introdução do sensor;
- Não devem reduzir o espaço de trabalho;
- Não devem alterar as condições de corte;
- Devem ser livres de desgaste e manutenção, facilmente substituídos e terem baixo custo;
- A função dos sensores deve ser independente da ferramenta e/ou peça;
- As características metrológicas devem ser adequadas;
- Devem resistir à sujeira, aos cavacos e às influências mecânicas, eletromagnéticas e térmicas; e
- A transmissão de sinal deve ser confiável.

Medir as forças de corte pode ser uma das soluções para o acompanhamento do desgaste da ferramenta.

O conhecimento da força de usinagem que age na cunha cortante e o estudo do comportamento de suas componentes são de grande importância, não apenas porque a potência requerida para executar o corte pode ser estimada, como também porque elas devem ser consideradas no projeto das máquinas, das ferramentas e de seus elementos. Ela pode ser responsável direta pelo colapso da ferramenta de corte por deformação plástica do gume, além de influenciar no desenvolvimento de outros mecanismos e processos de desgaste.

As forças de usinagem são as mais pesquisadas para se monitorar o processo de usinagem por duas justificativas principais: a primeira é a facilidade de se medir as forças de

usinagem por dinamometria, um método amplamente conhecido, e a segunda é que há um “consenso” de que a força de usinagem é um bom parâmetro indicador sobre desgaste, quebra ou outras anomalias referentes à ferramenta (TOLEDO, 2015). Anicic et al. (2018) ressaltam que é preciso cuidado ao determinar as condições de usinagem, pois dependendo quais forem os valores escolhidos, mesmo com o aumento do desgaste da ferramenta, as forças terão uma variação pouco significativa.

A medição das forças de torque é um processo dispendioso, possui limitações durante o uso do sistema, problemas de confiabilidade do sensor no ambiente severo, restrições de *layout* (espaço, peso) e interferência no desempenho do corte (LI et al., 2004). Outro problema em medir as forças de torque é que o sinal medido pode ser severamente afetado pelas vibrações de ressonância no dinamômetro (SILVA, 2010).

O sensor que mais se destaca é o dinamômetro piezelétrico. Ele é baseado no fato de que alguns cristais, uma vez comprimidos dinamicamente, produzem um sinal elétrico proporcional às forças dinâmicas transmitidas através deles. Contudo, os custos destas medições através da instalação do dinamômetro são relativamente caros.

A emissão acústica pode ser definida como ondas de tensão elásticas geradas pela liberação rápida de energia de deformação dentro de um material submetido a um estímulo exterior, provocado pelo rearranjo de sua estrutura. Estas ondas de tensão produzem deslocamentos na superfície do material, que podem ser detectados por sensores piezoelétricos, ou seja, sensores que possuem a característica de transformar estes deslocamentos em sinais elétricos. No processo de usinagem, as principais fontes de emissão acústica são atrito cavaco-ferramenta; o atrito ferramenta-peça; a deformação plástica na zona primária de cisalhamento; a deformação plástica na zona secundária de cisalhamento devido ao contato por aderência; e a quebra do cavaco. Dentre as fontes relacionadas com emissão acústica, apenas a deformação plástica, principalmente aquela causada pelo movimento de discordâncias, e a fratura são significantes no processo de usinagem (SILVA, 2010).

Esse tipo de emissão é um meio sensível de monitorar o desgaste e a fratura da ferramenta. A utilização de emissão acústica para medição do desgaste é um processo relativamente simples e de baixo custo. Por ser muito sensível aos fenômenos que ocorrem no processo, é fácil de captar o sinal. Em um ambiente de usinagem de precisão, consegue identificar as condições de corte com maior precisão, em comparação com outros sensores.

A principal vantagem dos sensores de emissão acústica é que eles capturam o corte em condições de alta frequência em comparação com sensores baseados em vibração. Como os distúrbios produzidos pelas máquinas são geralmente em frequências mais baixas, eles serão

eliminados durante o processamento do sinal e será processado apenas o sinal de frequência superior que representa a condição da ferramenta (KRISHNAKUMAR; RAMESHKUMAR; RAMACHANDRAN, 2018).

Há alguns problemas para execução destas medidas, tais como: fixação do sensor na peça, pois o sinal passa a não ser constante, já que a distância entre o local de corte e onde está o sensor varia; dificuldade de encontrar modelos teóricos adequados; costuma ser exigida uma alta taxa de aquisição dos dados e uma frequência de amostragem que seja, no mínimo, o dobro da frequência que se deseja amostrar, isso faz que uma alta quantidade de dados deva ser tratada, processada e armazenada; dificuldade de implementação no ambiente industrial.

Por outro lado, a emissão acústica apresenta algumas vantagens em relação a outros métodos de monitoramento indireto: o sensor é barato e pequeno (pouco intrusivo); as faixas de frequências estão acima das frequências de vibração de certos elementos da máquina ferramenta, como motores e rolamentos, fazendo com que tais vibrações não se constituam em ruído no sinal medido (TOLEDO, 2015).

Através de um algoritmo de árvore de decisão para determinação do desgaste da ferramenta, Krishnakumar, Rameshkumar e Ramachandran (2018) conseguiram determinar a condição da ferramenta entre “boa”, “intermediária” e “desgastada” com uma precisão de classificação de mais de 98,7%, porém foram utilizadas condições ideais de usinagem para chegar aos resultados.

A vibração consegue refletir o estado da ferramenta de corte com precisão, mas, em excesso, pode produzir marcas na superfície da peça durante o corte e pode acelerar o desgaste da ferramenta, afetando diretamente a vida útil da máquina. Geralmente ela ocorre por causa dos efeitos dinâmicos de tolerâncias de fabricação, folgas, contatos, atrito entre peças de uma máquina e, principalmente, devido ao efeito de forças dinâmicas desequilibradas de componentes rotativos e alternativos de máquinas (SILVA, 2010).

A amplitude de vibração aumenta com a progressão do desgaste da ferramenta. Desta forma, quanto maior for a velocidade, menor será a identificação entre os níveis de desgaste da ferramenta, já que a amplitude de vibração é reduzida com o aumento da velocidade de corte (RIVERO; LÓPEZ DE LACALLE; LUZ PENALVA, 2008; DROUILLET et al., 2016).

Para detectar os sinais de vibração no processo de corte, foram propostos métodos que utilizam sensores de vibração do tipo fio, que podem ser fixados na peça de trabalho, na mesa da máquina ou no eixo, quando usado, de modo que os sinais da vibração são transmitidos ao computador. Há uma grande dificuldade para instalar e operar estes sensores. Os sinais de vibração detectados nessas posições são de baixa intensidade, isso ocorre devido à distância

física do sensor e a aresta de corte, a posição de montagem do acelerômetro pode alterar estes valores, o ambiente possui presença de cavacos e a perturbação do sinal captado devido ao ruído produzido pelos mancais do eixo, porta-ferramenta e interfaces da pinça (XIE; LI; LU, 2018; DROUILLET et al., 2016).

Para reverter esta situação, sistemas de sensoriamento sem fio estão sendo desenvolvidos, então será possível usá-los no fresamento sem interferir no processo de corte. Ao utilizar sensores sem fio, Xie, Li e Lu (2018) obtiveram resultados onde conseguiram distinguir o desgaste da ferramenta com a precisão de 92,4% no total. No entanto, devido ao fato do sensor não ter fonte de energia, ele opera por um curto período de tempo sem interrupção.

O processo de usinagem gera uma quantidade significativa de calor. As temperaturas resultantes ao redor das arestas de corte têm influência direta na taxa e no modo com que ocorre o desgaste da ferramenta, assim como no atrito entre a ferramenta e o cavaco e a ferramenta e a nova superfície formada (DIMLA, 2000). Portanto, o estudo da geração de calor e do campo de temperaturas em uma ferramenta de corte é extremamente importante quando o objetivo é obter o controle sobre os mecanismos e as formas de desgaste de uma ferramenta.

Existem três possíveis fontes de geração de calor em um processo de usinagem: a zona de cisalhamento primário, a zona de cisalhamento secundário e a zona de interface entre a ferramenta e a peça na superfície de folga. Dessa maneira, ao longo da vida de uma ferramenta existirão mudanças no campo de temperaturas, sempre tendendo ao aumento da geração de calor e a elevação das temperaturas. Assim, o monitoramento dessas mudanças é muito importante, já que quando a ferramenta se desgasta, há um acréscimo na área de contato peça/ferramenta e, conseqüentemente, aumenta a região de atrito e cresce a temperatura de corte.

Então, a temperatura pode ser usada para monitorar o desgaste da ferramenta e um equipamento que pode medir esse parâmetro é o termopar. Porém, na prática, esse equipamento apresenta certa dificuldade para ser usado, visto que a instalação de um termopar padrão sobre uma pastilha convencional seria difícil de ser realizada por operadores em chão de fábrica. A instalação exige pastilhas especiais, o que limita a utilização em condições industriais (SILVA, 2010).

2.3.1. Monitoramento do Desgaste da Ferramenta através da Potência da Máquina

As tentativas de associar o desgaste da ferramenta com o aumento da potência da máquina vêm de alguns anos. Zhang et al. (1994) usaram um sensor de efeito Hall para medir a corrente fornecida ao motor do fuso de uma fresadora juntamente com as forças de corte. Com o auxílio de algoritmos de computador, foram desenvolvidos modelos matemáticos dessas grandezas, a fim de compará-las com as que estavam sendo medidas. O estudo concluiu que para diagnóstico da quebra da ferramenta, as medições de correntes eram bem mais confiáveis que as medições da força de torque.

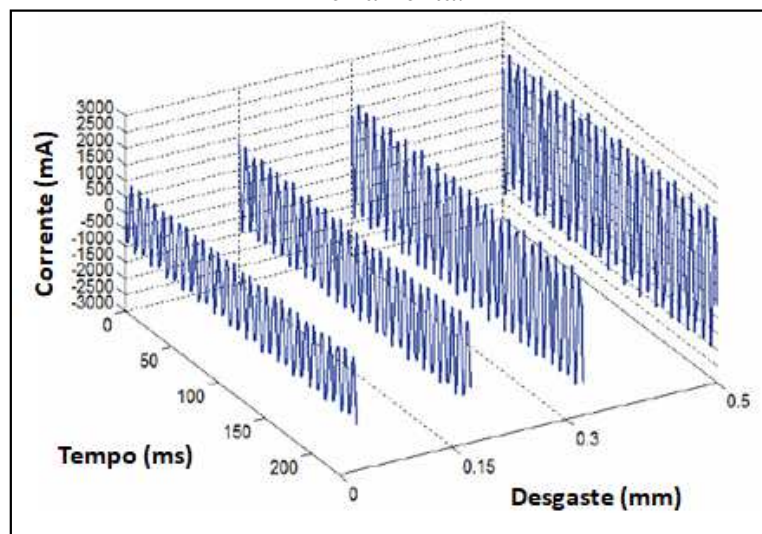
Durante o procedimento de corte, a corrente e a potência do motor estão relacionadas ao torque e à componente tangencial da força de corte. A utilização de uma ferramenta mais afiada vai exigir um menor torque e, conseqüentemente, uma menor potência do motor (LI, 2005; SHAO; WANG; ZHAO, 2004). Esta potência possui um comportamento linear, ou seja, à medida que aumenta o desgaste da ferramenta, ocorre uma elevação da potência consumida. Este fato ocorre devido à evolução do desgaste de flanco, que ocasiona um aumento da área de contato entre a ferramenta e a peça, mesmo diminuindo a profundidade do corte (NAVES, 2009).

Rad et al. (2013) utilizaram a corrente do motor do fuso para detecção do desgaste. Foi feito uma análise através da transformada S no domínio do tempo-frequência e criado um coeficiente de correlação, para comparar o sinal normal com o sinal que apresentasse alguma anormalidade. Com base na curva ajustada, o desgaste da ferramenta foi previsto para três sinais de entrada defeituosos, com um erro máximo de 5,5%.

Na Figura 7, Khajavi, Nasernia e Rostaghi (2016) apresentam o comportamento da corrente do motor de avanço em função do tempo para uma ferramenta nova e para uma ferramenta com um desgaste elevado. Como pode ser percebido, à medida que ocorre o desgaste da ferramenta, o consumo de corrente do motor se eleva, devido ao aumento do contato entre a peça de trabalho e a ferramenta.

Além disso, à medida que ocorre um aumento da profundidade de corte ou da velocidade de avanço, há um aumento na corrente do motor, porque em ambos os casos a força de corte aumenta, o que por sua vez aumenta a carga mecânica no motor. No entanto, as variações dos valores da corrente não mostraram uma tendência evidente quando comparadas com as mudanças de velocidade do fuso (KHAJAVI; NASERNIA; ROSTAGHI, 2016).

Figura 7 – Comportamento da corrente do motor de avanço em função do desgaste da ferramenta.



Fonte: Adaptado de KHAJAVI; NASERNIA; ROSTAGHI (2016).

À medida que a velocidade de corte aumenta, o valor da corrente do motor de fuso também aumenta. O mesmo vale para a velocidade de avanço, ou seja, é possível observar o efeito do aumento da força de atrito devido ao aumento gradual do desgaste da ferramenta (BAEK; JUNG; PARK, 2018).

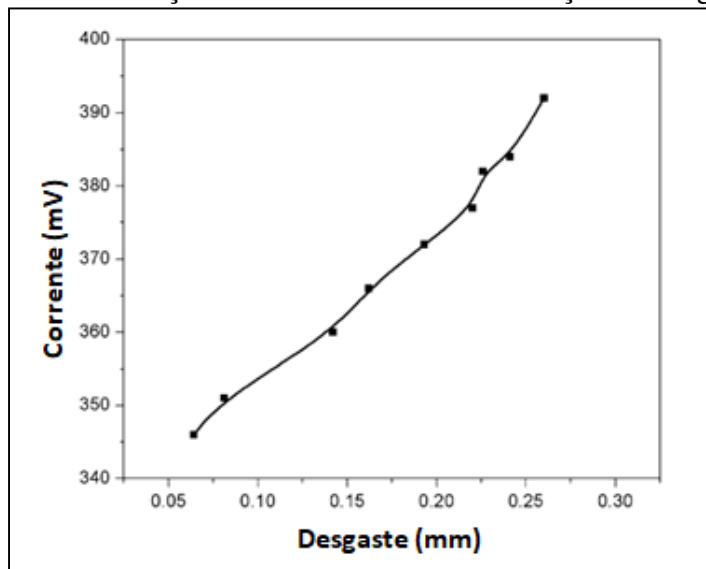
Segundo Silva (2010), o aumento da área de contato entre as superfícies devido ao desgaste faz com que o atrito se eleve e, por conseguinte, a potência e as forças necessárias para que haja o corte efetivo serão aumentadas. O efeito do aumento de área, ocorrido por conta do desgaste de flanco, parece prevalecer sobre a redução da resistência do material usinado devido ao aumento de temperatura. Logo, há um acréscimo nos valores da potência de corte consumida durante a usinagem.

A Figura 8 mostra o efeito do desgaste da ferramenta na amplitude do sinal de corrente do motor de fuso durante a perfuração realizada por uma broca de 10 mm, a uma velocidade de 630 rpm e velocidade de avanço de 0,063 mm/rev. O atrito na broca e na interface da peça aumenta com o aumento do desgaste da broca, o que aumenta a magnitude da corrente de corte e a magnitude da corrente do motor do fuso, que foi convertida em milivolt (mV), onde 100 mV representa 1 A.

Entre os vários métodos utilizados, a medição da corrente elétrica é considerada um dos meios mais eficazes de monitoramento de desgaste de ferramentas nos processos de usinagem (KHAJAVI; NASERNIA; ROSTAGHI, 2016). Porém, a correlação entre o aumento da corrente elétrica do motor e o fim de vida da ferramenta ainda não foi completamente

compreendida e pequenas mudanças nas variações das condições de usinagem alteram os valores da corrente medida (KIM et al., 2002).

Figura 8 – Variação da corrente de fuso em função do desgaste.



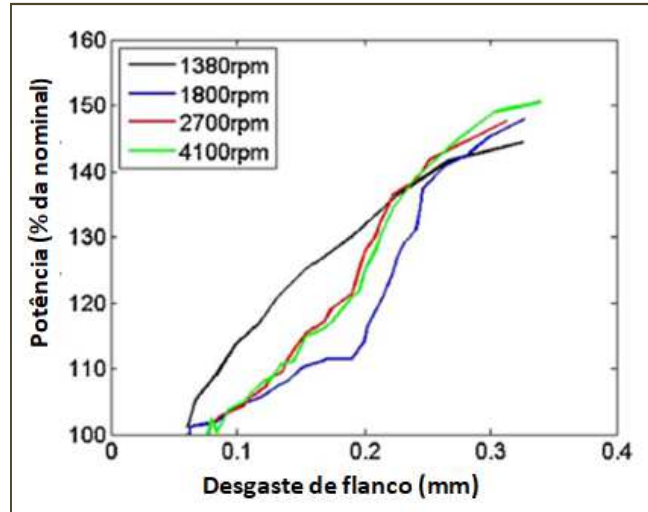
Fonte: Adaptado de PATRA; PAL; BHATTACHARYYA (2007).

As flutuações das tensões de alimentação dos motores também não são levadas em consideração, sendo consideradas constantes ao longo de toda análise, apesar de que a tensão da rede de energia elétrica pode mudar ao longo do tempo no chão de fábrica onde a usinagem é realizada (PATRA; PAL; BHATTACHARYYA, 2007).

A potência de corte durante o processo de usinagem é baseada no fato de que uma ferramenta nova consome menos energia que uma ferramenta usada, (SHAO; WANG; ZHAO, 2004). A principal razão para o aumento no consumo de energia de corte é o atrito gerado no aumento da área de contato entre a peça e a ferramenta, mas o consumo de energia de corte também é afetado pelas condições de corte e geometria da ferramenta, conforme demonstrado na Figura 9 (CONSTANTINIDES; BENNETT, 1987; DROUILLET et al. 2016).

Da Silva, Da Silva e Hassui (2016) consideram a potência do motor de fuso como sendo a principal potência durante o processo de usinagem. Comparado com outros métodos de monitoramento, como emissão acústica e vibração, este método de estimativa de desgaste da ferramenta não requer equipamentos de medição caros ou que apresentem configuração complicada (SHI et al., 2018).

Figura 9 – Variação da potência de fuso em função do desgaste.



Fonte: Adaptado de DROUILLET et al. (2016).

Para a medição da potência elétrica, se faz necessária a utilização de um sensor de tensão e um sensor de corrente.

2.4. POTÊNCIA ELÉTRICA

Para o cálculo da potência, os efeitos das variações de tensão e corrente elétrica serão considerados.

A potência elétrica instantânea $p(t)$ absorvida por um elemento é o produto da tensão instantânea $v(t)$ e da corrente instantânea $i(t)$ que passa através dele e é calculada através da equação (1) (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (1)$$

A tensão e a corrente são representadas pelas equações (2) e (3).

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v) \quad (2)$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_i) \quad (3)$$

Onde V_m e I_m são os valores de picos, ω é a frequência angular e θ_v e θ_i são, respectivamente os ângulos de fase da tensão e da corrente. A potência instantânea absorvida pelo circuito monofásico é

$$p(t) = v(t)i(t) = V_m I_m \cos(\omega t + \theta_v) \cos(\omega t + \theta_i) \quad (4)$$

Ao aplicar a identidade trigonométrica, é possível observar a equação a seguir:

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2} [\cos(A - B) + \cos(A + B)] \quad (5)$$

Com isso, a Equação (4) pode ser reescrita da seguinte forma:

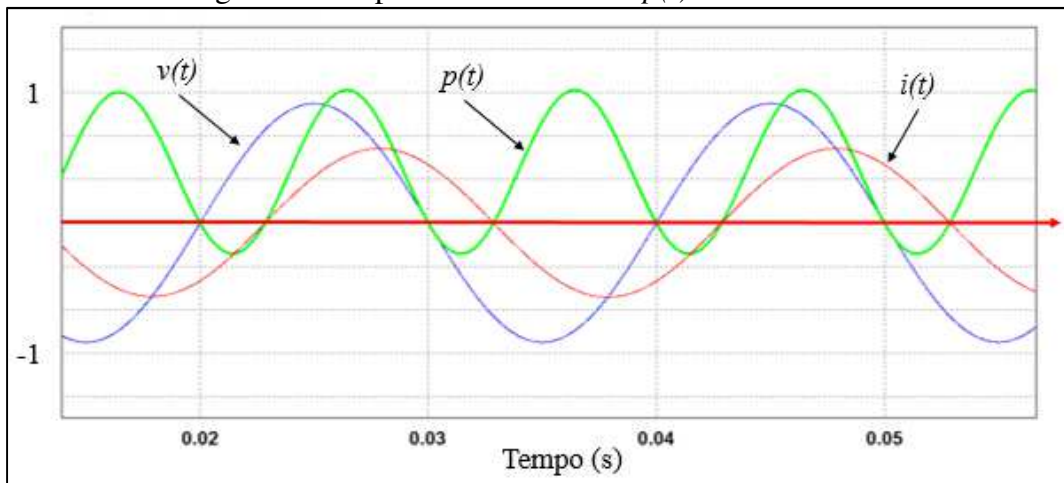
$$p(t) = \frac{1}{2}V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) + \frac{1}{2}V_m I_m \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i) \quad (6)$$

Este fato demonstra que a potência instantânea é composta por duas partes: a primeira é constante ou independente do tempo e seu valor depende da diferença de fase entre a tensão e a corrente; a segunda parte é uma função senoidal cuja frequência é 2ω , ou seja, é o dobro da frequência da tensão e da corrente.

A Figura 10 apresenta a potência descrita na Equação (6), onde é possível perceber que θ_v e θ_i são diferentes.

Conforme pode ser observado na Figura 10, a potência instantânea varia com o tempo, o que a torna difícil de ser medida. Já a potência média é mais conveniente de ser medida. Este valor representa a média da potência instantânea ao longo de um período ou ciclo da tensão e da corrente.

Figura 10 – A potência instantânea $p(t)$ de um circuito.



Fonte: Adaptado de ALEXANDER; SADIKU (2013).

A equação (7) apresenta o cálculo da potência média, como pode ser visto abaixo:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (7)$$

Ao substituir $p(t)$ da equação (6) na equação (7) tem-se:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} V_m I_m \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i) dt$$

$$P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) \frac{1}{T} \int_0^T dt + \frac{1}{2} V_m I_m \frac{1}{T} \int_0^T \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i) dt \quad (8)$$

Ao dividir em duas partes, na primeira parte é resolvida a integral da seguinte forma:

$$\frac{1}{2}V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) \frac{1}{T} \int_0^T dt = \frac{1}{2}V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) \frac{1}{T} T \Big|_0^T = \frac{1}{2}V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i)$$

Nesta primeira parte, tem-se uma constante, sendo que a constante de uma constante é a mesma constante. O integrando da segunda parte da equação (8) é uma senoide, cuja média ao longo do seu período é zero e desaparece da equação, de modo que o valor da potência média fica:

$$P = \frac{1}{2}V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (9)$$

Como $\cos(\theta_v - \theta_i) = \cos(\theta_i - \theta_v)$, o importante é a diferença entre a tensão e a corrente nas fases. Através da equação (9), é possível afirmar que em caso de circuitos onde não há diferença de fase entre tensão e corrente, como é o caso de circuitos puramente resistivos, a potência é absorvida o tempo todo pela carga.

A análise acima é utilizada para cargas monofásicas, no caso de circuitos trifásicos equilibrados, a potência instantânea absorvida pela carga requer a análise no domínio do tempo. Para uma carga conectada em estrela, as tensões de fase são:

$$\begin{aligned} v_{AN} &= \sqrt{2}V_{RMS} \cos \omega t \\ v_{BN} &= \sqrt{2}V_{RMS} \cos(\omega t - 120^\circ) \\ v_{CN} &= \sqrt{2}V_{RMS} \cos(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (10)$$

Onde o fator $\sqrt{2}$ é necessário, pois V_{RMS} é o valor eficaz da tensão de fase, se a carga que o circuito alimenta for $Z_Y = Z < \theta$, as correntes de fase estão atrasadas em relação às suas tensões de fases correspondentes em θ .

$$\begin{aligned} i_a &= \sqrt{2}I_{RMS} \cos(\omega t - \theta) \\ i_b &= \sqrt{2}I_{RMS} \cos(\omega t - \theta - 120^\circ) \\ i_c &= \sqrt{2}I_{RMS} \cos(\omega t - \theta + 120^\circ) \end{aligned} \quad (11)$$

A potência instantânea na carga é a soma das potências instantâneas nas três fases:

$$\begin{aligned} p &= p_a + p_b + p_c = v_{AN}i_a + v_{BN}i_b + v_{CN}i_c \\ p(t) &= 2V_{RMS}I_{RMS}[\cos \omega t \cos(\omega t - \theta) \\ &+ \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\omega t - \theta - 120^\circ) + \cos(\omega t \\ &+ 120^\circ) \cos(\omega t - \theta + 120^\circ)] \end{aligned} \quad (12)$$

Ao aplicar a identidade trigonométrica apresentada na equação (5), obtêm-se:

$$\begin{aligned} p(t) &= V_{RMS}I_{RMS}[3\cos\theta + \cos(\omega t - \theta) \\ &+ \cos(\omega t - \theta - 240^\circ) + \cos(\omega t - \theta + 240^\circ)] \end{aligned}$$

$$p(t) = V_{RMS}I_{RMS}[3\cos\theta + \cos\alpha + \cos\alpha\cos240^\circ + \sin\alpha\sin240^\circ + \cos\alpha\cos240^\circ - \sin\alpha\sin240^\circ] \quad (13)$$

Onde $\alpha = 2\omega t - \theta$

$$P = V_{RMS}I_{RMS} \left[3\cos\theta + \cos\alpha + 2\left(-\frac{1}{2}\right)\cos\alpha \right] = 3V_{RMS}I_{RMS}\cos\theta \quad (14)$$

Onde θ representa o quanto às correntes de fase estão defasadas em relação às suas tensões de fases correspondentes, e V_{RMS} e I_{RMS} são os valores eficazes de tensão e de corrente de fase, respectivamente.

Para uma carga conectada em estrela, $I_L = I_{RMS}$, porém $V_L = \sqrt{3}V_{RMS}$, enquanto para uma carga conectada em triângulo, $I_L = \sqrt{3}I_{RMS}$, porém $V_L = V_{RMS}$. Logo, a equação (14) pode ser aplicada tanto para cargas ligadas em estrela, quanto para aquelas ligadas em triângulo. O valor da potência ativa total é representado pela equação (15).

$$P = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta \quad (15)$$

Portanto, a potência instantânea total em um sistema trifásico equilibrado é constante. Logo, para determinar a potência elétrica que a máquina está consumindo, é preciso medir a tensão e a corrente que está alimentando os motores da mesma.

O sensoriamento da corrente é realizado através de sensores simples e baratos, tais como o de efeito hall e os transformadores de corrente (TC's).

A tensão elétrica ou a diferença de potencial utilizada na alimentação dos motores pode ser facilmente medida com a utilização de voltímetros, transformadores de potencial (TP's) ou qualquer outro equipamento dotado de entradas de tensão.

A instalação dos sensores e eletrônica associada pode ser feita fora da área de usinagem das peças, não afetando a operação da máquina, o que torna uma grande vantagem para este processo. Além disso, o sistema de medição de corrente elétrica tende a ser mais durável e flexível, possui um comportamento adequado no ambiente produtivo (LI et al., 2004; ABBASS; AL-HABAIBEH, 2015) e estas medições podem ser utilizadas para a implementação do controle adaptativo (MANNAN; BROMS, 1989).

De posse dos dados, a potência da máquina, que é determinada pela equação (15), pode ser calculada.

2.5. MOTORES DE INDUÇÃO

De todos os tipos de motores elétricos existentes, este é o mais simples e robusto. É constituído basicamente de dois conjuntos: estator bobinado e conjunto do rotor.

As correntes que circulam no secundário (rotor) são induzidas por correntes que circulam no primário (estator), por isso o nome “motor de indução”. Esta combinação de efeitos eletromagnéticos das correntes do estator e do rotor produz a força que gera o movimento (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

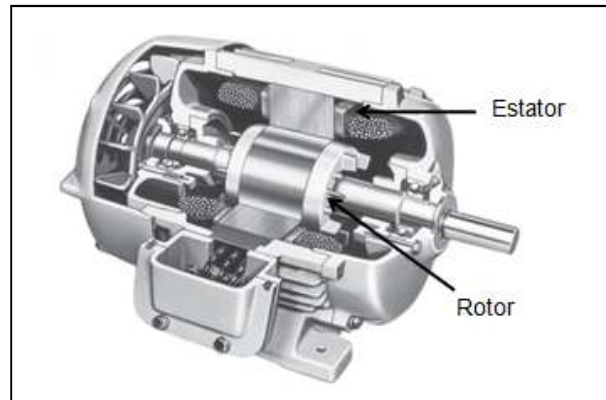
Os três enrolamentos são defasados em 120° no espaço. Então, quando são aplicadas três tensões defasadas de 120° no tempo destes enrolamentos, circulam também três correntes defasadas de 120° . A soma vetorial dos campos magnéticos de cada uma das correntes será um campo magnético de amplitude constante e variável em relação à posição do estator, girando em intervalos regulares de tempo, tendo frequência angular constante e diretamente proporcional à frequência da tensão aplicada. A este campo resultante dá-se o nome de campo girante.

Por sua vez, o rotor do motor assíncrono é composto por barras longitudinais em relação ao seu sentido de giro e curto-circuitadas em suas extremidades, conforme mostrado na Figura 11. Pela Lei de Faraday, quando o rotor parado está imerso no campo girante, surge uma tensão induzida nas barras. Devido ao curto-circuito na extremidade das mesmas, ocorre a circulação de corrente. Segundo a Lei de Lenz, o sentido desta corrente é oposto ao que lhe deu origem, isto é, o campo girante.

Assim, os polos do rotor estão no mesmo sentido dos pólos do estator. Com isso, haverá um torque entre ambos, na tentativa de alinhar os campos de maneira inversa, que polos opostos se atraem e de mesmo sinal se repelem, como o estator é fixo, o rotor acaba girando.

Como a posição do campo girante está sempre mudando, o rotor está sempre mudando a sua posição. A velocidade do rotor aumenta até ocorrer o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o torque mecânico aplicado no eixo.

Figura 11 – Diagrama em corte de um motor de indução típico.



Fonte: Adaptado de CHAPMAN (2013).

Para que haja indução de tensão nas barras do rotor, a velocidade deste nunca será igual à velocidade do campo girante. A relação desta diferença é denominada de escorregamento, dada pela equação (16):

$$N_{ESC} = N_S - N_M \quad (16)$$

Em que N_{ESC} é a velocidade de escorregamento da máquina, N_S é a velocidade dos campos magnéticos e N_M é a velocidade mecânica do eixo do motor.

O escorregamento do motor aumenta de forma aproximadamente linear com o aumento de carga e a velocidade mecânica do rotor diminui de forma aproximadamente linear com a carga (CHAPMAN, 2013).

A velocidade do campo girante, também chamada de velocidade síncrona, é calculada através da equação (17):

$$N_S = \frac{120 f_r}{P_M} [RPM] \quad (17)$$

Onde f_r é a frequência da rede, P_M é o número de polos do motor, RPS representa as rotações por segundo e RPM representa as rotações por minuto.

Então, para que ocorra a variação da velocidade dos motores, uma das maneiras possíveis é alterar a frequência de alimentação do motor, como será apresentado na seção a seguir (CHAPMAN, 2013).

2.6. CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES

Antes da década de 1960, os sistemas mais utilizados para variação de velocidade eram implementados com motores em corrente contínua (CC), conhecidos como os primeiros dispositivos de conversão de energia elétrica para energia mecânica.

Para obtenção de velocidade variável em motores de indução, os primeiros sistemas utilizados foram os sistemas mecânicos, pois eram os de maior simplicidade de construção e baixo custo. Como exemplos desse tipo de sistema, encontram-se o variador com polias cônicas e correia, o variador com polias cônicas e correntes e o variador com discos de fricção.

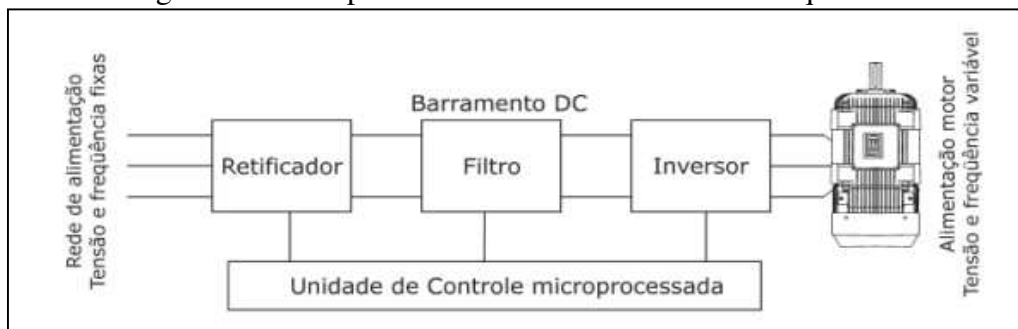
Na década de 1980, com o desenvolvimento de semicondutores de potência com capacidade de comando de condução e bloqueio, bem como excelentes características de desempenho e confiabilidade, foi possível a implementação de sistemas de variação de velocidade eletrônicos. O dispositivo de conversão de energia elétrica para mecânica continuou sendo o motor de indução, mas agora sem a utilização de dispositivos secundários mecânicos, hidráulicos ou eletromagnéticos. Em muitos casos, a eficiência das instalações equipadas com esses novos dispositivos chegou a ser duplicada, especialmente quando comparada com os sistemas antigos (GURGEL, 2009).

Estes equipamentos eletrônicos para variação de velocidade de motores de indução são conhecidos como inversores de frequência. Na aplicação dos inversores de frequência, o motor de indução, ao contrário do que acontece quando ligado diretamente à rede de distribuição de energia elétrica, é alimentado com frequência e tensão variável (CHAPMAN, 2013).

O inversor de frequência converte a tensão alternada da rede, de amplitude e frequência fixas, em uma tensão em corrente contínua (CC). Em seguida, através de circuitos eletrônicos apropriados, a tensão contínua é chaveada e fornece tensão em corrente alternada (CA) ao motor, com amplitude e frequência variáveis (ROSITO, 2017).

Os componentes básicos do inversor de frequência podem ser vistos na Figura 12.

Figura 12 – Componentes básicos do inversor de frequência.



Fonte: Adaptado de FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS (2006).

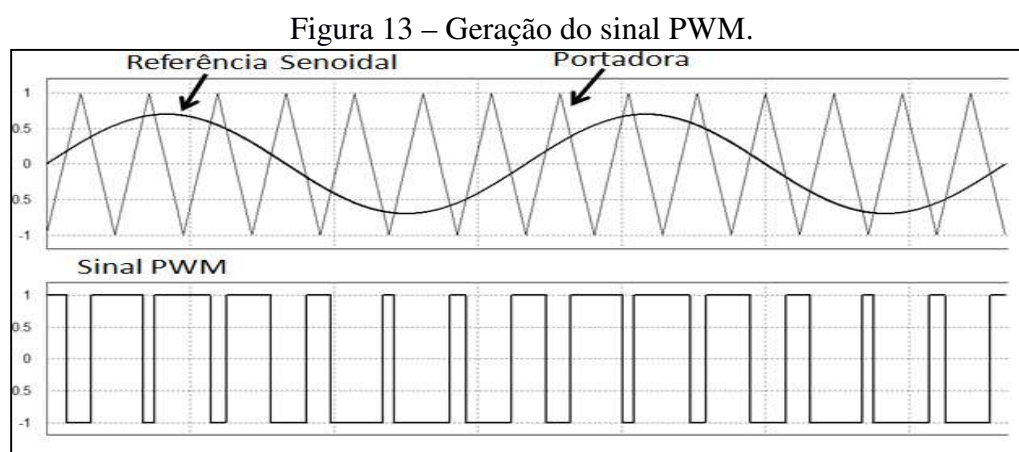
Podem ser utilizadas várias formas para a obtenção da tensão com amplitude e frequência variáveis que serão entregues ao motor de indução. Uma destas formas é a utilizada

pela Modulação por Largura de Pulso, conhecida como PWM (do inglês, “Pulse Width Modulation”).

Este tipo de modulação consiste em comparar uma tensão de referência (que seja a imagem da tensão de saída buscada), com um sinal triangular simétrico, cuja frequência determine a frequência de chaveamento (RASHID, 2015).

A frequência da onda de referência determina a frequência da componente fundamental da tensão de saída, enquanto a frequência da portadora define a frequência de comutação das chaves estáticas. Dessa forma, segundo Rashid (2015), aumentando-se a frequência da onda portadora, aumenta-se a frequência de chaveamento, permitindo o deslocamento das componentes harmônicas para frequências mais elevadas, facilitando sua filtragem. Barbi e Martins (2008) ressaltam que o limite para aumentar a frequência da portadora não é infinito, limitando-se a capacidade de comutação das chaves.

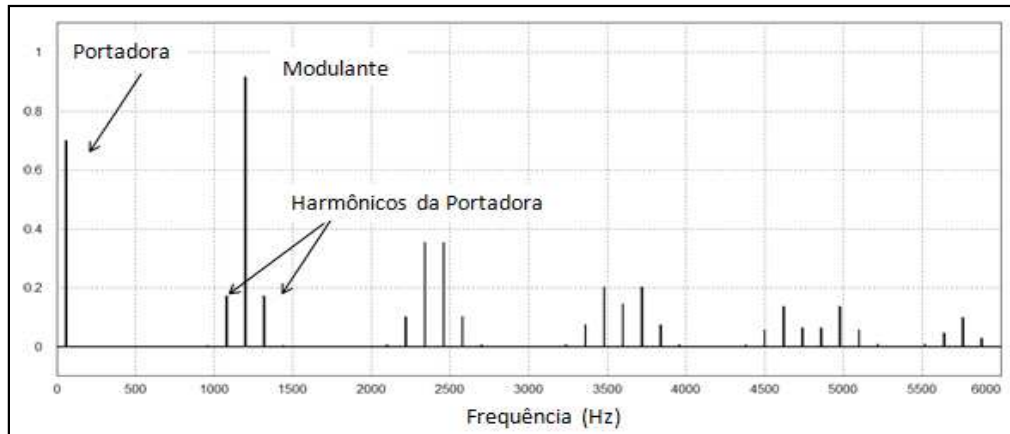
A largura do pulso de saída do modulador varia de acordo com a amplitude relativa da referência, em comparação com a portadora (triangular). A tensão de saída, que é aplicada à carga, é formada por uma sucessão de ondas retangulares de amplitude igual à tensão de alimentação CC e duração variável (RASHID, 2015). A Figura 13 mostra a modulação de uma onda senoidal, produzindo na saída uma tensão com dois níveis, na frequência da onda triangular.



Fonte: Adaptado de RASHID (2015).

A modulação PWM apresenta em sua saída a tensão modulante e produz harmônicos nas frequências múltiplas da portadora e em suas bandas laterais, tal como pode ser visto na Figura 14.

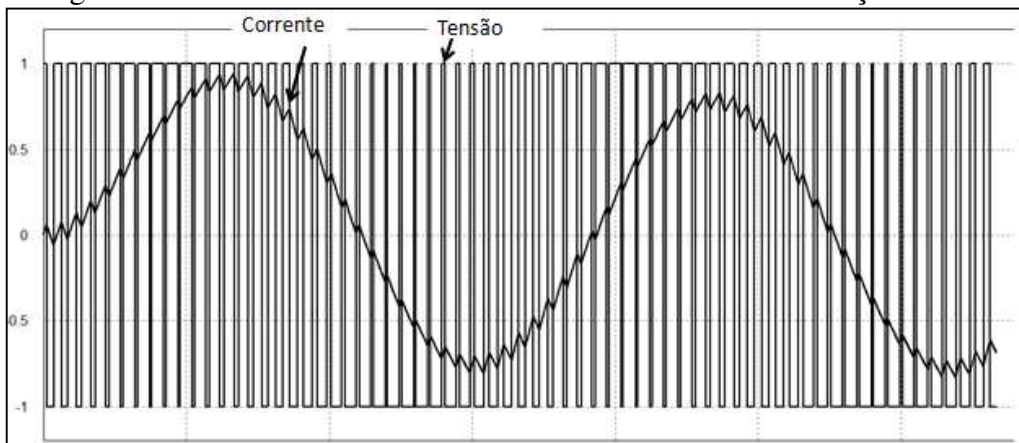
Figura 14 – Espectro do sinal PWM.



Fonte: Adaptado de RASHID (2015).

Esta técnica PWM assegura uma rotação regular e uniforme dos motores, mesmo em velocidades baixas. Devido ao fato de o motor ter uma característica passa-baixa, a corrente se torna praticamente senoidal, conforme demonstra a Figura 15.

Figura 15 – Formas de onda de tensão e de corrente em modulação PWM.



Fonte: Adaptado de RASHID (1999).

2.7. PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

Microcontroladores são circuitos integrados que possuem em seu interior todos os componentes necessários ao seu funcionamento, dependendo unicamente da fonte de alimentação externa. Pode-se dizer que são computadores de um único chip. São utilizados em praticamente todos os dispositivos eletrônicos digitais que nos cercam, por exemplo, centrais de alarme, teclados do computador, monitores, discos rígidos de computador, relógio de pulso, máquinas de lavar, forno de micro-ondas, telefones, rádios, televisores, automóveis, aviões, impressoras, marca-passos, calculadoras, etc. Os microcontroladores também são muito utilizados na indústria, como nos controladores de processos, sensores inteligentes, inversores,

softstarters, interfaces entre homem-máquina, controladores lógicos programáveis, balanças, indicadores digitais, entre outros (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2007).

Devido a sua grande versatilidade e ao seu baixo custo, praticamente qualquer dispositivo eletrônico pode fazer uso dos microcontroladores. Em seu interior, possuem o microprocessador (chamado de CPU), as memórias de dados e o programa, além de periféricos, tais como: circuito de *clock*, temporizadores, contadores, interfaces de entrada e saída, entre outros.

As portas de entrada e saída de propósito geral (GPIO) de um microcontrolador permitem converter dados (1 e 0) em valores físicos e vice-versa. Os pinos (físicos) de uma porta GPIO se relacionam a bits (lógicos), que podem ser acessados em programas que executam no microcontrolador. Os limites elétricos (tensão e correntes máximas e mínimas) das portas de entrada e de saída variam significativamente de dispositivo para dispositivo. Para que esses limites não sejam ultrapassados, são utilizados circuitos de condicionamento de sinal, evitando que ocorra algum dano ao microcontrolador.

A fim de que o sistema de medição possa ser utilizado com diferentes tipos de sensores, com diferentes características dos sinais, o circuito de condicionamento deve prover diferentes valores de ganho e de ajuste de nível CC.

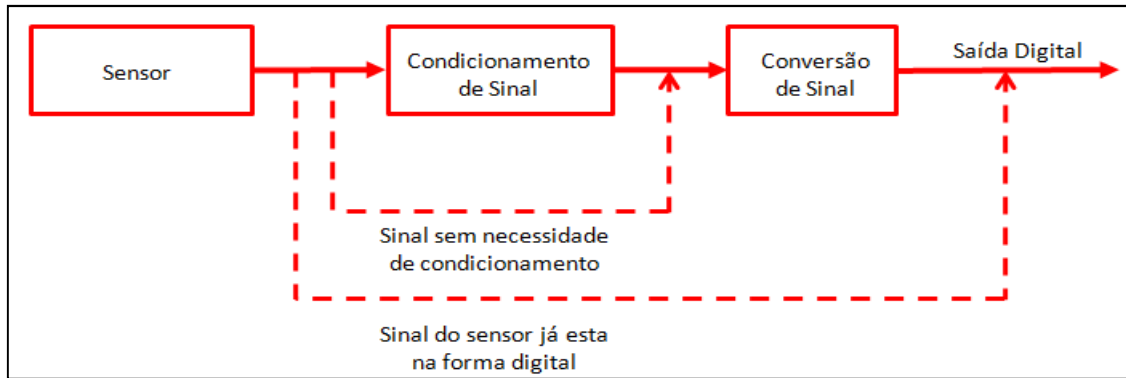
Através do circuito de condicionamento, é possível amplificar e ajustar os sinais com baixa intensidade à faixa de entrada do conversor Analógico Digital (A/D), garantindo que os limites elétricos dos microcontroladores não sejam ultrapassados. E também pode realizar outras funções, tais como: filtragem, isolamento, multiplexação, linearização e excitação, para os sensores que necessitem de uma fonte de energia externa (BELFORT, 2007).

O condicionamento de sinais analógicos proporciona a operação necessária para transformar a saída de um sensor, de forma que possa interagir adequadamente com outros elementos de controle de processo (LATHI, 2007).

A Figura 16 ilustra os elementos básicos de um sistema genérico de aquisição de dados.

O tipo mais comum de condicionamento é a amplificação. Os sinais de baixa intensidade, como os dos termopares, por exemplo, devem se amplificar para aumentar a resolução e reduzir o ruído. Para uma maior precisão, o sinal deve ser amplificado, de forma que a tensão máxima do sinal a ser condicionado coincida com a tensão máxima de entrada do conversor A/D.

Figura 16 – Condicionamento do sinal



Fonte: Adaptado de LATHI (2007).

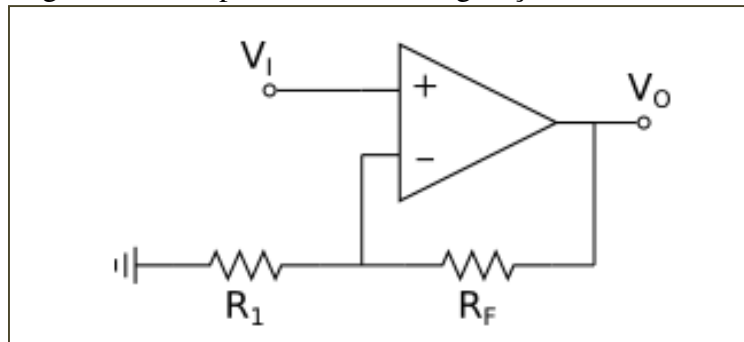
Existem muitas configurações possíveis para ligar um amplificador operacional, uma delas é a não inversora, onde o sinal de saída não apresenta defasagem entre o sinal de saída e o de entrada. O amplificador é apresentado na Figura 17.

A relação entre o sinal de entrada e de saída de um amplificador não inversor é determinado pela Equação (18).

$$A_V = 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad (18)$$

Onde A_V é o ganho de tensão e R_F é o resistor de realimentação do circuito.

Figura 17 – Amplificador na configuração não inversora.



Fonte: Adaptado de PERTENCE JÚNIOR (2003).

Alguns conversores A/D só trabalham com valores de tensão positivos. Como na medição de tensão e correntes senoidais há valores negativos, a implantação de um nível de tensão CC é necessária, de forma que todo o sinal amostrado se torne positivo. Normalmente, o valor de tensão contínua aplicado é a metade do valor da tensão de entrada do conversor A/D.

Para utilizar o máximo dos valores de entrada do conversor A/D e não precisar utilizar uma fonte simétrica na placa de aquisição de dados, é utilizado um divisor resistivo, de forma que a tensão que chegue ao conversor seja sempre positiva. Isso é feito através de um nível CC

aplicado ao sinal senoidal que está sendo medido. Preferencialmente, este sinal deverá ser a metade do valor medido.

A tensão de saída de um circuito divisor de tensão, como o mostrado na Figura 18, é determinada pela equação (19):

$$V_x = \frac{R_x}{R_{Eq}} V_{in} \quad (19)$$

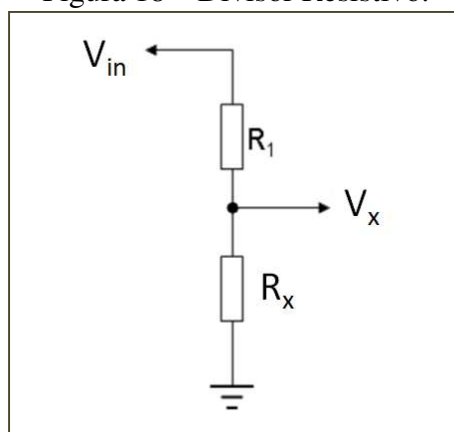
Onde V_x é a tensão através do resistor R_x , V_{in} é a tensão aplicada através dos elementos em série e R_{Eq} é a resistência equivalente do circuito.

Muitas vezes, os sinais vindos de sensores e transdutores são de baixa amplitude. Por isso, é necessário amplificar este sinal. Uma das formas de fazer isso ocorre através do uso de amplificadores operacionais.

O amplificador operacional é um componente eletrônico capaz de amplificar sinais e realizar operações com eles, que podem ser somas, subtrações, multiplicações e divisões, sendo amplamente utilizado em circuitos eletrônicos para diversas operações lógicas, sendo uma grande base para os sistemas digitais.

Um amplificador operacional ideal tem as seguintes características: impedância de entrada infinita; ganho de tensão em malha aberta infinito; impedância de saída nula; sem fluxo de corrente nas entradas; imune às interferências externas (como a temperatura), a saída depende apenas do sinal de entrada (PERTENCE JÚNIOR, 2003).

Figura 18 – Divisor Resistivo.



Fonte: Adaptado BOYLESTAD (2012).

Para extrair o conteúdo de informação fundamental de um sinal, é necessário um dispositivo que selecione as frequências de interesse que compõem o sinal. Este dispositivo é denominado de filtro, cuja resposta em frequência é caracterizada por uma faixa de passagem

e por uma faixa de rejeição, as quais estão separadas por uma faixa de transição ou faixa de guarda.

Vários tipos de filtros podem ser utilizados para modificar a banda do sinal de entrada. Um filtro ideal para esta finalidade seria aquele que não apresentasse nenhuma atenuação na banda de passagem, tivesse uma largura zero na região de transição e rejeitasse totalmente as componentes de frequência na banda de atenuação. Na prática, isso é aproximado por um filtro que introduz alguma atenuação na banda de passagem, tem uma largura finita na região de transição e passa alguma componente do sinal na banda de atenuação. Ele ainda pode introduzir algum tipo de distorção de fase ou de amplitude.

Ainda é necessário remover do sinal de entrada as componentes de frequência acima da razão de Nyquist, isso é feito através de filtros *anti-aliasing*, que podem ou não ser implementados junto com o filtro anterior.

Tal como o filtro de ruído, o filtro *anti-aliasing* é também um filtro passa-baixa, mas ele requer uma frequência de corte muito alta. Em geral, remove por completo todas as frequências do sinal superiores à largura de banda de entrada do equipamento. Se esses sinais não forem removidos, eles surgirão erroneamente com os sinais da largura de banda de entrada do equipamento. Os equipamentos projetados especificamente para medição de sinais CA incluem filtros *anti-aliasing*.

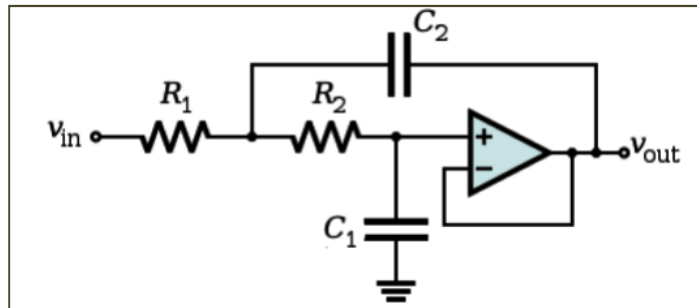
A escolha da ordem e do tipo de filtro deve ser feita de modo a se obter as especificações desejadas do sistema. Dentre os filtros adequados para realizar a função de filtro *anti-aliasing*, destacam-se os filtros Butterworth, Chebyshev, Cauer, e Bessel-Thomson (LATHI, 2007).

A topologia Butterworth, que possui uma resposta em frequência muito plana (não possui *ripple* ou ondulações) na banda passante, e se aproxima do zero na banda rejeitada, também apresenta uma queda na sua magnitude, como uma função linear em relação à frequência (LATHI, 2007).

O Butterworth é o único filtro que mantém o mesmo formato para ordens mais elevadas (com uma inclinação mais íngreme na banda atenuada). Já outras variedades de filtros, por exemplo, Bessel, Chebyshev, elíptico, possuem formatos diferentes para ordens mais elevadas.

O filtro Butterworth pode ser realizado usando componentes passivos e componentes ativos, como resistores, capacitores e amplificadores operacionais com a topologia Sallen-Key. A Figura 19 apresenta a topologia clássica do filtro Butterworth de segunda ordem.

Figura 19 – Filtro Butterworth de segunda ordem.



Fonte: Adaptado de LATHI (2007).

Onde V_{in} é o sinal de tensão de entrada de natureza analógica e V_{out} é a tensão de saída do amplificador operacional.

O filtro passa-baixa de segunda ordem possui duas redes RC, R_1-C_1 e R_2-C_2 , que geram suas propriedades de resposta de frequência.

A frequência de corte f_c do filtro é dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} \quad (20)$$

O fator de qualidade Q determina o formato da resposta do filtro e é dado por:

$$Q = \frac{1}{2\pi f_c C_1 (R_1 + R_2)} \quad (21)$$

Para um filtro do tipo Butterworth, o máximo fator de qualidade será de 0,707.

Os critérios de projeto seguem uma ordem onde se seleciona o fator de qualidade e a frequência de corte, fixa-se o valor de R_1 e R_2 (determinam a impedância de entrada do filtro na faixa de bloqueio) e, por fim, calculam-se os capacitores.

O aumento da taxa de amostragem é uma das formas de evitar erros, por causa da *aliasing*. Entretanto, há um limite máximo de frequência imposto pelo conversor A/D ou pelo *clock* do processador digital que manuseia os dados digitais.

O conversor A/D é responsável por traduzir uma grandeza elétrica analógica numa representação numérica adequada para o tratamento digital. Em um sistema de medição, é muito comum que alguns tratamentos sejam feitos no sinal analógico, como a amplificação. Contudo, usualmente são necessários processamentos adicionais do sinal que vão desde a simples obtenção da medição da intensidade do sinal até a execução de algumas manipulações algébricas sobre estes, ou mesmo quando há necessidade de armazenamento ou de transmissão.

É comum que essa representação digital seja um inteiro sem sinal, com um número b de bits que varia de acordo com o dispositivo e as suas configurações. Assim, um conversor A/D é capaz de representar 2^b valores de tensões diferentes (BELFORT, 2007).

Os valores de tensão aceitos pelo conversor A/D devem estar compreendidos entre dois valores de referência (0 a +V ou -V e +V). As tensões entre os valores de referência são divididas em 2^b faixas, sendo cada uma associada a um possível número na saída, em um processo chamado de quantização, por exemplo, um conversor de 12 bits possui 4096 saídas possíveis. Entradas fora dos limites de referência levam à saturação do processo de conversão, isso significa que o aumento do número de bits do conversor A/D leva à redução do erro de quantização, já que diminui a faixa de valores de tensão associados a cada número.

O conversor A/D demora certo tempo para realizar o processo de conversão. Este fato acontece porque o processo de conversão A/D envolve executar um algoritmo de aproximação, o que toma um intervalo de tempo que varia de acordo com o dispositivo de conversão e suas configurações. Portanto, o processo de conversão só pode ser realizado certo número de vezes por segundo. Esse número é chamado de frequência de amostragem (f_s).

Segundo o teorema de amostragem de Nyquist, a razão de amostragem ou frequência de amostragem de seu sistema precisa ser escolhida com, no mínimo, duas vezes a máxima frequência do sinal de entrada (após o filtro *anti-aliasing*). Na prática, f_s deve ser normalmente duas vezes a frequência na qual o sinal cruza o ruído de fundo do sistema. Portanto, o tempo de conversão do conversor A/D terá que ser menor que $1/f_s$ a fim de permitir que o circuito tenha tempo para adquirir o sinal com a precisão desejada.

Dentro dos microcontroladores é possível encontrar valores que representam as grandezas medidas, por exemplo, tensão e corrente elétrica. Através da utilização destes valores, os algoritmos serão implementados.

2.8. REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS

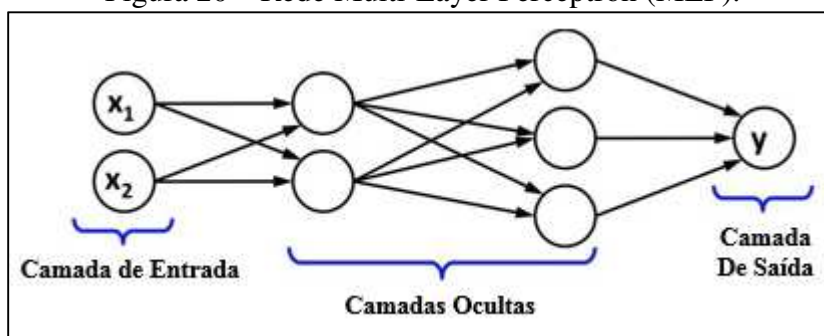
O controle da substituição da ferramenta requer o reconhecimento do estado de desgaste da ferramenta associado ao parâmetro de corte, incluindo a velocidade do fuso e a velocidade de avanço, que podem mudar de acordo com as estratégias de controle. Por isso, os métodos utilizados requerem um método eficaz para obter as condições de usinagem em tempo real e, através de um equacionamento matemático, determinar o desgaste da ferramenta e efetuar ou não a substituição da mesma (LI; TSO, 1999). Khajavi, Nasernia e Rostaghi (2016) utilizam o modelo de redes neurais artificiais, porque este modelo é capaz de resolver os problemas das não linearidades presentes no processo de fresamento.

As redes neurais artificiais são baseadas na mesma função que um neurônio no cérebro. A Figura 20 representa uma rede Multi-Layer Perceptron (MLP), que é uma das redes mais

utilizadas. Ela consiste em uma camada de neurônios de entrada, uma ou mais camadas ocultas e uma camada de saída de neurônios (HAYKIN, 1999).

O treinamento da rede neural consiste no ajuste dos pesos sinápticos (w_1, \dots, w_5), de forma que a resposta obtida pela rede se aproxime do padrão de resposta desejado. Durante o treinamento supervisionado, os dados de entrada e de destino são divididos aleatoriamente em conjuntos de dados de treinamento, teste e validação.

Figura 20 – Rede Multi-Layer Perceptron (MLP).



Fonte: Adaptado de HAYKIN (1999).

A rede é treinada com a utilização do conjunto de dados de treinamento, cujo objetivo é calcular o gradiente de erros e atualizar os pesos e as tendências. O conjunto de validação é usado para interromper o treinamento antecipadamente, se o desempenho da rede nos vetores de validação não melhorar ou permanecer o mesmo para as épocas (repetições), o que sinaliza que a generalização atingiu o pico. O conjunto de dados de teste não tem efeito no treinamento da rede neural e é usado para determinar a eficiência da rede neural após o treinamento.

As redes neurais artificiais podem ser usadas para resolver problemas de ajuste de curvas, detectar implicitamente as relações não lineares complexas entre variáveis dependentes e independentes e identificar um relacionamento entre os dados de entrada e saída.

Além disso, as RNAs se adaptam as mudanças dos parâmetros de entrada, enquanto os modelos estatísticos são menos flexíveis. Depois que pelo menos um conjunto de dados é treinado, as RNAs devem ser capazes de prever o comportamento futuro da saída (CORNE et al., 2017).

As RNAs trabalham com base na experiência desses dados. Durante a usinagem, os modelos estatísticos parecem não ser tão promissores, porque a ferramenta pode falhar a qualquer momento sob a mesma condição de corte. Então, a previsão instantânea ou o conhecimento da tendência baseada no ambiente de usinagem não é possível ao usar um modelo empírico ou estatístico (DROUILLET et al., 2016).

Patra, Pal e Bhattacharyya (2007) fazem uma análise dos efeitos das condições de corte e desgaste da ferramenta na corrente do motor do fuso. O desgaste da ferramenta foi previsto com sucesso através de uma RNA *feed-forward* multicamadas e com um algoritmo de aprendizado *BackPropagation*. Para o treinamento, o valor eficaz da corrente do motor de fuso e as condições de corte (diâmetro da broca, taxa de avanço e velocidade do fuso) foram utilizados como parâmetros de entrada.

O modelo da RNA acima também foi utilizado pelo estudo desenvolvido por Shankar, Mohanraj e Rajasekar (2019), que foi capaz de avaliar o desgaste do flanco da ferramenta de forma rápida e precisa, com a utilização dos sinais de emissão acústica e forças de corte.

Como alternativa para medir o desgaste da ferramenta com o uso de uma rede neural, podem ser usadas como parâmetros de entrada, as características de vibração, o tempo de usinagem, o valor do torque médio e da força de corte, como entrada, e desgaste da ferramenta, como saída da rede neural projetada. Ghosh et al. (2007) combinaram dados coletados de múltiplos sensores de força de corte, vibração, som e corrente de fuso, para monitorar o desgaste da ferramenta no processo de usinagem, usando redes neurais.

No trabalho de Khajavi, Nasernia e Rostaghi (2016) foram analisados os efeitos dos parâmetros de corte, como desgaste da ferramenta, velocidade de avanço e profundidade de corte na variação de corrente do motor. O desgaste da ferramenta foi diretamente correlacionado com o valor eficaz da corrente do motor (I_{RMS}). O valor eficaz da corrente do motor, a velocidade de avanço, a profundidade de corte e a velocidade do fuso foram escolhidas como entradas, já o desgaste de flanco, como saída da RNA. Para o treinamento da rede neural, foi realizada a usinagem, a fim de medir o desgaste da ferramenta em diferentes condições de corte.

Com a utilização dos sinais de emissão acústica e da potência elétrica para treinamento de uma RNA, foram conseguidos 91% de resultados satisfatórios no processo de fresamento (DA SILVA; DA SILVA; HASSUI, 2016).

3. METODOLOGIA

A seguir, serão detalhados o planejamento experimental, os materiais e os equipamentos que foram utilizados para a realização dos experimentos.

3.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Os testes realizados no trabalho tiveram como objetivo o monitoramento do desgaste de flanco (V_B) de ferramentas durante o processo de fresamento de topo através de técnicas da medição da potência elétrica consumida pelo motor de fuso e aplicação de uma RNA.

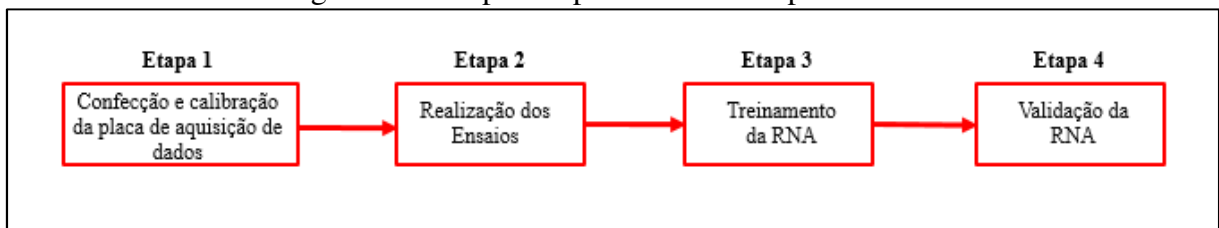
A parte experimental do trabalho consistiu na usinagem com dois tipos diferentes de ferramentas, em que foram medidos o desgaste da ferramenta e a potência elétrica consumida pela máquina durante o processo. Os sinais coletados foram utilizados para “alimentar” uma rede neural, que foi treinada e validada.

Diferentemente de Aniac et. al (2018) e Silva (2010) que utilizam apenas uma condição de corte durante todo o processo, os ensaios foram realizados com velocidade de corte e avanço por gume variáveis para treinamento da RNA.

Isso possibilita que depois de treinada a RNA, possa ser utilizada qualquer condição de corte durante o processo de fresamento, devendo retomar as condições de corte utilizadas para treinar a RNA apenas quando se deseja estimar o desgaste da ferramenta.

A Figura 21 apresenta as etapas em que foram desenvolvidas durante os ensaios.

Figura 21 – Etapas do procedimento experimental.



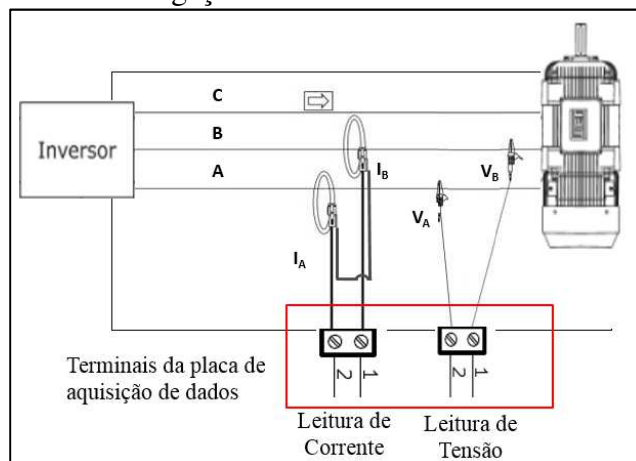
Fonte: O Autor (2020).

3.2. AQUISIÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA

Na primeira etapa foi construída e calibrada a placa de aquisição de dados para aquisição da potência elétrica.

A potência elétrica do motor foi medida através de um circuito de aquisição de dados que será ligado aos cabos de alimentação do motor de fuso da máquina, conforme mostrado na Figura 22. Estes dados medidos serão tratados e enviados ao computador.

Figura 22 – Esquemático da ligação do sensor de corrente e tensão no motor de fuso.

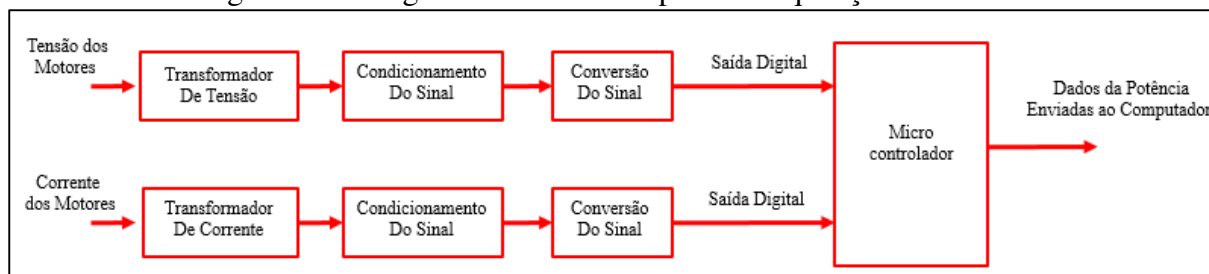


Fonte: O Autor (2020).

As ponteiros de tensão medem o valor da tensão de linha. Os sensores de correntes estão lendo as correntes de fase, mas, devido a sua posição de instalação, o valor que é enviado a placa de aquisição é a corrente de linha que alimenta o motor, assim sendo possível calcular a corrente elétrica através da equação (15). São utilizadas as tensões e correntes de linha pois o inversor não fornece tensão de fase (sem neutro). É possível efetuar essa medição, com a utilização de dois sensores de corrente e tensão, por que se considera o motor equilibrado.

A Figura 23 apresenta o diagrama de blocos da placa de aquisição de dados.

Figura 23 – Diagrama de blocos da placa de aquisição de dados.



Fonte: O Autor (2020).

Este circuito converte os sinais de tensão e corrente medidos pelos TP's e TC's, em um sinal analógico em níveis que permitem a leitura pelo microcontrolador. A seguir, uma breve explicação do funcionamento da placa.

A placa de aquisição de dados foi pensada para ser utilizada como um equipamento multipropósito com a capacidade de medir tensões e correntes elétricas em diferentes escalas, bastando alterar os ganhos dos amplificadores e a tensão de *offset* para fazer isso. Apesar de já existirem no mercado placas de aquisição de dados para sinais de tensão e corrente elétrica, optou-se por desenvolver o sistema de aquisição por tratar-se de uma solução mais barata e possível de ser replicada.

O esquemático completo da placa de aquisição é apresentado no APÊNDICE A.

Os sinais de tensão e corrente são enviados ao microcontrolador, que irá efetuar as operações e determinar a potência que está sendo consumida pelo motor da máquina.

Os sinais medidos são enviados via Bluetooth para um aplicativo e, depois encaminhados ao computador. Essa maneira de comunicação foi utilizada, pois existiriam problemas de perda de dados, se eles fossem gravados em um cartão de memória ou enviados via comunicação USB ao computador. Depois de recebidos pelo computador, os dados são tratados, e com o auxílio do Matlab[®] são utilizados para criação da RNA.

3.3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

A segunda etapa foi à realização dos ensaios, onde as velocidades de corte foram definidas como sendo de 60 m/min, 75 m/min e 90 m/min para a ferramenta de 6 mm e de 105,6 m/min 132 m/min e 158,4 m/min para os insertos (as ferramentas serão apresentadas na seção 3.3.1). Os avanços por gume, para a ferramenta de 6 mm foram de 0,2 mm/gume, 0,4 mm/gume e 0,6 mm/gume e para o inserto foram de 0,6 mm/gume, 0,9 mm/gume e 0,12 mm/gume.

As condições de corte foram determinadas a partir da recomendação dos fabricantes das ferramentas. Essa adequação permitiu que as frequências das tensões e correntes elétricas que alimentavam o motor do fuso, para as diferentes velocidades ficassem abaixo da frequência de corte do filtro da placa de aquisição de dados, possibilitando uma boa taxa de amostragem para aquisição de dados do microcontrolador.

A profundidade do corte (a_p) e a profundidade lateral (a_e) foram mantidas de maneira constante durante todo o processo. Para a ferramenta de 6 mm o a_p será de 0,4 mm e o a_e igual a 1,00 mm, e para o inserto a profundidade de corte é de 0,5 mm e profundidade lateral de 10,5 mm.

Os parâmetros de corte foram variados aproximadamente a cada cinco segundos, durante todo o ensaio, através da alteração dos valores do avanço por gume (f_z) e da velocidade

de corte (v_c). O ensaio foi conduzido até que uma das condições de fim de vida seja alcançada, a saber: desgaste de flanco máximo (V_{Bmax}) de 0,2 mm ou eventual lascamento da ferramenta.

As combinações entre as três velocidades de corte e os três avanços por gume irão gerar um total de nove condições. A Tabela 1 apresenta as condições de corte utilizadas para a ferramenta de 6 mm.

Tabela 1 – Condições de corte utilizadas na ferramenta de 6 mm para aquisição de dados.

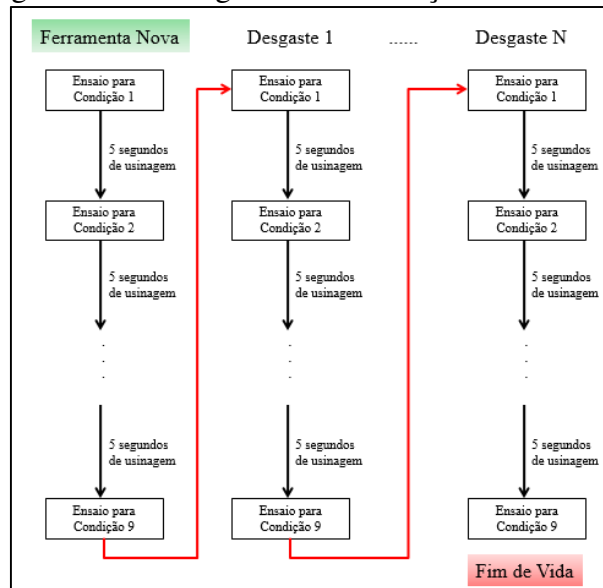
Ensaio	Condição	V_c (m/min)	F_z (mm/gume)	A_p (mm)	A_e (mm)	Potência (W)	Desgaste (mm)
1	1	60	0,2	0,4	1,0		Desgaste 1
1	2	60	0,4	0,4	1,0		Desgaste 1
1	3	60	0,6	0,4	1,0		Desgaste 1
1	4	75	0,2	0,4	1,0		Desgaste 1
1	5	75	0,4	0,4	1,0		Desgaste 1
1	6	75	0,6	0,4	1,0		Desgaste 1
1	7	90	0,2	0,4	1,0		Desgaste 1
1	8	90	0,4	0,4	1,0		Desgaste 1
1	9	90	0,6	0,4	1,0		Desgaste 1
2	1	60	0,2	0,4	1,0		Desgaste 2
2	:						Desgaste 2
2	9	90	0,6	0,4	1,0		Desgaste 2
:							
:							
N (fim da vida útil)	9	90	0,6	0,4	1,0		Desgaste N

Fonte: O Autor (2020).

A potência do motor será medida para cada uma dessas combinações.

A Figura 24 apresenta o fluxograma de realização dos ensaios, sendo que para cada nível de desgaste serão nove condições diferentes.

Figura 24 – Fluxograma de realização dos ensaios.

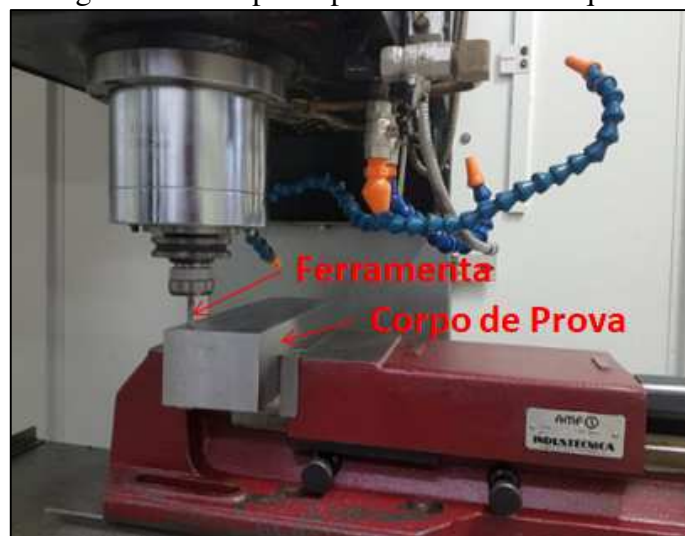


Fonte: O Autor (2020).

A quantidade de linhas da tabela será determinada pelo número de ensaios que serão realizados. Estes irão acontecer até que os critérios de fim de vida da ferramenta sejam alcançados.

A montagem do corpo de prova para os ensaios na máquina pode ser observada na Figura 25.

Figura 25 – Corpo de prova fixado na máquina.



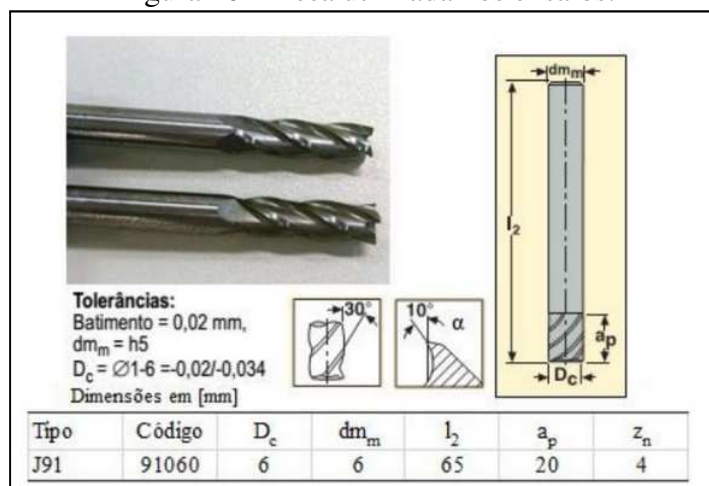
Fonte: O Autor (2020).

Como material, optou-se pelo aço AISI P20, de dureza média 38 HRC, muito utilizado nas indústrias de moldes e matrizes de injeção de plásticos. Os corpos de prova têm dimensões de 252 mm x 80 mm x 60 mm, com faces retificadas, para garantir um melhor posicionamento e planicidade na fixação na máquina.

3.3.1. Ferramentas

A primeira ferramenta utilizada foi de metal-duro, apresentam quatro gumes e diâmetro de 6mm. Para realizar o teste, foram utilizadas fresas não revestidas, sem raio de quina e com geometria de afiação original. As fresas de código 91060, da linha Jabro, foram fornecidas pela empresa Seco Tools. Na Figura 26, são mostrados os detalhes da ferramenta.

Figura 26– Fresa utilizada nos ensaios.

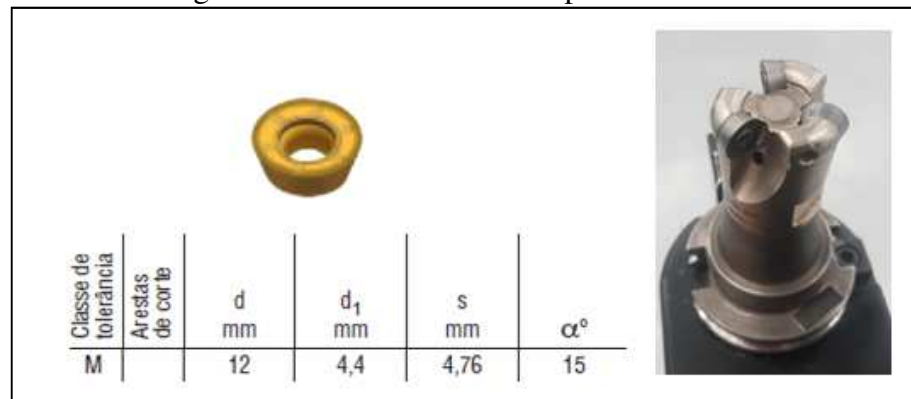


Fonte: Ost (2016).

O segundo tipo de ferramenta utilizado foi um cabeçote de 35 mm de diâmetro, com três insertos⁵ para fresamento. Para o experimento foi utilizado o modelo RDMT 1204M0 – D 57, da Walter Select, que é utilizado em todos os tipos de aço e aço fundido, com exceção de aço com estrutura austenítica, ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular, ferro fundido temperado e ferro fundido vermicular. O inserto e o cabeçote que foram utilizados são expostos na Figura 27.

⁵ Insertos são as ferramentas mais largamente utilizadas em tornos, fresas, centros de usinagem para uma retirada grosseira de material ou acabamento, uma vez que ao ocorrer o desgaste é possível a substituição do inserto sem a necessidade da troca do cabeçote ou porta-ferramentas. Os insertos são fabricados de diversos materiais e revestimentos, porém o mais utilizado é o inserto de metal duro que atendem à serviços de altíssima velocidade e que resultará no deslocamento de cavaco com menos desgaste e impacto possível.

Figura 27 – Insertos utilizados para os ensaios.



Fonte: O Autor (2020).

3.3.2. Equipamentos

Os ensaios de usinagem ocorreram no bloco D da Universidade de Caxias do Sul (UCS), onde se encontra um centro de usinagem LG-500, da marca Hartford, com potência de 10 kW e rotação máxima de 10.000 rpm, conforme pode ser observado na Figura 28.

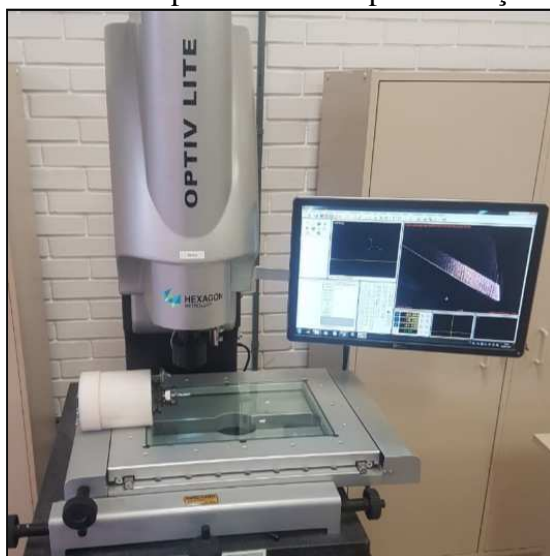
Figura 28 – Fresadora utilizada para a realização dos ensaios.



Fonte: O Autor (2020).

O desgaste da ferramenta foi monitorado e medido através de projetor de perfil modelo optiv lite OLM 3020, utilizando uma ampliação de 80,8 vezes. Os desgastes foram monitorados em todos os gumes e insertos das ferramentas. A Figura 29 mostra o medidor utilizado para verificação do desgaste de um gume.

Figura 29 – Medidor de perfil utilizado para medição do desgaste.

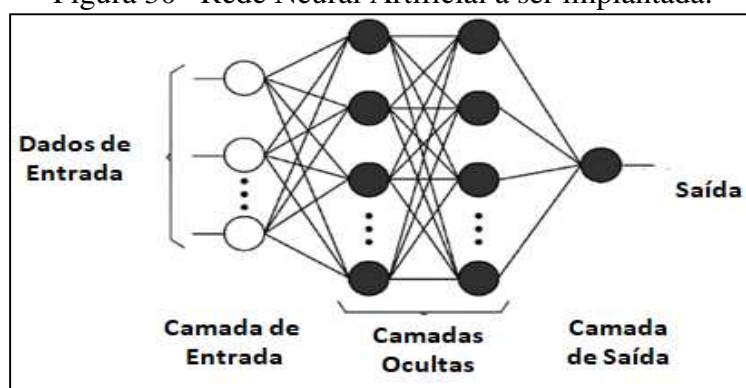


Fonte: O Autor (2020).

3.4. REDE NEURAL ARTIFICIAL

A RNA foi estruturada com apenas um neurônio *Feed-Forward*, com treinamento através do algoritmo de *BackPropagation Levenberg-Marquardt*, com 9 entradas, onde cada entrada representa a potência consumida para cada uma das condições. A saída do neurônio é o desgaste da ferramenta, conforme mostrado na Figura 30.

Figura 30– Rede Neural Artificial a ser implantada.



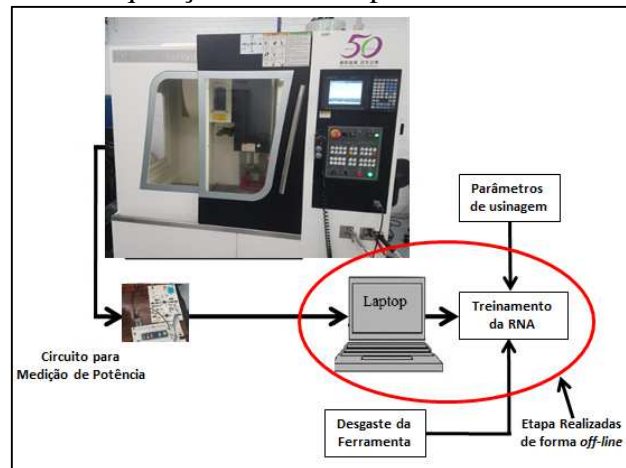
Fonte: O Autor (2020).

3.4.1. Treinamento e validação da RNA

Após realizar a aquisição dos dados de potência do motor e dos parâmetros de usinagem da máquina, foi feito o treinamento da RNA de forma *off-line*, ou seja, ao final dos

testes, os dados serão processados. Depois de treinada a rede, o Matlab® deve gerar uma função matemática que será utilizada para determinar o desgaste da ferramenta. A Figura 31 apresenta como foi realizada a aquisição e o tratamento dos dados da potência elétrica e do treinamento da RNA.

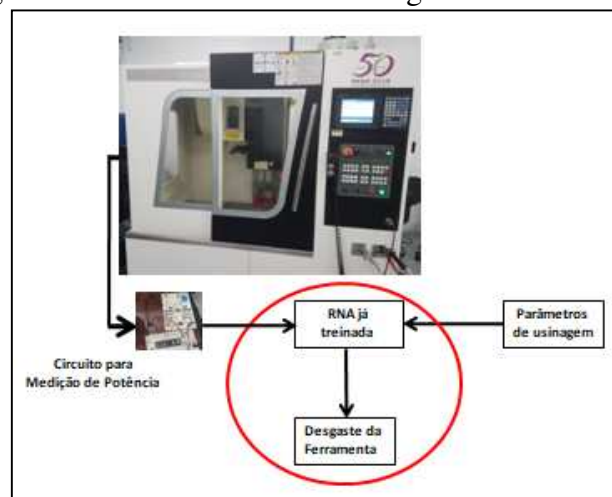
Figura 31 – Aquisição dos dados para treinamento da RNA.



Fonte: O Autor (2020).

A Figura 32 apresenta como será realizada a validação da RNA através de uma segunda ferramenta.

Figura 32 – Monitoramento do desgaste da Ferramenta.



Fonte: O Autor (2020).

Depois de treinada a rede neural artificial, foi feita a validação da mesma, através do ensaio de uma nova ferramenta, onde, baseado na potência elétrica foi estimado o desgaste da ferramenta. Para isso 12 RNAs diferentes foram treinadas com os dados experimentais da ferramenta 1.

Para cada uma dessas redes, os resultados experimentais de potência da ferramenta 2 foram inseridos e estimado o desgaste da ferramenta. Foram utilizadas RNAs que atendem os seguintes critérios: a precisão entre o desgaste experimental medido e o estimado pela RNA for superior a 95% e a diferença entre os dois maiores valores de desgaste for inferior a 5%.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para a realização dos ensaios, foi necessário o desenvolvimento da placa de aquisição de dados, a fim de realizar a aquisição dos dados para treinamento da RNA e validação da mesma.

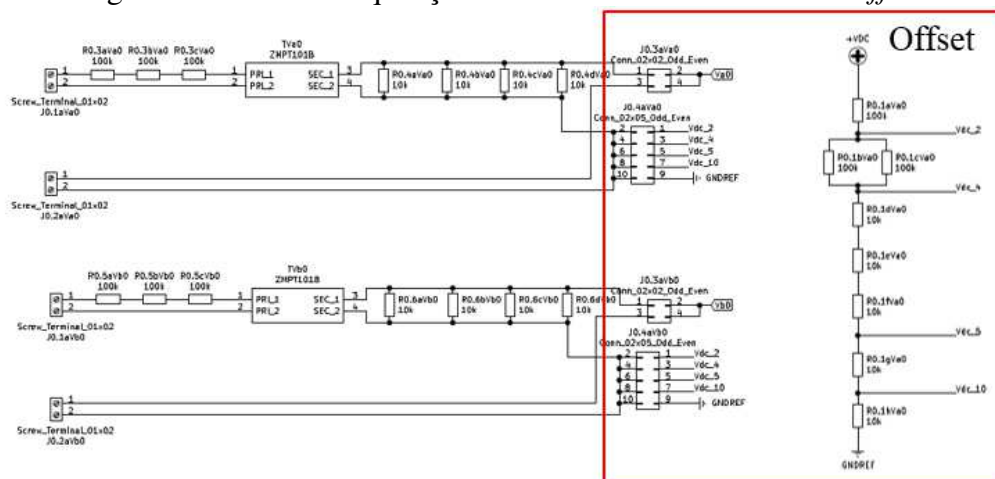
4.1. CONFECÇÃO E CALIBRAÇÃO DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Antes de serem iniciados os ensaios foi realizada a montagem e a calibração da placa de aquisição de dados.

Para aquisição dos sinais de tensão, foi utilizado um Transformador de Potencial (TP) ZMPT101B, que é um transformador de tensão do tipo corrente, possui uma faixa de operação entre 0-1000 V, a corrente máxima de entrada e saída é de 2 mA, precisão de leitura: $\pm 1\%$ e isolamento de 4000 V. As especificações e equações para determinação dos resistores de entrada e saída estão no ANEXO A.

A fim de que não ocorra sobrecorrente na entrada do TP são utilizados três resistores de 100 k Ω em série, totalizando 300 k Ω , conforme demonstrado na Figura 33. De modo a garantir que a tensão de saída não exceda os limites do conversor A/D, é utilizada uma configuração de quatro resistores de 10 k Ω , totalizando uma resistência de saída equivalente no valor de 2,5 k Ω .

Figura 33 – Placa de aquisição de dados: entrada de dados e *offset*.



Fonte: O Autor (2020).

A realização das leituras de correntes se deu através de um sensor de corrente SCT-013 30 A 1 V, que possibilita uma medição de maneira não invasiva. Possui capacidade de medir

corrente até 30 A, com uma tensão de saída de 1 V. O sensor apresenta uma não linearidade $\pm 3\%$ (10% - 120% da corrente nominal de entrada), conforme apresentado no ANEXO B.

No primeiro estágio, após o sinal passar pelo TP e pelo sensor de corrente, é adicionado um valor de *offset*.

Devido ao microcontrolador utilizado (STM32F103COT6), a tensão na entrada analógica deve ser de 0 a 3,3V. Por isso, foi aplicado o *offset* do sinal que vem dos transdutores e inserido um ganho, quando necessário, para um melhor aproveitamento da resolução do conversor A/D. O *offset* é aplicado ao amplificador operacional, a fim de que não seja necessário conversor para produzir negativa.

O valor pico a pico é responsável por determinar o ganho a ser utilizado. A partir disso, se seleciona o *offset* apropriado, de forma que o valor médio da tensão que chega ao microcontrolador seja metade da tensão do conversor A/D. Este valor é apresentado na equação (22).

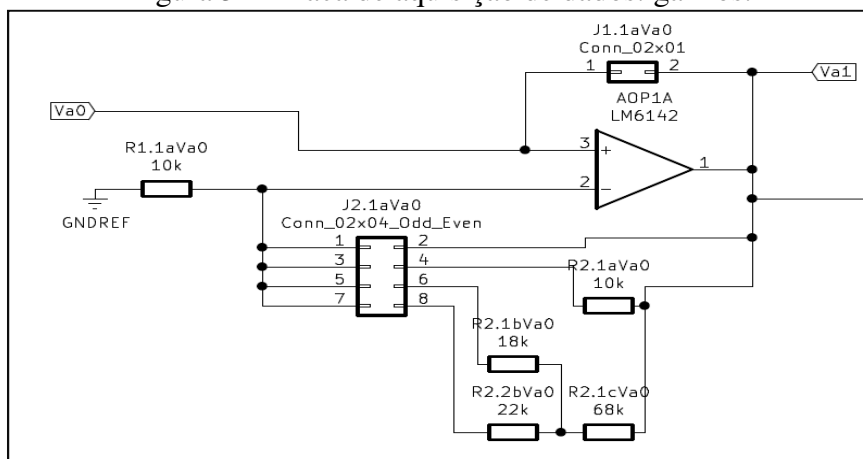
$$V_{p-p} = 2\sqrt{2}V_{RMS}$$

$$V_{offset} = \frac{V_{p-p}}{2} = \sqrt{2}V_{RMS} \quad (22)$$

Desta forma, o sinal será todo positivo. Na Figura 33 é destacada a forma como é determinado o *offset* através de um divisor resistivo.

O *offset* é adicionado ao sinal de entrada antes do amplificador operacional responsável pelo ganho. Ao utilizar a equação (18) e aplicar o ganho, é necessário observar que o sinal de saída do amplificador operacional não deve ultrapassar 3,3V. Os resistores que determinam este ganho são apresentados na Figura 34.

Figura 34 - Placa de aquisição de dados: ganhos.



Fonte: O Autor (2020).

Para exemplificar, caso o sinal de entrada seja uma tensão de 220 V_{RMS}, conforme os valores utilizados, o sinal de saída no TP será de 1,00 V_{RMS}. Com isso, a tensão de pico a pico será de 2,82 V. Assim, o ganho a ser utilizado é 1, e o *offset* deve ser 1,66V, ou seja, metade da tensão de alimentação. Utilizando a equação (19) é possível determinar a tensão de saída do divisor resistivo.

$$V_{offset} = \frac{R_x}{R_{Eq}} V_{in} = \frac{100 \text{ k}\Omega}{200 \text{ k}\Omega} 3,3V = 1,65 V \quad (23)$$

Este valor de tensão é selecionado através dos pinos 1 e 2 do *jumper*J0.4 da Figura 33. Deste modo, o valor de tensão será todo positivo e não será necessário aplicar ganho de tensão, uma vez que a tensão está variando entre 0,23 V e 3,06 V, para obter ganho unitário no amplificador operacional, basta efetuar um curto-circuito dos pinos 1 e 2 no *jumper* do J2.1 da Figura 34.

Outro exemplo é para o sinal de corrente, cujo valor de entrada é de 2,00 A. Como o transdutor é 30 A – 1 V, a saída de tensão será de 0,067 V_{RMS} e a tensão de pico a pico será de 0,189 V. O ganho a ser utilizado é 5, e o *offset* deve ser 0,33 V, igual ao exemplo anterior.

Ao utilizar a equação (24), é possível determinar a tensão de saída do divisor resistivo.

$$V_{offset} = \frac{R_x}{R_{Eq}} V_{in} = \frac{20 \text{ k}\Omega}{200 \text{ k}\Omega} 3,3V = 0,33 V \quad (24)$$

Este valor de tensão é selecionado através dos pinos 5 e 6 do *jumper*J0.4 da Figura 33. Ao fazer uso da equação (25), é possível determinar o ganho de tensão.

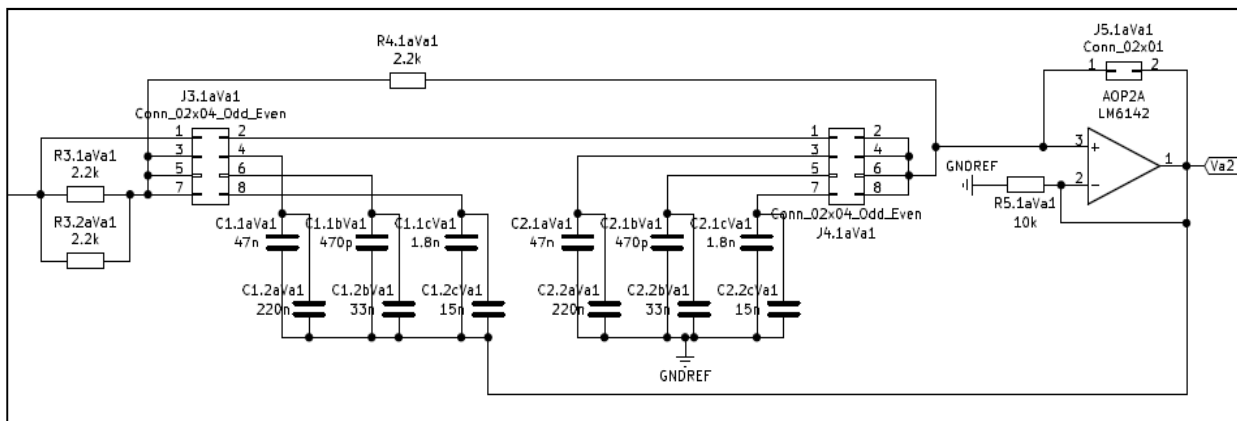
$$A_V = 1 + \frac{R_F}{R_1} = 1 + \frac{40 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = 5 \quad (25)$$

Assim, a tensão varia entre 0,70 V e 2,59 V. Para obter ganho determinado pela equação (25) no amplificador operacional, basta efetuar um curto-circuito dos pinos 5 e 6 no *jumper* do J2.1 da Figura 34.

No segundo estágio, os sinais de tensão e corrente são filtrados, de modo a retirar as harmônicas geradas pelo PWM. Esta ação também serve como *anti-aliasing*.

Como a placa de aquisição de dados foi concebida para efetuar medições de diversas grandezas, frequências de corte variadas podem ser selecionadas, bastando trocar a seleção dos capacitores através da mudança de posição nos *jumpers* J3.1aVa1 e J4.1aVa1 da Figura 35.

Figura 35 – Placa de aquisição de dados: filtros.



Fonte: O Autor (2020).

A Tabela 2 apresenta as frequências de corte que podem ser selecionadas e os valores dos capacitores. Vale ressaltar que estes valores são selecionados de acordo com a posição do *jumper*.

Tabela 2 – Posição da ligação nos *jumpers* para determinação da frequência de corte.

Frequência de Corte (Hz)	Posição da ligação		Capacitor C ₁	Capacitor C ₂
	<i>Jumper J3.1aVa1</i>	<i>Jumper J4.1aVa1</i>		
Infinita	1-2	1-2	-	-
381	3-4	3-4	267 nF	267 nF
3050	5-6	5-6	33,5 nF	33,5 nF
6090	7-8	7-8	16,8 nF	16,8 nF

Fonte: O Autor (2020).

Para este projeto, foi escolhida uma frequência de corte de 381 Hz e R_2 no valor de 2,2 k Ω , com isso o valor de R_1 é de 1,1 k Ω (na placa foram utilizados 2 resistores de 2,2 k Ω em paralelo).

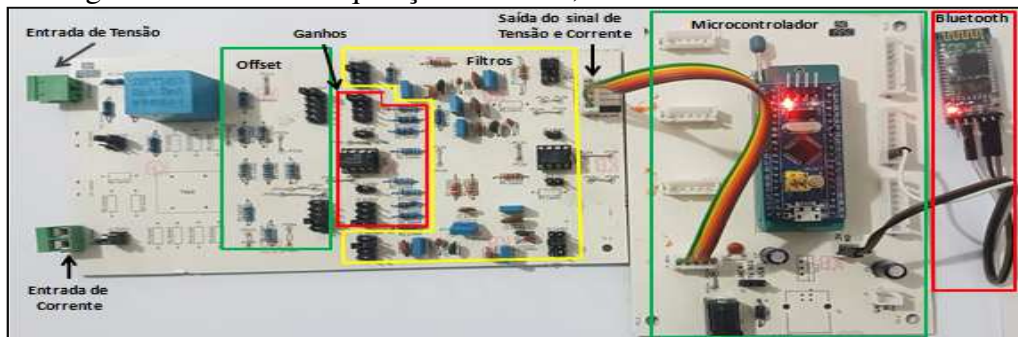
Desta maneira, o valor do capacitor necessário é o de 267nF. Como este valor comercial não existe, foi utilizado um capacitor de 220nF em paralelo com um de 47nF.

Para selecionar os capacitores citados acima, basta selecionar os pinos 3 e 4 do *jumper* J3.1aVa1 e J4.1aVa1 da Figura 35. No caso específico deste projeto de filtro, a seleção dos capacitores deverá ser a mesma para os dois *jumpers*, já que são utilizados os mesmos valores dos capacitores.

Quando não for preciso determinar nenhuma frequência de corte (através da seleção dos pinos 1 e 2 do *jumper*), o amplificador operacional do circuito deverá ser eliminado, isso pode ser realizado através do J5.1aVa1.

A placa de aquisição de dados foi montada conforme apresentado na Seção 3.2 e apresentada juntamente com o microcontrolador e o Bluetooth para o envio dos dados na Figura 36. A taxa de amostragem é de 1200 amostras por segundo, e com essa taxa é feito o processamento da informação, ou seja, calculado a potência que esta sendo consumida. Essa informação fica disponível para ser enviado pelo Bluetooth ao aplicativo.

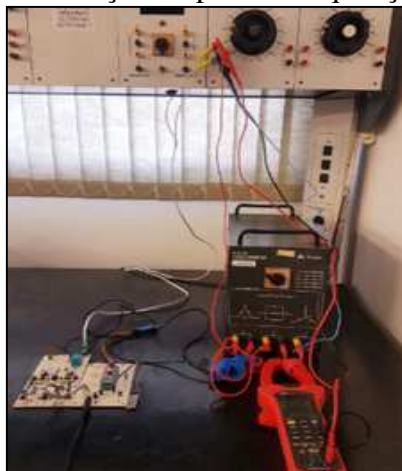
Figura 36 – Placa de aquisição de dados, microcontrolador e Bluetooth.



Fonte: O Autor (2020).

Como os componentes da placa possuem valores fixos e apresentam variações dentro da faixa de tolerância, torna-se necessária a aferição dos valores que serão medidos, isso é realizado através da comparação entre os valores lidos pelo sistema de aquisição de dados e as medições realizadas por aparelhos precisos. A Figura 37 apresenta a montagem para aferição do sistema de aquisição de dados.

Figura 37 – Calibração da placa de aquisição de dados.



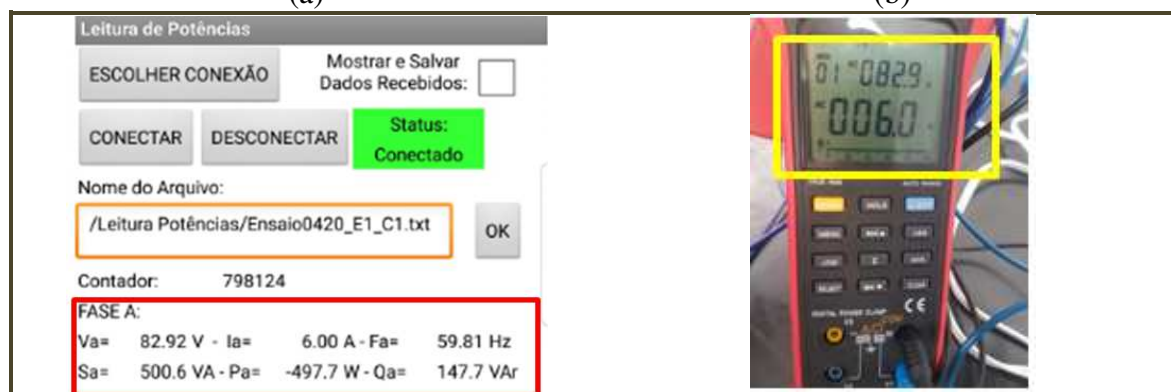
Fonte: O Autor (2020).

A fim de efetuar a calibração, foi utilizado o alicate wattímetro Icel modelo AW-4700. Para a medição de corrente alternada até 400 A, possui uma resolução de 0,1 A e uma precisão de $\pm (2,0\% + 5 \text{ dig.})$, para medição da tensão alternada, uma resolução de 0,1 V e uma exatidão de $\pm (1,2\% + 5 \text{ dig.})$, já para potência ativa, reativa e aparente, a resolução para valores menores que 1,0 kW é de 0,01 kW e uma exatidão de $\pm (3,0\% + 5 \text{ dig.})$.

Como apresentado na Seção 3.2, o projeto foi desenvolvido para utilizar o máximo da faixa dinâmica do conversor A/D do microcontrolador. Desta forma, uma vez definidos os ganhos e os *offsets*, é também necessário alterar os parâmetros da programação, para que o valor apresentado seja igual ao que está sendo medido.

A Figura 38(a) apresenta a tela do aplicativo, onde é possível verificar os valores que estão sendo medidos. Os valores enviados pelo microcontrolador são tensão, corrente, frequência, potência aparente e potencia ativa (em destaque). Já a Figura 38(b) exhibe os valores lidos pelo wattímetro, um amperímetro e um voltímetro (destacados na figura).

Figura 38 – Leituras realizadas (a) pela placa de aquisição de dados e (b) pelo wattímetro.

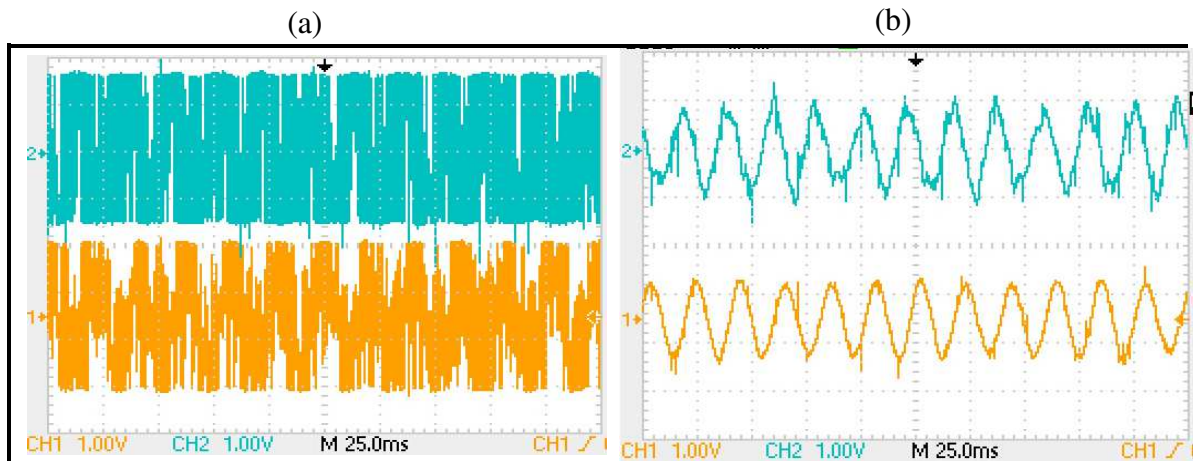


Fonte: O Autor (2020).

A Figura 39 expõe os sinais de corrente (canal 1) e tensão (canal 2) obtidos na saída do inversor de frequência. A Figura 39(a) mostra a tensão e a corrente antes de serem filtradas, enquanto a Figura 39(b) se encarrega de representá-las após o sinal ter passado pelo filtro. Para a obtenção dessas imagens, o osciloscópio estava configurado em modo "acoplamento CA", por isso o descolamento CC inserido pela placa de instrumentação não está presente.

Conforme descrito na Seção 2.7, a Figura 39 demonstra que o filtro passa baixa causou a redução do conteúdo harmônico do sinal médio.

Figura 39 – Sinais de corrente e tensão obtidos (a) antes do filtro e (b) após o filtro.



Fonte: O Autor (2020).

Escala Horizontal 25 ms/divisão. Escala vertical 1V/divisão para os canais 1 e 2.

Ainda, na Figura 39(b) se pode verificar que o sinal filtrado da corrente apresenta um menor conteúdo harmônico em relação ao sinal filtrado da tensão, isso é esperado uma vez que o motor atua como um filtro passa baixo reduzindo o conteúdo harmônico da corrente consumida.

A Figura 40 apresenta a placa de aquisição de dados conectada na saída do inversor de frequência para medição da tensão e corrente que alimentam o motor de fuso da máquina.

Figura 40 – Placa de aquisição de dados conectada na máquina.



Fonte: O Autor (2020).

4.2. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS, TREINAMENTO E VALIDAÇÃO DA RNA COM A FERRAMENTA DE 6 MM

Para realização dos ensaios inicialmente foi realizado o processo de aquecimento da máquina, com uma duração de 30 minutos. O ensaio para cada tipo de ferramenta foi realizado no mesmo dia.

O processo de usinagem será realizado através do fresamento concordante, os passes serão sempre no mesmo sentido e será medida a potência no motor de fuso,

Foram feitas as medições da potência elétrica para cada uma das nove condições definidas pelas três velocidades de fuso e três avanços por dente. A profundidade radial e axial foi mantida constante em todo o ensaio.

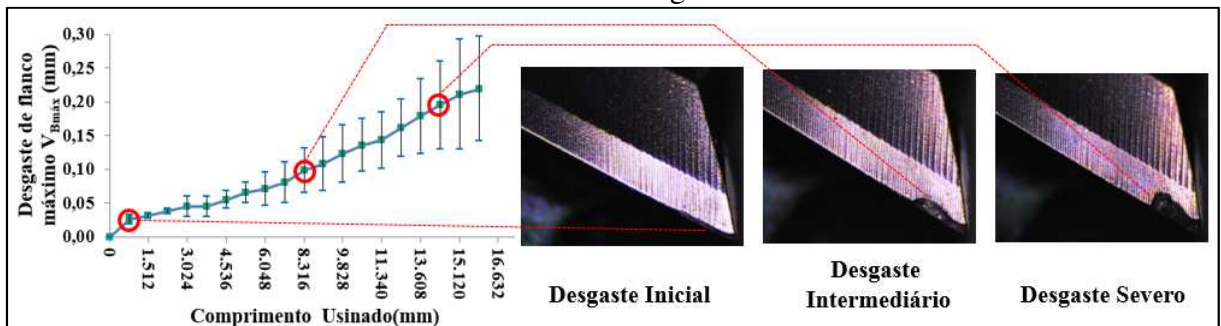
Tabela 3 apresenta parte dos valores da potência elétrica que foram adquiridos e que serão utilizados para treinamento da rede neural artificial.

Tabela 3 – Dados experimentais que serão utilizados para treinamento da RNA utilizando a ferramenta de 6 mm.

Ensaio	Condição	V_c (m/min)	F_z (mm/gume)	A_p (mm)	A_e (mm)	Potência (W)	Desgaste (mm)
1	1	60	0,02	0,4	1,00	120,549	0,0255
1	2	60	0,04	0,4	1,00	123,514	0,0255
1	3	60	0,06	0,4	1,00	123,156	0,0255
1	4	75	0,02	0,4	1,00	100,216	0,0255
1	5	75	0,04	0,4	1,00	104,859	0,0255
1	6	75	0,06	0,4	1,00	107,842	0,0255
1	7	90	0,02	0,4	1,00	94,865	0,0255
1	8	90	0,04	0,4	1,00	99,165	0,0255
1	9	90	0,06	0,4	1,00	101,242	0,0255
2	1	60	0,02	0,4	1,00	123,589	0,0305
2	:						
2	9	90	0,06	0,4	1,00	103,757	0,0305
:							
:							
19	9	90	0,06	0,4	1,00	116,037	0,2194

Ao final dos ensaios, foi feita a análise do desgaste médio em função do comprimento usinado, tal como apresentado na Figura 41. Esta figura também mostra o desgaste da ferramenta em três estágios diferentes: no Estágio Inicial, com 756 mm de material usinado, o desgaste era de 0,03 mm; no Estágio Intermediário, com 8.316mm de material usinado, o desgaste encontrava-se em 0,10 mm; no Estágio Avançado, com 14.364 mm de material usinado, o desgaste era 0,19 mm.

Figura 41 – Variação do desgaste da ferramenta em função do comprimento usinado e em três diferentes estágios.



Fonte: O Autor (2020).

O teste estatístico de análise de variância (ANOVA) tem o objetivo confirmar a existência de influência de cada fator sobre a potência elétrica consumida pelo motor de fuso. Os fatores analisados foram: desgaste (A), velocidade de corte (B) – 60, 75 e 90 m/min e avanço por gume (C) – 0,02, 0,04 e 0,06 mm/gume. Na Tabela 4, é possível observar a influência dos fatores individualmente e suas interações, de segunda e terceira ordem, na potência elétrica consumida pelo motor de fuso. Neste sentido, é possível afirmar, com um nível de confiança de 74%, que o único fator influente é a velocidade de corte, pois a probabilidade da hipótese do fator não ser influente é nula neste nível de confiança.

Tabela 4 – ANOVA para os valores da potência elétrica.

(continua)

Fonte	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F ₀	p
A	821,477	18,000	45,638	0,016	1,000
B	7822,118	2,000	3911,059	1,360	0,260
C	967,914	2,000	483,957	0,168	0,845
AB	17,288	36,000	0,480	0,000	1,000

(conclusão)

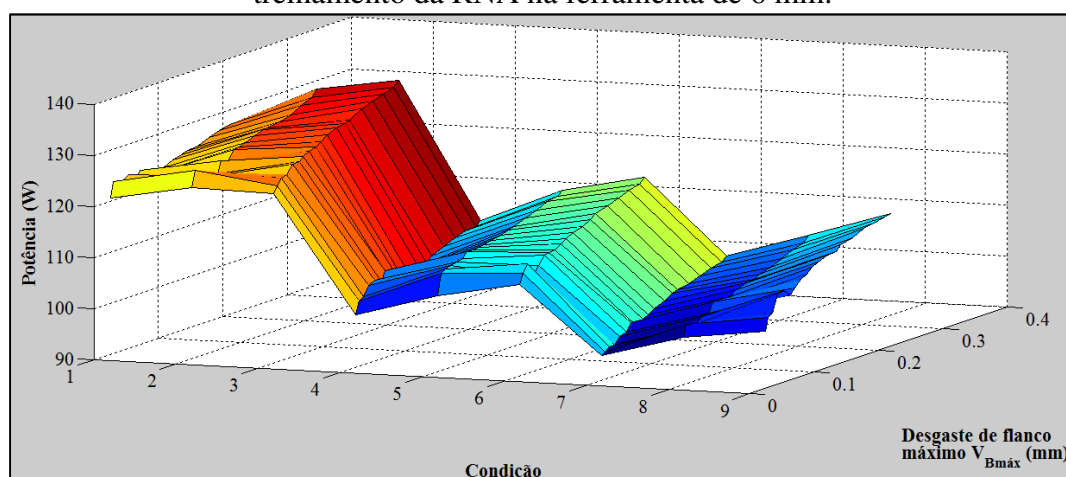
Fonte	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F ₀	p
AC	46,077	36,000	1,280	0,000	1,000
BC	51,618	4,000	12,904	0,004	1,000
ABC	30,798	72,000	0,428	0,000	1,000
Erro	491915,583	171,000	2876,699		
Total	501672,873	341,000			

Fonte: O Autor (2020).

Conforme descrito por Constantinides e Bennett (1987) e Drouillet et al. (2016), era esperado um aumento percentual da potência elétrica, em razão do aumento do desgaste, o que pode ser percebido na Figura 42, que apresenta o aumento da potência elétrica consumida em relação ao aumento do desgaste para cada uma das nove condições de usinagem utilizadas no treinamento da RNA utilizando a ferramenta de 6 mm.

As condições de um a nove são as descritas na Tabela 3 e enumeradas a seguir: condição 1: velocidade de corte (v_c) 60 m/min e avanço por gume (f_z) 0,02 mm/gume; condição 2: v_c 60 m/min e f_z 0,04 mm/gume; condição 3: v_c 60 m/min e f_z 0,06 mm/gume; condição 4: v_c 75 m/min e f_z 0,02 mm/gume; condição 5: v_c 75 m/min e f_z 0,04 mm/gume; condição 6: v_c 75 m/min e f_z 0,06 mm/gume; condição 7: v_c 90 m/min e f_z 0,02 mm/gume; condição 8: v_c 90 m/min e f_z 0,04 mm/gume e condição 9: v_c 90 m/min e f_z 0,06 mm/gume.

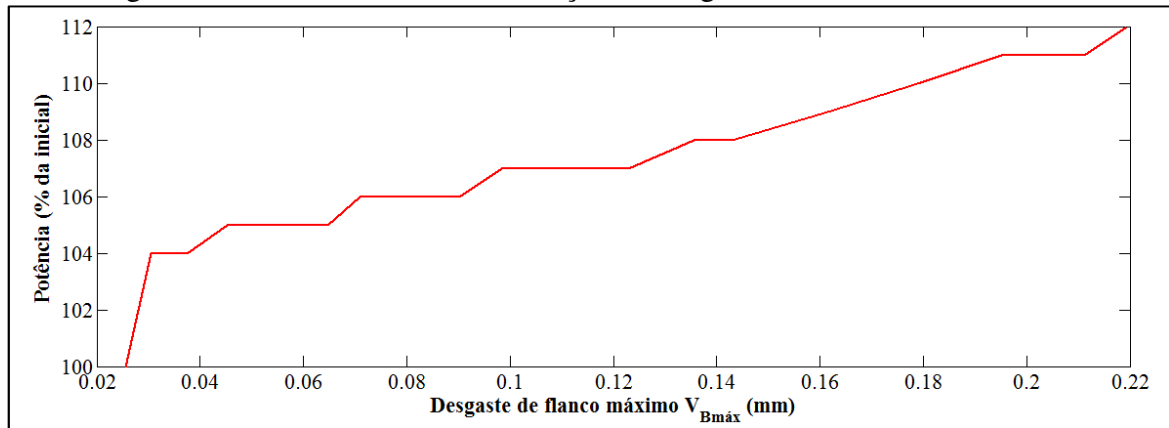
Figura 42 – Potência elétrica consumida em função do desgaste ($V_{Bmáx}$) para cada condição de treinamento da RNA na ferramenta de 6 mm.



Fonte: O Autor (2020).

A Figura 43 sinaliza o aumento percentual da potência elétrica em função do aumento do desgaste para uma velocidade de corte de 75 m/min e avanço por gume de 0,04 mm/gume.

Figura 43 – Potência elétrica em função do desgaste na ferramenta de 6 mm.



Fonte: O Autor (2020).

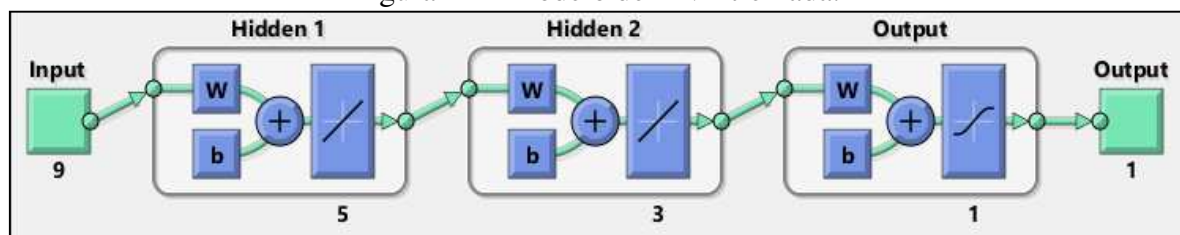
O treinamento da RNA foi feito conforme descrito na Seção 3.4.1. O APÊNDICE B apresenta os dados utilizados para o treinamento. Foram desenvolvidas várias redes neurais, com o intuito de escolher a que melhor se adaptava aos dados utilizados.

Os passos para criação de uma Rede Neural Artificial podem ser resumidos da seguinte forma:

- Importação dos dados de entrada;
- Definição da rede neural;
- Configuração da rede para realização do treinamento;
- Realizar o treinamento e verificar se o erro aceitável foi alcançado.

E foi escolhida uma que possui os seguintes parâmetros: o número de camadas escondidas foi igual a 2, o número de neurônios por camada foi de 5 e 3, respectivamente, e as funções de ativação foram a linear, linear e tangente hiperbólica (na camada de saída) para os dados da Ferramenta 1. A Figura 44 apresenta uma das redes neurais artificiais que foram treinadas. No Apêndice D é apresentado o algoritmo para construção da RNA.

Figura 44 – Modelo de RNA treinada.



Fonte: O Autor (2020).

Os valores de desgaste ($V_{BM\acute{a}x}$) estimados para a ferramenta 2 pelas 12 RNAs diferentes juntamente com o valor medido são apresentados na Tabela 5. Os valores destacados em cinza indicam que a RNA estimou qual a ferramenta chegaria ao fim da vida útil.

Tabela 5 – Comparativo entre o desgaste medido e o estimado pela RNA para a ferramenta 2.
(continua)

Desgaste medido (mm)	Desgaste estimado (mm)					
	RNAs testadas					
	1	2	3	4	5	6
0,0261	0,0282	0,0317	0,0352	0,0304	0,0285	0,0298
0,0291	0,0317	0,0396	0,0483	0,0457	0,0299	0,0328
0,0329	0,0329	0,0312	0,0332	0,0355	0,0272	0,0285
0,0397	0,0331	0,0364	0,0430	0,0471	0,0292	0,0307
0,0466	0,0358	0,0488	0,0601	0,0618	0,0315	0,0341
0,0569	0,0361	0,0338	0,0375	0,0388	0,0326	0,0322
0,0666	0,0365	0,0365	0,0439	0,0475	0,0342	0,0347
0,0773	0,0382	0,0369	0,0452	0,0457	0,0314	0,0329
0,0888	0,0437	0,0411	0,0524	0,0543	0,0342	0,0369
0,1058	0,0680	0,0641	0,0766	0,0735	0,0506	0,0581
0,1166	0,1084	0,1027	0,1151	0,1122	0,0753	0,0869
0,1235	0,1448	0,1222	0,1336	0,1602	0,0814	0,1023
0,1324	0,1461	0,1208	0,1437	0,1693	0,0780	0,1035
0,1404	0,1708	0,1529	0,1704	0,1888	0,1048	0,1365
0,1547	0,2019	0,1940	0,1954	0,1971	0,1741	0,1857
0,1688	0,2080	0,2017	0,2011	0,2046	0,1741	0,1924
0,1732	0,2117	0,2108	0,2115	0,2143	0,2049	0,2080
0,1825	0,2154	0,2098	0,2074	0,2114	0,2131	0,2106
0,1937	0,2152	0,1925	0,1863	0,1965	0,2147	0,2065
0,2101	0,2173	0,2113	0,2083	0,2123	0,2158	0,2137

(conclusão)

Desgaste medido (mm)	Desgaste estimado (mm)					
	RNAs testadas					
	7	8	9	10	11	12
0,0261	0,0307	0,0310	0,0288	0,0304	0,0306	0,0294
0,0291	0,0351	0,0345	0,0294	0,0337	0,0346	0,0322
0,0329	0,0279	0,0287	0,0279	0,0290	0,0292	0,0292
0,0397	0,0309	0,0316	0,0279	0,0315	0,0319	0,0297
0,0466	0,0370	0,0364	0,0294	0,0370	0,0359	0,0340
0,0569	0,0304	0,0327	0,0298	0,0326	0,0330	0,0304
0,0666	0,0328	0,0359	0,0317	0,0351	0,0365	0,0334
0,0773	0,0306	0,0346	0,0315	0,0346	0,0340	0,0337
0,0888	0,0331	0,0391	0,0351	0,0384	0,0384	0,0379
0,1058	0,0514	0,0607	0,0571	0,0589	0,0596	0,0600
0,1166	0,0786	0,0901	0,0835	0,0893	0,0875	0,0908
0,0773	0,0910	0,1046	0,0876	0,1047	0,1066	0,1082
0,1235	0,0844	0,1078	0,0923	0,1039	0,1083	0,1139
0,1324	0,1186	0,1358	0,1167	0,1273	0,1369	0,1322
0,1404	0,1805	0,1878	0,1813	0,1873	0,1841	0,1881
0,1547	0,1892	0,1908	0,1908	0,1907	0,1910	0,1970
0,1688	0,2084	0,2075	0,2020	0,2062	0,2076	0,2067
0,1732	0,2081	0,2085	0,2088	0,2087	0,2095	0,2081
0,1825	0,1904	0,2007	0,2037	0,1997	0,2031	0,1886
0,1937	0,2103	0,2115	0,2131	0,2116	0,2125	0,2109
0,2101	0,2093	0,2114	0,2126	0,2114	0,2126	0,2092

Fonte: O Autor (2020).

Na Tabela 5, é possível verificar que as 12 RNAs apresentaram valores de desgaste próximos entre si, com um erro máximo no fim da vida útil da ferramenta (0,20mm) de 23% e

um erro médio de 17%. Quer dizer que quando o método proposto indicar o fim da vida útil de uma ferramenta, ela estará em 77% da sua vida útil, no pior caso, e, em média, em 83% da sua vida útil.

O valor médio para o fim da vida útil foi obtido conforme a equação (26):

$$\begin{aligned} & \text{Valor médio de fim de vida (\%)} \\ & = 100 \times \frac{\text{Valor Médio do Desgaste Experimental}}{\text{Valor Médio do Desgaste Estimado}} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} & \text{Valor médio do desgaste experimental} \\ & = (1 \times 0.1547 + 3 \times 0.1688 + 8 \times 0.1732) / 12 \\ & = 0,1705 \text{ mm} \end{aligned} \quad (27)$$

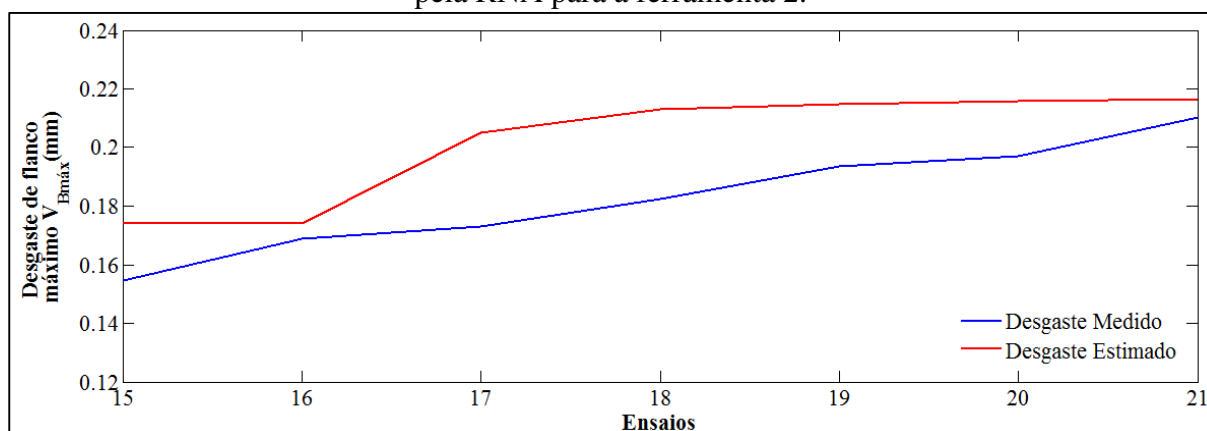
A equação (27) apresenta o valor médio do desgaste experimental, que representa o ponto onde o desgaste estimado pela RNA foi superior a 0,2 mm.

A equação (28) demonstra o valor médio do desgaste estimado quando a RNA foi superior a 0,2 mm.

$$\begin{aligned} & \text{Valor médio do desgaste estimado} \\ & = (0,2019 + 0,2017 + 0,2011 + 0,2046 + 0,2049 \\ & + 0,2080 + 0,2084 + 0,2075 + 0,2020 + 0,2062 + 0,2076 \\ & + 0,2067) / 12 = 0,2050 \text{ mm} \end{aligned} \quad (28)$$

A Figura 45 exibe a diferença entre o desgaste medido e o previsto por uma das RNAs testadas.

Figura 45 – Comparativo entre o desgaste de flanco máximo ($V_{B\text{máx}}$) medido e o estimado pela RNA para a ferramenta 2.



Fonte: O Autor (2020).

O treinamento da RNA também foi realizado com base nos dados dos ensaios da ferramenta 2, que foram extraídos utilizando as mesmas condições apresentadas na Tabela 3.

A Tabela 6 apresenta os valores do desgaste medido e estimado para a ferramenta 2. Estes valores foram obtidos com a RNA treinada pelos dados da ferramenta 2. Os dados utilizados para treinar a RNA utilizando a ferramenta 2 estão contidos no APÊNDICE C.

Tabela 6 – Comparativo entre o desgaste de flanco máximo (VB_{máx}) medido e o estimado pela RNA para a ferramenta 1.

(continua)

Desgaste medido (mm)	Desgaste estimado (mm)					
	RNAs testadas					
	1	2	3	4	5	6
0,0255	0,0370	0,0323	0,0330	0,0350	0,0333	0,0334
0,0305	0,0596	0,0502	0,0420	0,0601	0,0530	0,0629
0,0374	0,0469	0,0431	0,0367	0,0467	0,0450	0,0539
0,0453	0,0814	0,0714	0,0832	0,0829	0,0762	0,0703
0,0544	0,0745	0,0719	0,0784	0,0782	0,0762	0,0736
0,0648	0,0556	0,0533	0,0522	0,0550	0,0568	0,0641
0,0710	0,0899	0,0800	0,0813	0,0894	0,0843	0,0838
0,0803	0,0883	0,0962	0,0870	0,0866	0,0942	0,1135
0,0902	0,1062	0,1131	0,1016	0,1017	0,1062	0,1222
0,0983	0,1190	0,1320	0,1184	0,1140	0,1236	0,1454
0,1079	0,1236	0,1424	0,1272	0,1214	0,1347	0,1569
0,1229	0,1347	0,1545	0,1391	0,1339	0,1467	0,1646
0,1356	0,1357	0,1555	0,1354	0,1332	0,1470	0,1654
0,1430	0,1445	0,1636	0,1508	0,1450	0,1571	0,1721
0,1615	0,1454	0,1696	0,1569	0,1485	0,1631	0,1773
0,1789	0,1594	0,1817	0,1716	0,1646	0,1769	0,1878
0,1951	0,1684	0,1876	0,1756	0,1727	0,1832	0,1927
0,2112	0,1762	0,1934	0,1816	0,1804	0,1894	0,1974
0,2194	0,1820	0,1969	0,1862	0,1856	0,1933	0,2004

(conclusão)

	Desgaste estimado (mm)					
--	------------------------	--	--	--	--	--

Desgaste medido (mm)	RNAs testadas					
	7	8	9	10	11	12
0,0255	0,0324	0,0328	0,0321	0,0309	0,0313	0,0349
0,0305	0,0514	0,0489	0,0586	0,0452	0,0374	0,0502
0,0374	0,0449	0,0421	0,0466	0,0399	0,0344	0,0430
0,0453	0,0686	0,0547	0,0763	0,0597	0,0422	0,0697
0,0544	0,0692	0,0596	0,0752	0,0631	0,0475	0,0699
0,0648	0,0552	0,0500	0,0537	0,0457	0,0406	0,0539
0,0710	0,0831	0,0743	0,0851	0,0686	0,0578	0,0817
0,0803	0,0942	0,0757	0,0931	0,0734	0,0599	0,0819
0,0902	0,1110	0,0867	0,1084	0,0891	0,0735	0,0952
0,0983	0,1279	0,1035	0,1251	0,1043	0,0899	0,1091
0,1079	0,1371	0,1176	0,1358	0,1170	0,1039	0,1184
0,1229	0,1489	0,1315	0,1490	0,1343	0,1187	0,1305
0,1356	0,1510	0,1340	0,1499	0,1391	0,1211	0,1309
0,1430	0,1594	0,1438	0,1598	0,1503	0,1325	0,1419
0,1615	0,1661	0,1501	0,1649	0,1554	0,1397	0,1473
0,1789	0,1784	0,1665	0,1794	0,1721	0,1568	0,1623
0,1951	0,1856	0,1760	0,1865	0,1800	0,1660	0,1702
0,2112	0,1915	0,1843	0,1928	0,1878	0,1762	0,1777
0,2194	0,1960	0,1906	0,1963	0,1910	0,1850	0,1840

Fonte: O Autor (2020).

Os dados para estimar o desgaste da ferramenta 1 estão contidos no APÊNDICE B.

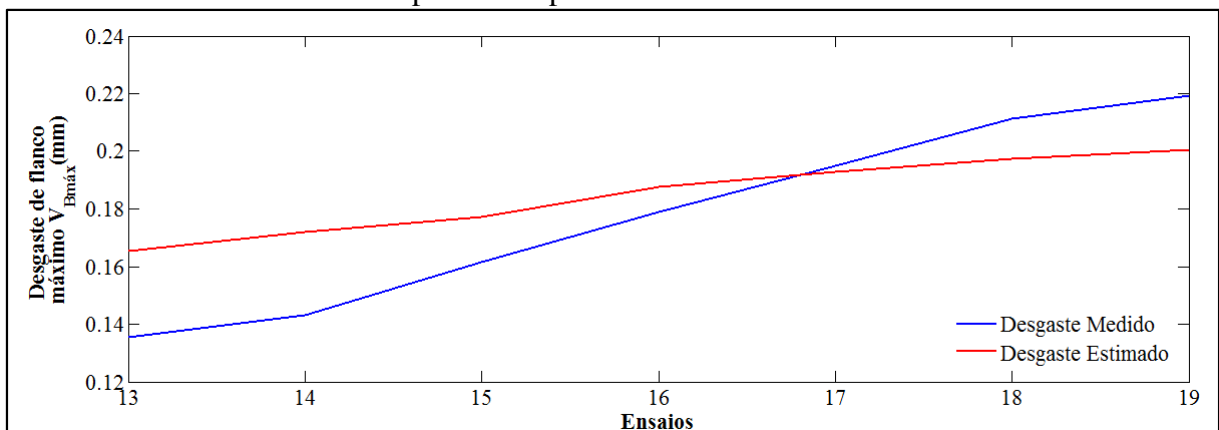
Como a RNA não apresentou valores de desgaste estimados maiores que 0,20 mm para obtenção dos resultados numéricos, será utilizada a média dos últimos valores estimados pela RNA em comparação com o último valor experimental obtido, cujo erro médio é 16%.

Os valores estimados para o desgaste da ferramenta 1 estão abaixo dos valores medidos (maiores que 0,19 mm), isso ocorreu porque os valores da potência medidos para a ferramenta

1 são menores que os da ferramenta 2, tal como visto na Tabela 6. Esta diferença na medição pode ocorrer em função de erro da instrumentação ou diferença na estrutura das ferramentas, por exemplo.

A Figura 46 apresenta a diferença entre o desgaste medido e o previsto por uma das RNAs testadas.

Figura 46 – Comparativo entre o desgaste de flanco máximo ($V_{Bmáx}$) medido e o estimado pela RNA para a ferramenta 1.



Fonte: O Autor (2020).

A diferença entre a potência elétrica consumida pela ferramenta quando nova e no final da sua vida útil mostra um aumento de 8% a 15% devido ao aumento da área de contato devido entre a face do flanco da ferramenta e a peça de trabalho, bem como a diminuição do ângulo de saída, resultados semelhantes aos obtidos por Da Silva, Da Silva e Hassui (2016).

Comparado com outros métodos de monitoramento, como emissão acústica e vibração, o método proposto não requer um sistema de medição caro ou de difícil implementação (SHI et. al, 2018).

Os resultados apresentados nesta seção indicam que o modelo proposto é capaz de fornecer previsões confiáveis para novas condições de corte, desde que a ferramenta de corte e o material usinado permaneçam o mesmo.

Durante a utilização prática não se terá o valor experimental para comparar. Assim, utilizando qualquer rede neural gerada pelo treinamento, será possível obter uma boa aproximação para o desgaste da ferramenta.

4.3. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS E TREINAMENTO DA RNA UTILIZANDO INSERTOS

Os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 7, assim como o resultado da potência elétrica e o desgaste para o primeiro ensaio.

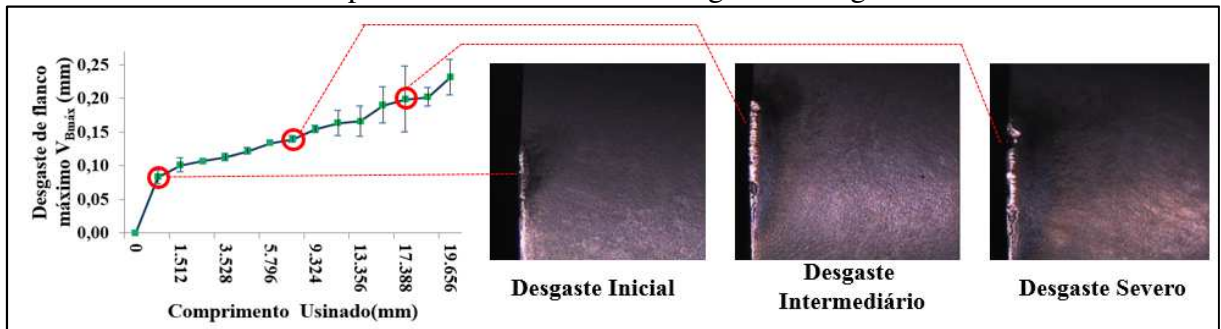
Tabela 7 – Dados experimentais que serão utilizados para elaboração da RNA utilizando os insertos.

Ensaio	Condição	V_c (m/min)	F_z(mm/gume)	A_p (mm)	A_e (mm)	Potência (W)	Desgaste (mm)
1	1	105,60	0,06	0,5	10,5	121,714	0,0831
1	2	105,60	0,09	0,5	10,5	127,063	0,0831
1	3	105,60	0,12	0,5	10,5	141,903	0,0831
1	4	132,00	0,06	0,5	10,5	150,127	0,0831
1	5	132,00	0,09	0,5	10,5	165,079	0,0831
1	6	132,00	0,12	0,5	10,5	173,558	0,0831
2	7	158,40	0,06	0,5	10,5	214,015	0,0831
1	8	158,40	0,09	0,5	10,5	220,660	0,0831
1	9	158,40	0,12	0,5	10,5	233,082	0,0831
2	1	105,60	0,06	0,5	10,5	122,116	0,1009
2	:						
2	9	158,40	0,12	0,5	10,5	243,134	0,1009
:							
:							
14	9	158,40	0,12	0,5	10,5	340,510	0,2314

Fonte: O Autor (2020).

Ao final dos ensaios, foi feita a análise do desgaste médio em função do comprimento usinado, como pode ser observado na Figura 47.

Figura 47 – Variação do desgaste de flanco máximo ($V_{Bmáx}$) do inserto em função do comprimento de corte e três estágios de desgaste.



Fonte: O Autor (2020).

Também é mostrado o desgaste do inserto em três estágios diferentes: no Estágio Inicial, com 756 mm de material usinado, o desgaste era de 0,08 mm; no Estágio Intermediário, com 7.560 mm de material usinado, o desgaste encontrava-se em 0,14 mm; no Estágio Avançado, com 17.388 mm de material usinado, o desgaste era 0,20 mm.

Da mesma forma que a primeira ferramenta, o teste estatístico de análise de variância (ANOVA) confirma a existência da influência de cada fator sobre a potência elétrica consumida pelo motor de fuso. Os fatores analisados são: desgaste (A), velocidade de corte (B) – 105,6, 132 e 158,4 m/min e avanço por gume (C) – 0,06, 0,09 e 0,12 mm/gume.

Tabela 8 – ANOVA para a potência elétrica dos insertos

Fonte	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F ₀	p
A	35468,999	13,000	2728,385	0,108	1,000
B	147680,688	2,000	73840,344	2,933	0,057
C	11658,203	2,000	5829,101	0,232	0,794
AB	809,277	26,000	31,126	0,001	1,000
AC	726,287	26,000	27,934	0,001	1,000
BC	164,969	4,000	41,242	0,002	1,000
ABC	420,207	52,000	8,081	0,000	1,000
Erro	3172451,079	126,000	25178,183		
Total	3369379,708	251,000			

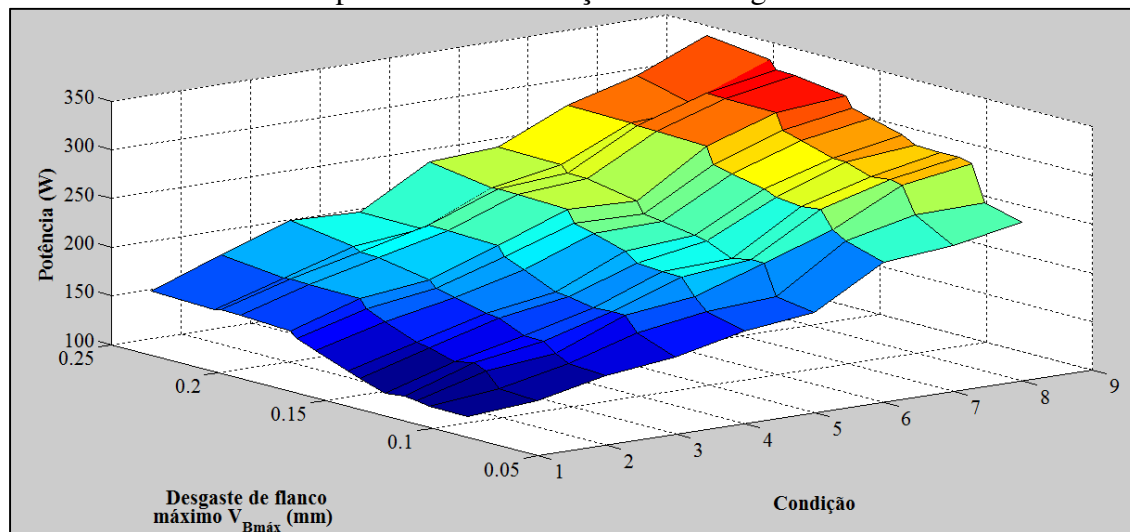
Fonte: O Autor (2020).

Na Tabela 8, é possível observar a influência dos fatores individualmente e suas interações, de segunda e terceira ordem, na potência elétrica consumida pelo motor de fuso. Neste sentido, é possível afirmar, com um nível de confiança de 94,3%, que o único fator influente é a velocidade de corte, pois a probabilidade da hipótese do fator não ser influente é nula neste nível de confiança.

A Figura 48 mostra o aumento da potência elétrica consumida em relação ao aumento do desgaste para cada uma das nove condições de usinagem. As condições de um a nove são as descritas na Tabela 7.

As condições de um a nove são as descritas na Tabela 7 e enumeradas a seguir: condição 1: velocidade de corte (v_c) 105,6 m/min e avanço por gume (f_z) 0,06 mm/gume; condição 2: v_c 105,6 m/min e f_z 0,09 mm/gume; condição 3: v_c 105,6 m/min e f_z 0,12 mm/gume; condição 4: v_c 132 m/min e f_z 0,06 mm/gume; condição 5: v_c 132 m/min e f_z 0,09 mm/gume; condição 6: v_c 132 m/min e f_z 0,12 mm/gume; condição 7: v_c 158,4 m/min e f_z 0,06 mm/gume; condição 8: v_c 158,4 m/min e f_z 0,09 mm/gume e condição 9: v_c 158,4 m/min e f_z 0,12 mm/gume.

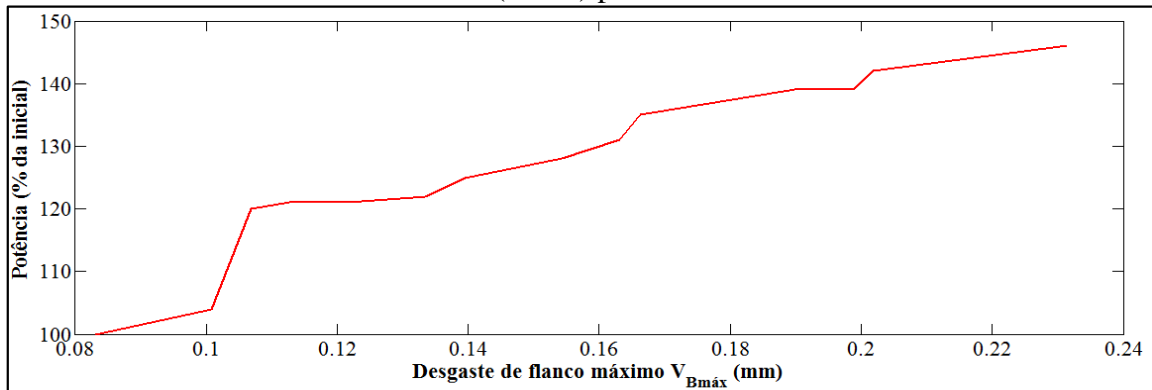
Figura 48 – Potência elétrica em função do desgaste de flanco máximo ($V_{Bmáx}$) nos inserts para todas as condições de usinagem.



Fonte: O Autor (2020).

O aumento percentual da potência elétrica em razão do aumento do desgaste pode ser percebido na Figura 49. O gráfico foi construído para uma condição de velocidade de corte (v_c) de 158,4 m/min e avanço (f_z) de 0,12 mm/gume.

Figura 49 – Aumento do consumo da potência elétrica em função do desgaste de flanco máximo ($V_{Bm\acute{a}x}$) para o inserto.



Fonte: O Autor (2020).

O treinamento da RNA foi feito conforme descrito na Seção 3.4.1. O APÊNDICE D contém os dados utilizados para o treinamento.

A rede neural utilizada foi a mesma que foi empregada na Seção 4.2 e apresentada na Figura 44.

Foram treinadas 12 RNAs contendo diferentes dados experimentais do inserto 1. Para cada uma dessas redes, os resultados experimentais de potência do inserto 2 foram inseridos. Os valores de desgaste estimados para o inserto 2 pelas 12 RNAs diferentes juntamente com o valor medido são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Comparativo entre o desgaste medido e o estimado pela RNA para o inserto 2.

Desgaste medido (mm)	Desgaste estimado (mm)					
	RNAs testadas					
	1	2	3	4	5	6
0,2019	0,1975	0,1732	0,2068	0,1816	0,2074	0,1875
0,2107	0,2042	0,2009	0,2014	0,2104	0,2019	0,2026

Desgaste medido (mm)	Desgaste estimado (mm)					
	RNAs testadas					
	7	8	9	10	11	12
0,2019	0,1755	0,1895	0,1782	0,2042	0,2082	0,1829
0,2107	0,1984	0,2106	0,2032	0,2029	0,1997	0,2008

Fonte: O Autor (2020).

Devido ao fato de ter sido utilizado um inserto no final da sua vida útil, foram feitos apenas 2 ensaios com ele, mas os valores estimados pelas 12 RNAs apresentaram valores de desgaste próximos entre si, com um erro máximo no fim da vida útil da ferramenta (0,20mm) de 16% e um erro médio de 6%.

Após a realização dos ensaios, foi possível confirmar o aumento da potência elétrica consumida pela máquina para uma mesma condição de corte à medida que aumentou o desgaste da ferramenta.

Devido às condições mais severas de usinagem que foram utilizadas nos insertos, houve um aumento percentual da potência elétrica consumida pela fresadora, quando comparada a ferramenta nova a ferramenta desgastada, de 8 a 15% para ferramenta de 6 mm e de 36 e 54% para os insertos. Isso possibilitou que durante as etapas de treinamento e validação das RNAs houvesse uma melhora na estimativa do desgaste da ferramenta, fazendo com que o erro médio diminuísse de 17% na ferramenta de 6 mm para 6%, utilizando os insertos.

5. CONCLUSÃO

Os métodos diretos de medição do desgaste da ferramenta, apesar de serem mais precisos só podem ser utilizados quando a ferramenta está fora de operação.

Há diversos meios de realizar a medição do desgaste da ferramenta de forma indireta, que trazem como um dos benefícios a não interrupção do processo produtivo, mas a sua aplicação requer conhecimento a respeito dos mecanismos responsáveis pela geração do sinal a ser monitorado bem como a correta instalação e operação dos sensores.

As soluções para que ocorra o monitoramento online do desgaste podem ser as medições da força de corte, da emissão acústica, da vibração, da corrente elétrica, da temperatura de corte, das dimensões da peça, dos sinais ultrassônicos e óticos, do acabamento superficial.

As técnicas de monitoramento que utilizam potência média efetiva de corte média parecem ser uma boa alternativa para os sistemas de monitoramento do desgaste de ferramentas, uma vez que o aumento da área de contato entre as superfícies devido ao desgaste faz com que o atrito se eleve e, por conseguinte, a potência e as forças necessárias para que haja o corte efetivo serão aumentadas.

A implementação de um sistema de aquisição de dados foi realizada através de uma placa de aquisição de dados, onde foi feita a aquisição dos sinais de tensão e corrente, seu condicionamento para valores possíveis de serem inseridos no conversor A/D, cálculo da potência elétrica pelo microcontrolador, envio dos valores calculados (tensão e corrente *rms*, frequência, potência ativa, reativa e aparente) através do Bluetooth para um aplicativo de celular onde são armazenados para posteriormente serem utilizados para treinamento e validação das RNAs.

Os resultados deste trabalho confirmam o aumento do consumo da potência elétrica em função do aumento do desgaste da ferramenta.

Nos ensaios foi verificado que conforme as condições de corte (velocidade de corte e avanço por gume) eram variadas, a potência sofria alterações para um mesmo nível de desgaste (Tabela 3 e Tabela 7). Este fato ocorre, pois são alterados os parâmetros de alimentação do motor (tensão e frequência).

Foi criado um banco de dados para treinamento e validação da RNA com a utilização de 9 diferentes condições de usinagem e dois modelos de ferramentas.

O desgaste da ferramenta foi previsto com sucesso através de uma rede neural *feed-forward* multicamadas e com um algoritmo de aprendizado *BackPropagation*. A RNA teve boa resposta ao tentar prever o desgaste para as duas ferramentas, sendo que o erro máximo

alcançado pela rede foi de 23% para a ferramenta de 6 mm. Além disso, à medida que a ferramenta foi aumentando o desgaste, o erro teve seu valor diminuído. Para os insertos, o erro máximo foi de 16%.

O aumento da potência elétrica consumida pela máquina quando utilizado os insertos fez com que houvesse uma melhora na estimativa do desgaste da ferramenta.

O método proposto independe do regime de trabalho da ferramenta e do histórico dela, ele avalia a condição atual da mesma. Em outras palavras, uma vez treinada a RNA, os parâmetros de usinagem podem ser diferentes dos utilizados para o treinamento, somente sendo necessário utilizar as condições de treino quando se quiser conhecer o desgaste da ferramenta e, em seguida, voltar às condições de usinagem que estavam sendo utilizadas.

5.1. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Efetuar o monitoramento da potência elétrica para o motor de avanço, a fim de ter mais uma variável para o treinamento da RNA.

Realizar um número maior de testes, para melhorar a aplicação da RNA. Utilizar outro material para os corpos de prova, assim como outras ferramentas.

Melhoria da forma de comunicação entre o microcontrolador e o computador, eliminando a necessidade de uso de aplicativo para salvar os dados.

Melhorar o desempenho do sistema de aquisição de dados e da RNA para valores de potência baixos.

Avaliar a possibilidade de extrair os parâmetros de usinagem direto da máquina e, em conjunto, melhorar a programação do microcontrolador, para que, conhecendo os valores da potência elétrica do motor e os parâmetros da máquina, seja capaz de determinar o desgaste da ferramenta em tempo real.

Verificar a possibilidade de utilizar outro método de medição indireta (emissão acústica, vibração, força) em conjunto com a potência elétrica, para melhorar o desempenho da RNA.

REFERÊNCIAS

- ABBASS, J. K.; AL-HABAIBEH, A. A comparative study of using spindle motor power and eddy current for the detection of tool conditions in milling processes. **2015 IEEE 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL INFORMATICS (INDIN)**. Cambridge, United Kingdom, p. 766-770, 2015.
- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5ª Edição. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 2013.
- ANICIC, OBRAD et al. Estimation of tool wear according to cutting forces during machining procedure, **Sensor Review**, v. 38 n. 2, pp. 176-180, 2018.
- BAEK, S.; JUNG, S.; PARK, D. A study on proposal of flank wear criterion by using a built-in current sensor when manufacturing the mold materials in a smart machine tool. **International Conference on Metal Material Processes and Manufacturing (ICMMPM 2018)**. MATEC Web Conf, v. 207, 2018.
- BALIC, J. et al. Neural network for constant force control of end milling. **18th International Congress of Mechanical Engineering**. Ouro Preto: MG, Brasil, 2005.
- BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar Cruz. **Eletrônica de potência: introdução ao estudo dos conversores CC-CA**. 2ª Edição. Florianópolis: Autores Associados, 2008.
- BELFORT, Diomadson Rodrigues. **Circuito de condicionamento de sinais analógicos programável para sistemas integrados**. 2007. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2007).
- BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à análise de circuitos**. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.
- CABRAL, Marco Antonio Leandro. **Classificação automatizada de falhas tribológicas de sistemas alternativos com o uso de redes neurais artificiais não supervisionadas**. 2017. 140f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**, 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- CONSTANTINIDES, N.; BENNETT, S. An investigation of methods for on-line estimation of tool wear, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v 27, issue 2 , p. 225-237. 1987.
- CORNE, Raphael et al. Study of spindle power data with neural network for predicting real-time tool wear/breakage during inconel drilling, **Journal of Manufacturing Systems**, v. 43, Part 2, p. 287-295, apr. 2017.
- DA SILVA, Rodrigo Henriques Lopes; DA SILVA, Márcio Bacci; HASSUI, Amauri. A probabilistic neural network applied in monitoring tool wear in the end milling operation via

acoustic emission and cutting power signals. **Machining Science & Technology**, v. 20, n. 3, 2016.

DIMLA, E. D. S. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations-a review of methods. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, issue 8, p. 1073-1098, jun. 2000.

DINIZ, A.; MARCONDES, F.; COPPINI, N. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber Editora, 2014.

DROUILLET, Cyril et al. Tool life predictions in milling using spindle power with the neural network technique. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 22, p.161-168, apr. 2016.

ERTUNC, H.M.; LOPARO, K.A.; OCAK, H. Tool wear condition monitoring in drilling operations using hidden Markov models (HMMs). **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, issue 9, p. 1363-1384, jul. 2001.

FITZGERALD, Arthur Eugene; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GHOSH, N. et al. Estimation of tool wear during CNC milling using neural network-based sensor fusion. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 21, issue 1, p. 466-479, jan. 2007.

GURGEL, Fabio Meireles. **Aplicações de inversores eletrônicos da indústria nacional: a contribuição brasileira**. 2009. 120f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.

HAYKIN, Simon. **Neural networks: a comprehensive foundation**. 2.Ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1999.

KHAJAVI, M. N.; NASERNIA, E.; ROSTAGHI, M. Milling tool wear diagnosis by feed motor current signal using an artificial neural network. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 30, issue 11, p. 4869–4875, nov. 2016.

KIM, H.Y et al. Real-time drill wear estimation based on spindle motor power. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 124, Issue 3, p 267-273, jun. 2002.

KLOCKE, Fritz. **Manufacturing processes 1 – cutting**. Springer, 2011.

KÖNIG W., **Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren**. Dusseldorf, VDI – Verlag, 471p. 1997.

KOVÁCS, Zsolt L. **Redes neurais artificiais - fundamentos e aplicações: um texto básico**. São Paulo: Colegium Cognito/Editora Edição Acadêmica, 1996.

KRISHNAKUMAR, P.; RAMESHKUMAR, K.; RAMACHANDRAN K. I. Acoustic emission-based tool condition classification in a precision high-speed machining of titanium

alloy: a machine learning approach. **International Journal of Computational Intelligence and Applications** . v. 17, n. 3, 19p. 2018.

LATHI, B. P. **Sinais e Sistemas Lineares**. 2ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2007.

LI, X. et al. Fuzzy estimation of feed-cutting force from current measurement—a case study on intelligent tool wear condition monitoring. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part c: Applications and Reviews**, vol. 34, n. 4, p. 506 – 512, nov. 2004.

LI, X. Development of current sensor for cutting force measurement in turning. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 54, n. 1, feb. 2005.

LI, X.; TSO, S. K. Drill wear monitoring based on current signals. **Wear - An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear**, v. 231, Issue 2, p. 172-178, jul. 1999.

MARCELINO, A. et al. Modelos neurais na estimação no desgaste da ferramenta na retificação de cerâmicas. **7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**. Itatiaia: RJ, Brasil, 2013.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 9 ed. São Paulo: Blucher, 2009.

MANNAN, M. A.; BROMS, S. monitoring and adaptive control of cutting process by means of motor power and current measurements. **CIRP Annals**, v. 38, Issue 1, p. 347-350, jan.1989.

NAVES, Vitor Tomás Gimarães. **Estudo da usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos ligados (crcusn e crcusmo) e vermicular classe 350 no fresamento frontal em alta velocidade de corte**. 2009. 145f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2009.

OST, Charles Antonio. **Análise da qualidade superficial no fresamento de aço P20 com ferramentas com diferentes tratamentos e condições de lubrificarrefrigerantes**. 2016. 103f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul - Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica, Caxias do Sul, 2016.

PATRA, P.; PAL, S. K.; BHATTACHARYYA, K. Artificial neural network based prediction of drill flank wear from motor current signal. **Applied Soft Computing**. v. 7, issue 3, p. 929-935, june 2007.

PERTENCE JÚNIOR, Antônio. **Amplificadores operacionais e filtros ativos**. 6ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2003.

PONTES, Fabrício José. **Predição da vida de ferramentas e da rugosidade da peça por Redes Neurais RBF projetadas com uso da Metodologia de Projeto de Experimentos**. 2006. 166p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Itajubá,2006.

QINGXIAN ZEMING LANGXI ELECTRONIC. **ZMPT101B Current-type Voltage Transformer**. Disponível em:

<http://5nr0rwxhmqqijik.leadongcdn.com/attachment/kjilKBmoioSRqlkqjoipSR7ww7fgzb73m/ZMPT101B-specification.pdf>. Acesso em: 09 Maio 2020.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

RAD, J. S. et al. Online tool wear monitoring and estimation using power signals and S-transform. **2013 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)**. Nice, France, 2013.

RIVERO, A.; LÓPEZ DE LACALLE, L. N.; LUZ PENALVA, M. Tool wear detection in dry high-speed milling based upon the analysis of machine internal signals. **Mechatronics**. Vol.18, Issue 10, p. 627-633, dec. 2008.

ROSITO, Fernando Covolan. **Desenvolvimento da modulação *space vector* para um inversor trifásico multinível híbrido assimétrico de nove níveis por fase com ponte-h em cascata**. 2017. 198f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul - Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica, Caxias do Sul, 2017.

SANTOS, Marcelo Otávio dos. **Modelagem numérica e experimental dos erros térmicos de um centro de usinagem CNC 5 eixos**. 2018. 385p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

SANTOS, M. T.; ALMEIDA, A. R.; TU, C. C. C. Redes Neurais Artificiais Aplicadas no Monitoramento da Condição de Ferramentas de Corte Utilizando Algoritmo de Extração das Características SFS. **Proceedings of the IV Brazilian Conference on Neural Networks - IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais**. São José dos Campos, Brazil, July, p.292-297, 1999.

SHANKAR, S.; MOHANRAJ, T.; RAJASEKAR, R. Prediction of cutting tool wear during milling process using artificial intelligence techniques. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 32, n. 2, p. 174-182, 2019.

SHAO, H.; WANG, H.L.; ZHAO, X.M. A cutting power model for tool wear monitoring in milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, 14 ed., p. 1503-1509, 2004.

SHI, K. N. et al. A novel energy consumption model for milling process considering tool wear progression. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, Issue 20, p. 152-159, May 2018.

SILVA, Rodrigo Henriques Lopes da. **Monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais**. 2010. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2010.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 6ª Edição. Florianópolis: UFSC/FEPese, 2005.

TOCCI, R.; WIDMER, N.; MOSS, G. **Sistemas digitais: princípios e aplicações**. 10.ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

TOLEDO, José Veríssimo Ribeiro de. **Estudo do acabamento superficial no fresamento de faceamento do aço ABNT 1045 com ferramenta alisadora**. 2015. 100 p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

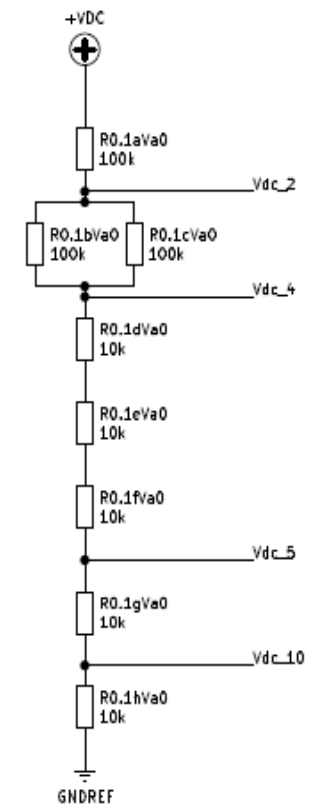
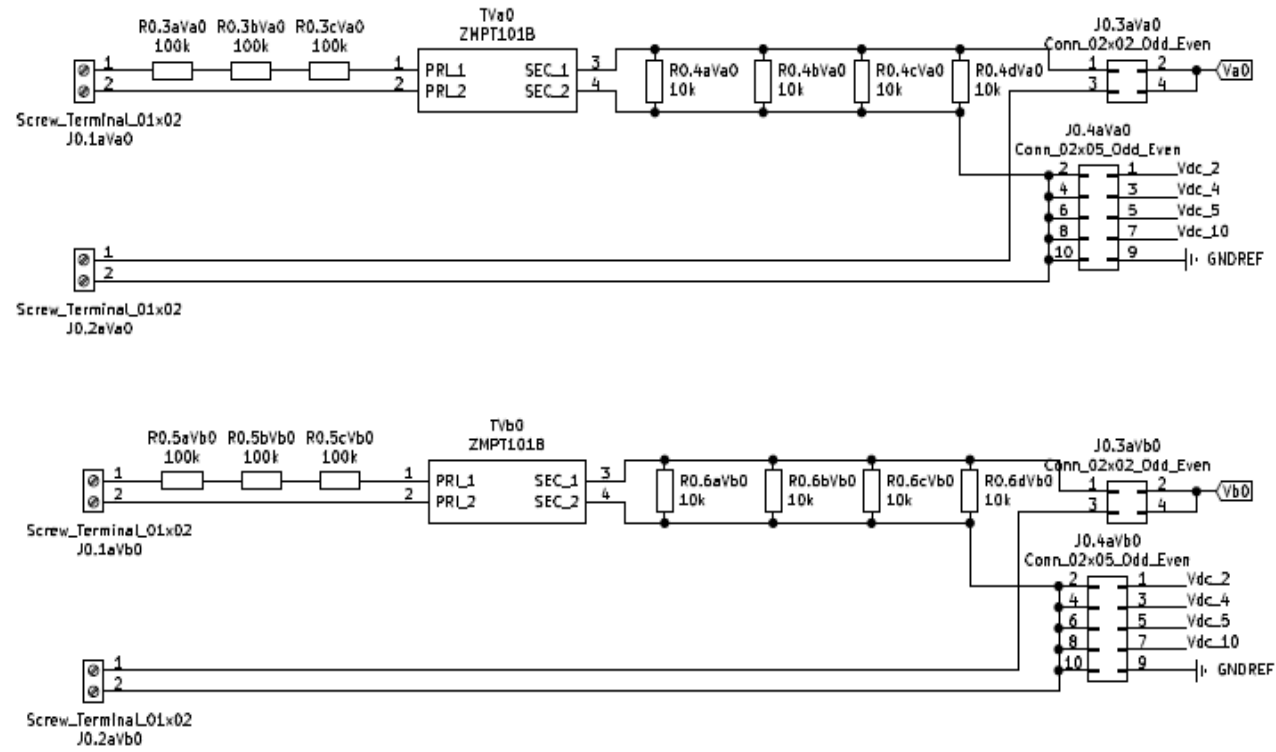
XIE, Z.; LI, J.; LU, Y. An integrated wireless vibration sensing tool holder for milling tool condition monitoring. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, p.2885–2896, 2018.

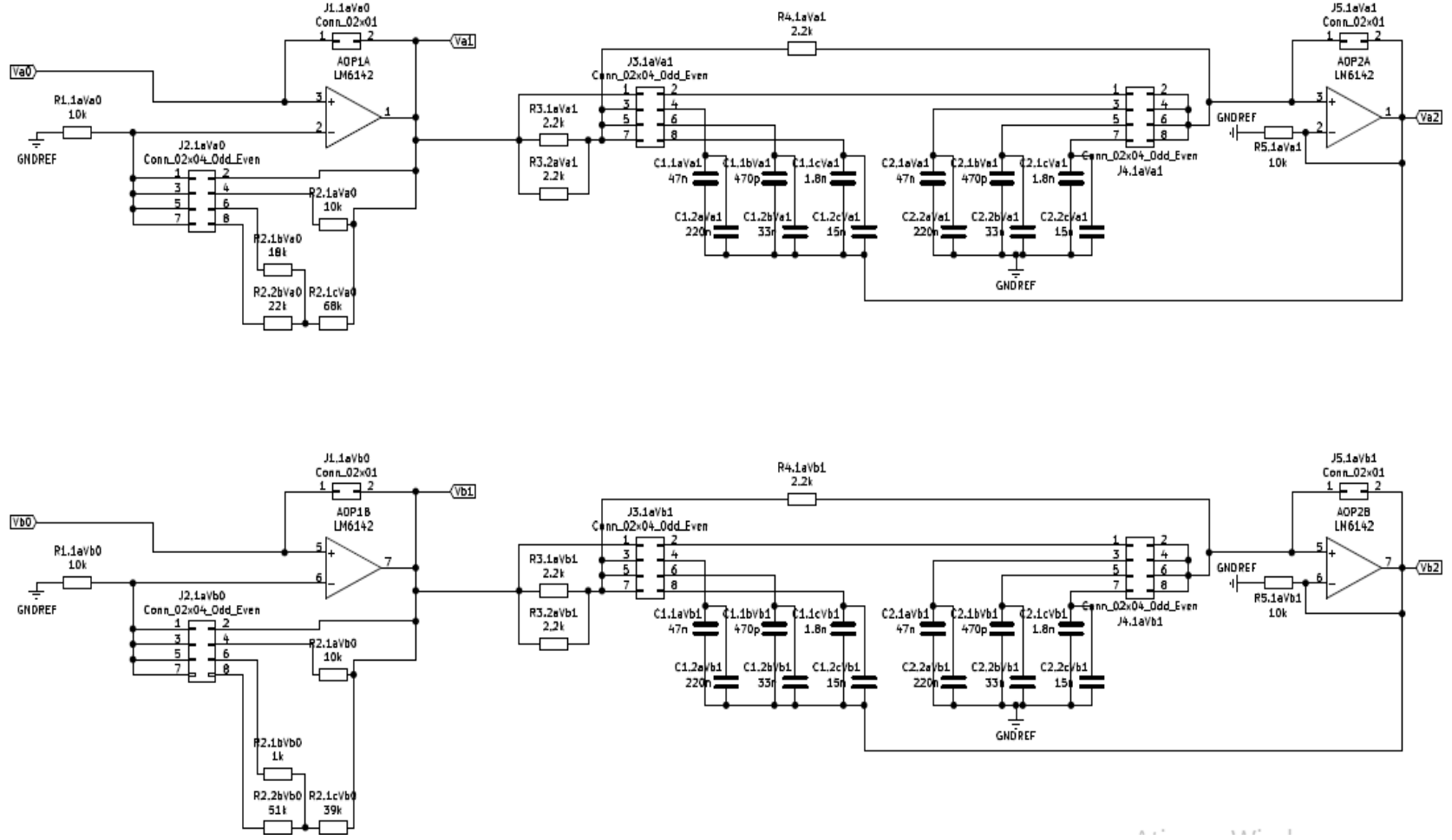
YHDC. **Split core current transformer**. Disponível em: https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/Datasheet_SCT013.pdf. Acesso em: 09 Maio 2020.

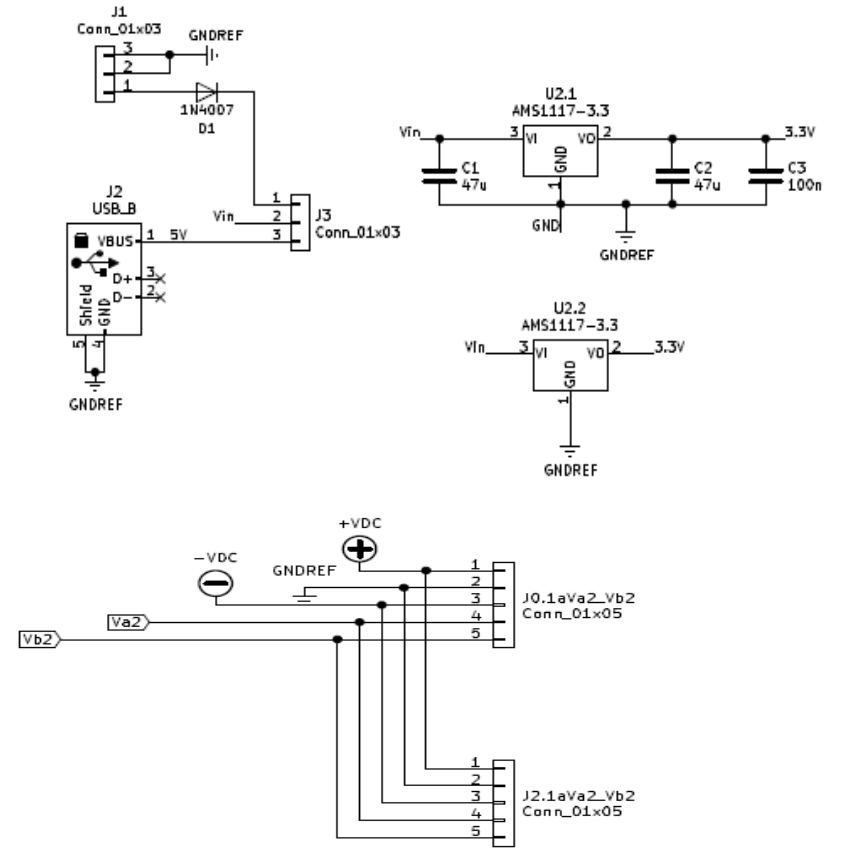
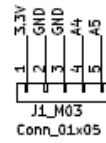
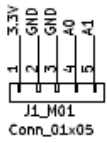
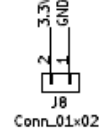
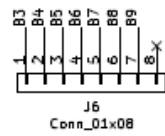
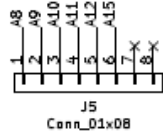
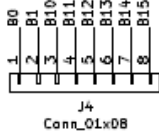
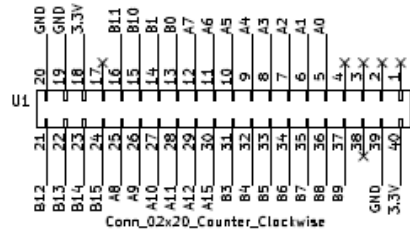
ZHANG, D. et al. On-line monitoring of tool breakage using spindle current in milling, **1st Asia–Pacific and 2nd Japan–China International Conference Progress of Cutting and Grinding**, Shanghai, China, sep., p.270–276. 1994.

ZEILMANN R. P. et al. Análise do desgaste de ferramentas no fresamento de acabamento do aço d2 endurecido. **8º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes**. São Paulo, 2010.

APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.







APÊNDICE B – DADOS PARA TREINAMENTO DA RNA UTILIZANDO A PRIMEIRA FERRAMENTA DE 6 MM.

Potência (W)									Desgaste (mm)
Velocidade de Corte									
60 m/min			75 m/min			90 m/min			
Avanço por Gume			Avanço por Gume			Avanço por Gume			
0,02 mm/gume	0,04 mm/gume	0,6 mm/gume	0,02 mm/gume	0,04 mm/gume	0,6 mm/gume	0,02 mm/gume	0,04 mm/gume	0,6 mm/gume	
Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Condição 5	Condição 6	Condição 7	Condição 8	Condição 9	
120,549	123,514	123,156	100,217	104,860	107,843	94,866	99,165	101,242	0,0255
123,589	126,568	124,431	102,757	109,032	109,848	95,218	101,527	103,757	0,0305
123,146	125,995	125,557	103,354	109,535	111,404	96,036	100,941	104,171	0,0374
123,166	122,996	125,908	105,210	109,953	108,354	96,051	100,942	107,637	0,0453
123,849	124,393	127,554	105,810	110,146	110,384	97,366	102,088	107,868	0,0544
122,538	124,459	127,661	105,026	110,425	111,982	97,629	102,202	106,557	0,0648
124,026	126,825	128,355	107,001	111,566	112,151	99,347	104,229	107,747	0,0710
122,356	126,049	129,095	104,475	111,421	112,321	98,215	102,934	109,022	0,0803
122,469	128,089	129,436	104,851	111,539	113,078	99,231	103,271	109,700	0,0902
122,338	128,295	130,162	104,317	111,747	113,680	99,690	104,017	110,596	0,0983

123,020	128,691	131,167	104,717	112,100	114,471	100,390	104,970	111,167	0,1079
123,897	129,474	131,869	105,439	112,584	115,041	101,356	105,701	111,871	0,1229
124,345	130,032	132,094	105,641	113,033	115,844	102,220	105,906	112,145	0,1356
124,778	130,156	132,573	106,720	113,384	116,702	102,592	106,536	113,059	0,1430
124,980	130,569	133,993	107,926	114,280	117,491	103,104	107,086	113,752	0,1615
125,889	131,189	134,778	108,800	115,003	118,325	103,789	108,123	114,802	0,1789
126,521	132,249	135,388	109,497	116,000	119,080	104,722	109,026	115,227	0,1951
127,064	133,225	135,969	109,694	116,394	119,584	105,251	109,734	115,718	0,2112
127,028	134,536	137,035	110,552	117,190	120,586	106,072	110,912	116,037	0,2194

Fonte: O Autor (2020).

APÊNDICE C – DADOS PARA TREINAMENTO DA RNA UTILIZANDO A FERRAMENTA DOIS DE 6 MM.

Potência (W)									Desgaste (mm)
Velocidade de Corte									
60 m/min			75 m/min			90 m/min			
Avanço por Gume			Avanço por Gume			Avanço por Gume			
0,02 mm/gume	0,04 mm/gume	0,6 mm/gume	0,02 mm/gume	0,04 mm/gume	0,6 mm/gume	0,02 mm/gume	0,04 mm/gume	0,6 mm/gume	
Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Condição 5	Condição 6	Condição 7	Condição 8	Condição 9	
124,858	122,936	123,936	104,024	107,480	108,828	96,821	97,873	103,188	0,0261
124,674	123,663	126,411	106,836	108,182	110,731	97,714	99,986	104,003	0,0291
121,790	125,611	126,081	105,371	106,521	109,371	98,019	101,142	104,844	0,0329
122,855	125,268	127,931	105,356	107,245	112,383	98,806	101,772	104,998	0,0397
123,220	125,992	130,430	104,834	107,403	112,615	99,964	102,404	106,060	0,0466
123,393	126,270	127,485	104,090	107,937	112,704	99,183	102,997	106,376	0,0569
124,710	126,123	127,761	105,669	108,852	113,160	98,198	102,933	107,133	0,0666
124,990	129,275	129,230	105,006	108,150	113,818	100,353	104,143	107,555	0,0773
125,262	129,894	129,451	105,612	109,007	114,838	100,655	104,449	108,574	0,0888
125,543	129,961	129,669	106,663	110,756	114,939	101,741	104,572	109,620	0,1058

126,121	131,527	131,810	107,899	111,768	116,370	104,002	106,452	110,903	0,1166
124,347	132,513	132,245	109,829	112,448	117,067	102,779	107,987	109,658	0,1235
126,516	133,894	132,613	111,609	113,011	118,562	103,542	108,823	110,748	0,1324
126,018	134,424	133,216	111,705	113,847	120,931	105,625	108,649	112,437	0,1404
127,533	136,125	134,612	112,107	115,574	119,903	107,262	110,852	111,474	0,1547
127,915	135,268	134,732	114,752	115,982	119,291	108,376	110,696	112,793	0,1688
128,403	134,595	136,754	114,675	117,472	122,054	107,829	111,874	114,591	0,1732
129,367	134,326	136,924	114,895	118,023	121,317	109,322	114,177	115,804	0,1825
130,072	134,707	135,006	113,889	118,123	123,327	110,618	115,707	116,120	0,1937
130,120	135,520	137,189	116,003	119,132	123,435	111,342	116,555	117,160	0,2101

Fonte: O Autor (2020).

APÊNDICE D – DADOS PARA TREINAMENTO DA RNA UTILIZANDO OS INSERTOS.

Potência (W)									Desgaste (mm)
Velocidade de Corte									
105,6 m/min			132 m/min			158,4 m/min			
Avanço por Gume			Avanço por Gume			Avanço por Gume			
0,06 mm/gume	0,09 mm/gume	0,12 mm/gume	0,06 mm/gume	0,09 mm/gume	0,12 mm/gume	0,06 mm/gume	0,09 mm/gume	0,12 mm/gume	
Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Condição 5	Condição 6	Condição 7	Condição 8	Condição 9	
121,714	127,063	141,903	150,127	165,079	173,558	214,015	220,660	233,082	0,0831
122,116	128,766	143,510	164,020	175,099	179,664	225,434	241,251	243,134	0,1009
124,621	143,503	150,639	179,346	186,811	210,613	233,934	269,198	279,922	0,1068
125,365	148,789	160,366	179,935	204,063	210,891	252,002	271,405	283,166	0,1127
123,347	144,956	160,140	177,760	203,999	207,260	249,554	268,487	282,917	0,1217
131,554	152,470	171,744	183,373	206,095	218,220	252,170	277,047	283,536	0,1335
135,737	154,352	173,211	184,304	215,760	220,540	257,652	277,503	290,905	0,1394
148,200	167,263	181,025	198,469	225,039	226,029	264,509	287,195	299,476	0,1543
155,678	175,010	185,714	206,968	230,606	229,323	268,623	293,009	304,619	0,1632

161,899	184,442	192,069	216,449	242,671	240,638	286,136	309,132	314,967	0,1662
164,325	185,243	201,896	218,229	244,754	249,683	287,363	310,238	322,963	0,1899
165,167	185,789	202,184	218,799	245,276	250,030	287,703	310,974	323,407	0,1989
163,635	184,362	206,355	212,978	244,632	256,872	289,159	294,027	332,013	0,2019
165,988	192,169	216,224	213,366	253,956	258,326	290,296	309,642	340,510	0,2314

Fonte: O Autor (2020).

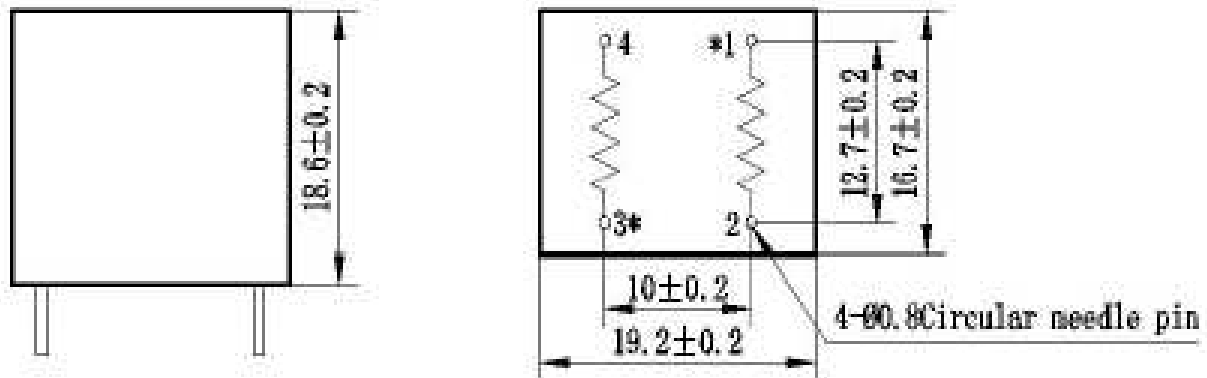
ANEXO A- TRANSFORMADOR DE POTENCIAL

Qingxian Zeming Langxi Electronic

www.micro-transformer.com

ZMPT101B**Current-type Voltage Transformer**

Small size, high accuracy, good consistency, for voltage and power measurement

Structural parameters:

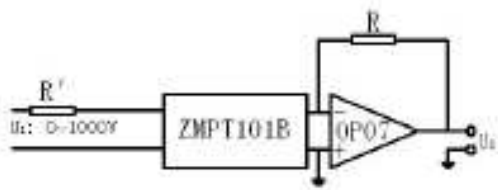
Remarks: primary input: 1, 2 pins secondary output: 3, 4pins
 Or
 primary input: 3, 4 pins secondary output: 1, 2pins
 *** Same polarity

Front view

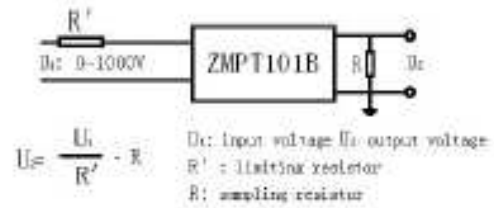
Bottom view

The main technical parameters:

Model	ZMPT101B
Rated input current	2mA
Rated output current	2mA
turns ratio	1000:1000
phase angle error	±20' (Input 2mA, sampling resistor 100Ω)
operating range	0~1000V 0~10mA (sampling resistor 100Ω)
linearity	±0.2%(20%dot~120%dot)
Permissible error	-0.3%≤f≤+0.2% (Input 2mA, sampling resistor 100Ω)
Isolation voltage	4000V
application	voltage and power measurement
Encapsulation	Epoxy
Installation	PCB mounting (Pin Length>3mm)
Operating temperature	-40℃~+60℃
Case Material	ABS (Note: ABS CASE Is NOT available for wave-soldering)

Direction for use:**Figure I**

1. The typical usage of the product is for the active output (Figure I). R' is a limiting resistor, R is a sampling resistor.
2. The product can be directly through the resistance sampling, easy to use (Figure II).

**Figure II**

$$U_o = \frac{U_i}{R'} \cdot R$$

U_i : input voltage U_o : output voltage
 R' : limiting resistor
 R : sampling resistor

ANEXO B – TRANSFORMADOR DE CORRENTE

Split-Core Current Transformer



Model: SCT-013 Series

Characteristics: Opening size: 13mm×13mm
 Non-linearity±3% (10%—120% rated input current)
 1.5m leading wire, Diagram for standard three-output
 Current output type or Voltage output type
 (Voltage output type built-in sampling resistor)

Purpose: Suitable for the current measuring
 monitoring and protection of AC motor
 lighting equipment air compressor and so on

Core material: Ferrite

Mechanical strength: The number of switching is not less than 1000 times
 (Test under 20°C).

Safety index: Dielectric strength 6000V AC/1min

Fire resistance property: in accordance with UL94-VO

Working temperature: -25°C—+70°C

Outline size diagram: (in mm)

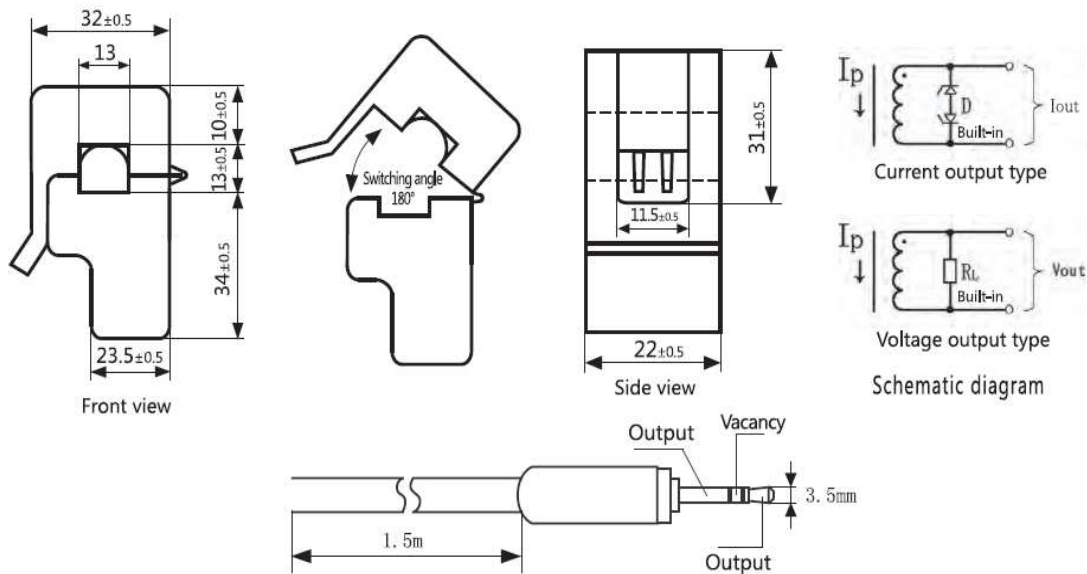


Diagram for standard three-pin plug

Table of technical parameters:

Model	SCT-013-000	SCT-013-005	SCT-013-010	SCT-013-015	SCT-013-020
Input current	0-100A	0-5A	0-10A	0-15A	0-20A
Output mode	Current/33mA	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V
Model	SCT-013-025	SCT-013-030	SCT-013-050	SCT-013-060	SCT-013-070
Input current	0-25A	0-30A	0-50A	0-60A	
Output mode	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V	

Output mode: Voltage output type built-in sampling resistor; Current output type built-in protective diode;
 Forbidden to be opening operating for current type.