RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a) o texto completo desta Tese será disponibilizado somente a partir de 07/01/2023.

REINALDO GÖTZ DE OLIVEIRA JUNIOR

SISTEMA DE MEDIDA DE FORÇAS DINÂMICAS UTILIZANDO DIAFRAGMAS PIEZELÉTRICOS PARA ESTUDOS DOS MECANISMOS DE CORTE DE UM ÚNICO GRÃO ABRASIVO VISANDO A OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Bauru, SP
2022

REINALDO GÖTZ DE OLIVEIRA JUNIOR

SISTEMA DE MEDIDA DE FORÇAS DINÂMICAS UTILIZANDO DIAFRAGMAS PIEZELÉTRICOS PARA ESTUDOS DOS MECANISMOS DE CORTE DE UM ÚNICO GRÃO ABRASIVO VISANDO A OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru - Unesp, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação.
Linha de pesquisa: Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar.

Bauru, SP
2022

Oliveira Junior, Reinaldo Götz de.
Sistema de Medida de Forças Dinâmicas Utilizando Diafragmas Piezelétricos para Estudos dos Mecanismos de Corte de um Único Grão Abrasivo Visando a Otimização do Processo de Retificação / Reinaldo Götz de Oliveira Junior, 2022
109 f. : il.

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2022

1. Processo de retificação. 2. Diafragma piezelétrico. 3. Medida de força. 4. Método de calibração. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE REINALDO GÖTZ DE OLIVEIRA JUNIOR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 07 dias do mês de janeiro do ano de 2022, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de REINALDO GÖTZ DE OLIVEIRA JUNIOR, intitulada **SISTEMA DE MEDIDA DE FORÇAS DINÂMICAS UTILIZANDO DIAFRAGMAS PIEZELÉTRICOS PARA ESTUDOS DOS MECANISMOS DE CORTE DE UM ÚNICO GRÃO ABRASIVO VISANDO A OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**. A Comissão Examinadora foi constituida pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Eletrica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Eletrica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. JOSÉ ALFREDO COVOLAN ULSON (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Eletrica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo / USP - São Carlos, Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de Uberlândia. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR

Dedico este trabalho à minha família

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pelo dom da vida.

Aos meus pais, Reinaldo e Lucy, pelo amor incondicional que transborda de seus corações.

À minha esposa, Ana Paula, por todas as alegrias que compartilhamos.

Aos meus filhos, Lúcio e Pedro, por serem luz em minha vida.

Aos meus irmãos, Luciana e Rodrigo, por quem tenho imenso amor.

À minha sobrinha, Luisa, a quem desejo toda a felicidade do mundo.

À minha sogra, Sra. Olinda, pelo amor dedicado à nossa família.

Ao meu orientador de doutorado, Professor Dr. Paulo Roberto de Aguiar, por suas valiosas lições, sua amizade e sua dedicação exemplar à pesquisa acadêmica.

Ao meu orientador de mestrado, Professor Dr. Taufik Abrão, por acreditar em meu trabalho e ter me conduzido ao título de mestre.

Ao Professor Me. Cezar José Sant'Anna, por ter me concedido a oportunidade de ingressar no universo da pesquisa acadêmica, através da iniciação científica.

Aos membros da Comissão Examinadora, pela disponibilidade e pelas importantes contribuições para o aprimoramento deste trabalho.

Ao amigo Hélio Aparecido de Souza, Assistente de Suporte Acadêmico, e ao Professor Dr. Thiago Valle França, por tornarem possível a realização dos ensaios no Laboratório CNC.

Ao Sr. Ayres Dionísio Brighenti, pelos notáveis serviços de usinagem das peças empregadas no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Antônio José dos Santos, Wilson José Garcia, Edson Gaspar, Vitor Hugo Simões Dias, Fábio Mossato Dias e a todos os demais companheiros de trabalho na Universidade de São Paulo, por estarem ao meu lado, compartilhando conhecimento, sabedoria, lutas e vitórias.

Ao amigo Lúcio César Candioto, que desde a infância divide comigo a esperança de vivermos em uma sociedade justa e fraterna.

A todos os amigos com quem tive a honra de conviver nas salas de aula e nos laboratórios da Universidade Estadual Paulista. Os nomes de cada um de vocês estão em meu coração.

Resumo

O estudo das forças presentes no processo de retificação possibilita o entendimento do mecanismo de remoção de material e a otimização dos parâmetros envolvidos nesse processo. As características construtivas da ferramenta de corte, que influem na sua eficiência e na qualidade da superfície da peça retificada, são em parte determinadas pelas forças que atuam no sistema abrasivo-ligante. Nesta tese de doutorado, é proposto um sistema de medida de forças dinâmicas como apoio nos estudos dos mecanismos de corte de um único grão abrasivo. Tal sistema de medida, construído a partir de diafragmas piezelétricos de baixo custo, é capaz de medir as componentes de força normal e tangencial presentes no processo de retificação plana. Também é apresentado aqui um método de calibração para o sistema de medida desenvolvido, que se fundamenta na Segunda Lei de Newton e que propõe o emprego de um sistema multissensor para o cálculo do impulso de força, decorrente do impacto de uma esfera metálica lançada em queda livre. O erro relativo apresentado pelo sistema de medida é de 4,62 % para a componente de força normal e de 6,47 % para a componente de força tangencial. Com base nas respostas em magnitude e frequência, o sistema de medida de forças, que inclui um circuito condicionador de sinais projetado com a configuração de um amplificador de carga, demonstra-se apropriado aos testes de riscamento a que fora submetido. O sistema também apresenta um bom compromisso entre custo e benefício, tendo seu custo de produção equivalente a 5,6 % do valor comercial do sistema usado como referência nos testes de calibração.

Palavras-chave: Processo de retificação. Diafragma piezelétrico. Medida de força. Método de calibração.

Abstract

The study of the forces present in the grinding process enables the understanding of the material removal mechanism and the optimization of the cutting parameters governing this process. The constructive characteristics of the cutting tool, which influence its efficiency and the surface quality of the machined workpiece, are partly determined by the forces acting on the abrasive-binder system. In this PhD thesis, a dynamic force measurement system is proposed as an auxiliary tool in the study of cutting mechanisms of a single abrasive grit. Such a measurement system, built from low-cost piezoelectric diaphragms, is capable of measuring the normal and tangential component forces acting in the peripheral surface grinding process. It is also presented here a calibration method for the developed measurement system, which is based on Newton's Second Law and proposes the use of a multisensor system for calculating the force impulse, due to the impact of a metallic sphere launched in free fall. The relative error presented by the measurement system is of 4.62 % for the normal force component and 6.47 % for the tangential force component. Based on the magnitude and frequency responses, the force measurement system, which includes a signal conditioning circuit designed in the configuration of a charge amplifier, proved to be appropriate for the scratching tests to which it was submitted. The system also presents a good compromise between cost and benefit, having its production cost equivalent to 5.6 % of the commercial value of the system used as a reference in the calibration tests.

Keywords: Grinding. Piezoelectric diaphragm. Force measurement. Calibration method.

Lista de Figuras

Figura 1 – Parâmetros do processo de retificação tangencial plana: velocidade angular do rebolo ω_s, velocidade periférica v_s, velocidade da peça v_w, diâmetro do rebolo d_s, largura de contato b_w e profundidade de corte programada a_p. Figura adaptada de (ROWE, 2014, cap. 2). 34

Figura 2 – Parâmetros do processo de retificação tangencial plana: profundidade de corte real a_e, comprimento de contato l_c, deflexão x e componentes de força de retificação F_n e F_t. Figura adaptada de (MALKIN; GUO, 2008, p. 119). 35

Figura 3 – Diafragma piezelétrico. Figura adaptada de (MURATA MANUFACTURING, 2018, p. 23). 42

Figura 4 – Símbolo padrão do amplificador operacional. Figura adaptada de (SEDRA; SMITH, 2015, p. 60). 44

Figura 5 – Magnitude do ganho de um amp-op com compensação de frequência. Figura adaptada de (SEDRA; SMITH, 2015, p. 105). 45

Figura 6 – Circuito amplificador não-inversor. Figura adaptada de (OLJACA; SURTIHADI, 2010a, p. 21). 46

Figura 7 – Diagrama de blocos de um circuito amplificador não-inversor. Figura adaptada de (OLJACA; SURTIHADI, 2010a, p. 22). 47

Figura 8 – Diagrama de Bode comparando o ganho de um circuito amplificador realimentado ao ganho em malha aberta de um amp-op. Figura adaptada de (SEDRA; SMITH, 2015, p. 877). 48

Figura 9 – Circuito amplificador inversor. Figura adaptada de (OLJACA; SURTIHADI, 2010a, p. 21). 48

Figura 10 – Diagrama de blocos de um circuito amplificador inversor. Figura adaptada de (OLJACA; SURTIHADI, 2010a, p. 23). 49

Figura 11 – Circuitos equivalentes de um transdutor piezelétrico. Figura adaptada de (SERRIDGE; LICHT, 1987, p. 26). 51

Figura 12 – Circuito amplificador de tensão (eletrômetro). Figura adaptada de (SERRIDGE; LICHT, 1987, p. 55). 52

Figura 13 – Circuito amplificador de carga. Figura adaptada de (SERRIDGE; LICHT, 1987, p. 40). 53

Figura 14 – Modelo de circuito do fotodiodo. Figura adaptada de (GRAEME, 1995, p. 5). 55

Figura 15 – Circuito básico do amplificador de transimpedância. Figura adaptada de (GRAEME, 1995, p. 30). 56

Figura 16 – Ganho em malha aberta do amp-op, ganho de corrente do circuito amplificador para fotodiodo e curva $1/\beta$. Figura adaptada de (GRAEME, 1995, p. 40). 57
Figura 17 – Circuito do amplificador de transimpedância com compensação de frequência. Figura adaptada de (GRAEME, 1995, p. 42). 58
Figura 18 – Ganho em malha aberta do amp-op e curva $1/\beta$ com compensação e sem compensação de frequência. Figura adaptada de (GRAEME, 1995, p. 46). 59
Figura 19 – Perspectiva explodida do sensor de força uniaxial. Fonte: Autor. 61
Figura 20 – Seção transversal do sensor de força uniaxial. Fonte: Autor. 62
Figura 21 – Sistema de medida de forças biaxial. Fonte: Autor. 63
Figura 22 – Dimensões em milímetros do sistema de medida de forças biaxial. Fonte: Autor. 64
Figura 23 – Circuito condicionador de sinais para sensores de força uniaxiais. Fonte: Autor. 65
Figura 24 – Placa de circuito impresso do condicionador de sinais. Fonte: Autor. . . 65
Figura 25 – Curva teórica de resposta em frequência do circuito condicionador de sinais. Fonte: Autor. 66
Figura 26 – Circuito amplificador para fotodiodo. Fonte: Autor. 68
Figura 27 – Placa de circuito impresso do amplificador para fotodiodo. Fonte: Autor. 68
Figura 28 – Curva teórica de resposta em frequência do circuito amplificador para fotodiodo. Fonte: Autor. 69
Figura 29 – Sistema multissensor para a verificação do tempo de desaceleração e do tempo de contato da esfera metálica em um evento de colisão. Fonte: Autor. 70
Figura 30 – Circuito sensor de contato elétrico. Fonte: Autor. 72
Figura 31 – Variação da luminosidade sobre o sensor fotoelétrico, em função da posição da esfera metálica durante sua queda livre. Fonte: Autor. . . . 72
Figura 32 – Sinal obtido com o sensor fotoelétrico em evento de lançamento em queda livre de uma esfera metálica, compreendendo a queda, a colisão (região de interesse) e o rebote da esfera. Fonte: Autor. 73
Figura 33 – Sinal puro e sinal filtrado com sistema de média móvel, correspondentes à região de interesse mostrada na Figura 32. Fonte: Autor. 74
Figura 34 – Composição de instrumentos para testes de medida de força. Fonte: Autor. 74
Figura 35 – Sinais obtidos pelo sistema multissensor. Fonte: Autor. 75
Figura 36 – Diagrama de blocos que representa a fusão de sensores para verificação das forças médias de impacto. Fonte: Autor. 77
Figura 37 – Composição de instrumentos para a calibração do sistema de medida de forças biaxial proposto. Fonte: Autor. 79

Figura 38 – Posicionamento do sistema de medida de forças biaxial durante os testes de calibração. Fonte: Autor. 79
Figura 39 – Diagrama de blocos que representa o método de cálculo da sensitividade η de um sensor de força uniaxial. Fonte: Autor. 80
Figura 40 – Composição do teste de riscamento de uma superfície metálica com único grão abrasivo. Fonte: Autor. Modelo tridimensional do centro de usinagem CNC disponível em https://grabcad.com/library/dmu-50-2, acessado em setembro de 2021. 82
Figura 41 – Média e erro relativo dos resultados de força obtidos com o sistema multissensor de calibração. Fonte: Autor. 85
Figura 42 – Exemplos de sinais obtidos na calibração do sistema de medida de forças biaxial proposto, correspondente ao lançamento da esfera metálica a uma altura de 22,0 mm. Fonte: Autor. 88
Figura 43 – Teste de riscamento de uma peça metálica com único grão abrasivo. Fonte: Autor. 88
Figura 44 – Risco feito com profundidade de corte programada $a_{\mathrm{p}} = 10\,\mu$m. Fonte: Autor. 89
Figura 45 – Sinais de força verificados em teste de riscamento com profundidade de corte programada $a_{\mathrm{p}} = 10\,\mu$m. Fonte: Autor. 89
Figura 46 – Risco feito com profundidade de corte programada $a_{\mathrm{p}} = 20\,\mu$m. Fonte: Autor. 90
Figura 47 – Sinais de força verificados em teste de riscamento com profundidade de corte programada $a_{\mathrm{p}} = 20\,\mu$m. Fonte: Autor. 90
Figura 48 – Curva da intensidade da força F em função do tempo, e impulso J determinado pela área de $F(t)$ sobre o eixo t. Figura adaptada de (WALKER; HALLIDAY; RESNICK, 2014, p. 227). 103
Figura 49 – Perspectiva explodida do transdutor piezelétrico encapsulado. Fonte: Autor. 106
Figura 50 – Transdutor piezelétrico encapsulado. Fonte: Autor. 107

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características do Diafragma Piezelétrico 7BB-20-6 43
Tabela 2 – Características do Amplificador Operacional OPA172 64
Tabela 3 – Características do Fotodiodo BPV10 67
Tabela 4 – Características do Amplificador Operacional OPA659 67
Tabela 5 – Características do Sensor de Força 201B03 71
Tabela 6 – Resultados dos Testes de Força do Sistema Multissensor 83
Tabela 7 – Média dos Resultados dos Testes de Força do Sistema Multissensor . . 84
Tabela 8 – Resultados dos Testes de Calibração do Sistema de Medida de Forças Biaxial: Tempo de Contato, Força Média Teórica e Sensitividade 85
Tabela 9 – Resultados dos Testes de Calibração do Sistema de Medida de Forças Biaxial: Medida de Forças e Interferência Cruzada 87
Tabela 10 – Valores das Componentes de Força Média Compensada Obtidas nos Testes de Riscamento 91

Lista de Abreviaturas e Siglas

AISI	*American Iron and Steel Institute* – Instituto Americano do Ferro e do Aço
amp-op	Amplificador Operacional
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DC	*Direct Current* – Corrente Direta
EA	Emissão Acústica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP®	*Integrated Circuit Piezoelectric* – Piezelétrico com Circuito Integrado
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
LED	*Light-Emitting Diode* – Diodo Emissor de Luz
PZT	*Pb-Lead Zirconate Titanate* – Titanatozirconato de Chumbo
rpm	Rotações por minuto
SAE	*Society of Automotive Engineers* – Sociedade dos Engenheiros Automotivos
SHM	*Structural Health Monitoring* – Monitoramento de Integridade Estrutural
SMA	*Sub-Miniature version A* – Sub-Miniatura versão A
SNR	*Signal-to-Noise Ratio* – Relação Sinal-Ruído
TIA	*Transimpedance Amplifier* – Amplificador de Transimpedância

Lista de Símbolos

a_{e}	Profundidade de corte real (μm)
a_{p}	Profundidade de corte programada (μm)
A	Ganho diferencial em malha aberta do amplificador operacional (V/V)
A_0	Ganho DC em malha aberta do amplificador operacional (V/V)
A_{f}	Ganho em malha fechada do circuito amplificador realimentado (V/V)
$A_{\mathrm{f,0}}$	Ganho DC em malha fechada do circuito amplificador realimentado (V/V)
$A_{\mathrm{f,c}}$	Ganho em malha fechada do circuito amplificador de carga (V/C)
b_{w}	Largura de contato (mm)
B	Bateria
BW	Largura de banda de frequências (Hz)
C	Densidade de grãos ativos (quantidade/mm^2)
C_{c}	Capacitância do cabo (pF)
C_{d}	Capacitância do diodo (pF)
$C_{\mathrm{d,0}}$	Capacitância do diodo não polarizado (pF)
C_{f}	Capacitância de realimentação (F)
C_{i}	Capacitância total de entrada do circuito amplificador (pF)
C_{icm}	Capacitância da entrada em modo comum do amplificador operacional (pF)
C_{t}	Capacitância do transdutor piezelétrico (nF)
d_{s}	Diâmetro do rebolo (mm)
E_{mec}	Energia mecânica (J)
f	Frequência (Hz)
$f_{C_{\mathrm{f}}}$	Frequência relacionada ao polo introduzido na função de ganho de demanda pela capacitância de compensação (Hz)
f_{i}	Frequência de intersecção entre as curvas do ganho em malha aberta e da demanda de ganho (Hz)
f_{l}	Frequência de corte inferior do amplificador (Hz)
f_{p}	Frequência de polo (Hz)
f_{pc}	Frequência relacionada ao polo introduzido na função de realimentação pelas capacitâncias de entrada e de compensação (Hz)
f_{pf}	Frequência de polo do circuito amplificador realimentado (Hz)
f_{r}	Frequência de ressonância (Hz)
f_{s}	Taxa de amostragem do sistema de aquisição de sinais (amostras/s)
f_{t}	Faixa de passagem de ganho unitário (Hz)
f_{zc}	Frequência relacionada ao zero presente na função de realimentação compensada (Hz)

f_{zf}	Frequência relacionada ao zero presente na função de demanda de ganho (Hz)
F	Força (N)
F_{avg}	Força média (N)
F_{g}	Força gravitacional (N)
F_{n}	Componente de força normal (N)
$F_{\mathrm{n,avg}}^{\mathrm{comp}}$	Força média compensada no eixo normal (N)
$F_{\mathrm{n,avg}}^{\mathrm{rise}}$	Força média obtida pelo sensor de força no eixo normal (N)
$F_{\mathrm{n,ch}}$	Componente de força normal de formação do cavaco (N)
$F_{\mathrm{n,pl}}$	Componente de força normal de sulcamento (N)
$F_{\mathrm{n,sl}}$	Componente de força normal de atrito (N)
$F_{\mathrm{ref}}[n]$	Força instantânea obtida pelo sensor de referência no tempo discreto (N)
$F_{\mathrm{ref}}(t)$	Força instantânea obtida pelo sensor de referência no tempo contínuo (N)
$F_{\mathrm{ref,avg}}^{\mathrm{rise}}$	Força média obtida pelo sensor de referência (N)
F_{t}	Componente de força tangencial (N)
$F_{\mathrm{t,avg}}^{\mathrm{comp}}$	Força média compensada no eixo tangencial (N)
$F_{\mathrm{t,avg}}^{\mathrm{rise}}$	Força média obtida pelo sensor de força no eixo tangencial (N)
$F_{\mathrm{t,ch}}$	Componente de força tangencial de formação do cavaco (N)
$F_{\mathrm{t,pl}}$	Componente de força tangencial de sulcamento (N)
$F_{\mathrm{t,sl}}$	Componente de força tangencial de atrito (N)
$F_{\mathrm{th,avg}}^{\mathrm{cont}}$	Força média teórica calculada através do período de contato (N)
$F_{\mathrm{th,avg}}^{\mathrm{dec}}$	Força média teórica calculada através do período de desaceleração (N)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
h	Altura (mm)
h_{cu}	Profundidade de penetração do grão abrasivo (μm)
$h_{\mathrm{cu,avg}}$	Espessura média do cavaco (mm)
h_{eff}	Profundidade efetiva de corte (μm)
h_{eq}	Espessura equivalente do cavaco (mm)
h_{reb}	Altura de rebote (mm)
i	Corrente elétrica (A)
i_{p}	Corrente elétrica gerada no fotodiodo (A)
j	Unidade imaginária
J	Impulso de força (N·s)
$k_{\mathrm{n,t}}$	Fator de interferência do eixo tangencial sobre o sensor de força do eixo normal
$k_{\mathrm{t,n}}$	Fator de interferência do eixo normal sobre o sensor de força do eixo tangencial
K	Energia cinética (J)
l_{c}	Comprimento de contato real (mm)

l_{g}	Comprimento de contato geométrico (mm)
L	Espaçamento médio entre grãos ativos (mm)
L'_{L}	Impedância indutiva equivalente de carga (Ω)
m	Massa (g)
N	Quantidade total de amostras no tempo discreto
p	Momento linear (kg·m/s)
p_{f}	Momento linear final (kg·m/s)
p_{i}	Momento linear inicial (kg·m/s)
P	Potência total de retificação (N·m/s)
Q	Taxa de remoção de material (mm^3/s)
Q'	Taxa de remoção específica (mm^3/mm·s)
Q_{t}	Quantidade de carga elétrica gerada pelo transdutor piezelétrico (C)
r	Razão entre largura e profundidade de corte do grão abrasivo médio
R_{c}	Resistência de isolamento do cabo (Ω)
R_{d}	Resistência da junção do diodo (Ω)
R_{f}	Resistência de realimentação (Ω)
R_{i}	Resistência total de isolamento da entrada do circuito amplificador (Ω)
R_{icm}	Resistência da entrada em modo comum do amplificador operacional (Ω)
R_{id}	Resistência da entrada em modo diferencial do amplificador operacional (Ω)
R_{in}	Resistência de isolamento da entrada do circuito amplificador (Ω)
R_{L}	Resistência de carga (Ω)
R'_{L}	Resistência equivalente de carga (Ω)
R_{s}	Resistência em série do diodo (Ω)
R_{t}	Resistência de isolamento do transdutor piezelétrico (Ω)
$R_{\mathrm{w,a}}$	Rugosidade média da peça (μm)
$R_{\mathrm{w,t}}$	Rugosidade total da peça (μm)
s	Frequência angular complexa
S	Chave elétrica
t	Instante de tempo (s)
t_{f}	Instante de tempo final (s)
t_{i}	Instante de tempo inicial (s)
T_{A}	Temperatura ambiente (°C)
T_{rise}	Tempo de subida do sinal elétrico (μs)
u	Energia específica de corte (J)
u_{ch}	Energia específica de formação do cavaco (J)
u_{pl}	Energia específica de sulcamento (J)
u_{sl}	Energia específica de atrito (J)
U_{g}	Energia potencial gravitacional (J)
v	Velocidade (m/s)

v_{err}	Tensão de erro de ganho (V)
v_{f}	Tensão de realimentação (V)
v_{i}	Tensão de entrada do amplificador (V)
v_{o}	Tensão de saída do amplificador (V)
v_{s}	Velocidade periférica do rebolo (m/s)
v_{t}	Tensão verificada nos eletrodos do transdutor piezelétrico (V)
$v_{\mathrm{t,0}}$	Tensão verificada nos eletrodos do transdutor piezelétrico imediatamente após a geração de carga (V)
v_{w}	Velocidade da peça (m/s)
$V_{\mathrm{axis}}[n]$	Tensão instantânea produzida pelo sensor de força do eixo normal ou tangencial no tempo discreto (V)
V_{rev}	Tensão de polarização reversa do diodo (V)
x	Deflexão do mecanismo de retificação (mm)
$X_{C_{\mathrm{i}}}$	Reatância capacitiva de entrada do amplificador de transimpedância (Ω)
Z'_{L}	Impedância equivalente de carga (Ω)
Z_{TIA}	Ganho de transimpedância (V/A)
α	Fator de ponderação da entrada do circuito amplificador inversor
β	Fator de realimentação do circuito amplificador
δ	Erro relativo
ΔE_{mec}	Variação da energia mecânica (J)
ΔK	Variação da energia cinética (J)
Δp	Variação do momento linear (kg·m/s)
Δt	Período de tempo (s)
Δt_{cont}	Período de tempo de contato (μs)
Δt_{dec}	Período de tempo de desaceleração (μs)
ΔU	Variação da energia potencial (J)
Δv	Variação da velocidade (m/s)
ζ	Taxa de amortecimento do pico de resposta do amplificador de transimpedância
η	Sensitividade do sensor uniaxial (mV/N)
μ	Coeficiente da condição de corte do rebolo
ρ	Resistência específica (Ω·m)
τ	Constante de tempo (s)
ϕ	Desvio de fase (rad)
$\phi_{C_{\mathrm{f}}}$	Desvio de fase introduzido pela capacitância de compensação (rad)
ϕ_{p}	Desvio de fase na frequência de polo (rad)
ϕ_{TIA}	Desvio de fase do amplificador de transimpedância (rad)
φ_{b}	Tensão da barreira de potencial do diodo (V)
ω	Frequência angular (rad/s)

ω_{p}	Frequência angular de polo (rad/s)
ω_{s}	Velocidade angular do rebolo (rad/s)
$\mathrm{arctg}(\cdot)$	Operador arco tangente
$\mathrm{d}(\cdot)$	Operador derivada
$\log_{10}(\cdot)$	Operador logaritmo decimal
$\mathrm{tg}(\cdot)$	Operador tangente
$\int(\cdot)$	Operador integral
$\lvert\cdot\rvert$	Operador valor absoluto
$\lVert$	Associação de resistências em paralelo

Sumário

1 Introdução 29
1.1 Objetivos 30
1.2 Organização do Texto 30
2 Revisão Bibliográfica 33
2.1 O Processo de Retificação e os seus Parâmetros 33
2.1.1 Velocidades de Corte 33
2.1.2 Profundidade de Corte Programada e Largura de Contato 33
2.1.3 Densidade e Espaçamento Médio de Grãos Ativos 33
2.1.4 Profundidade de Corte Real 34
2.1.5 Comprimento de Contato 35
2.1.6 Taxa de Remoção de Material 35
2.1.7 Taxa de Remoção Específica 35
2.1.8 Espessura Equivalente do Cavaco 36
2.1.9 Espessura Média do Cavaco 36
2.1.10 Rugosidade da Peça 36
2.1.11 Força, Potência e Energia Específica 37
2.1.12 Mecanismo da Remoção de Material 38
2.2 Instrumentação do Processo de Retificação 39
2.2.1 Sensores para Medida de Forças 39
2.2.2 Efeito Piezelétrico 41
2.2.3 Diafragma Piezelétrico 41
2.2.4 O Amplificador Operacional 43
2.2.4.1 Ganho em Malha Aberta de Amplificadores Operacionais Reais 44
2.2.4.2 Circuito Amplificador Não-inversor 46
2.2.4.3 Circuito Amplificador Inversor 48
2.2.4.4 Resposta de Fase 49
2.2.5 Circuitos Amplificadores para Sensores Piezelétricos 50
2.2.5.1 Propriedades dos Sensores Piezelétricos 50
2.2.5.2 Circuito Amplificador de Tensão (Eletrômetro) 51
2.2.5.3 Circuito Amplificador de Carga 53
2.2.6 Circuito Amplificador para Fotodiodo 55
2.2.6.1 O Fotodiodo 55
2.2.6.2 Circuito Amplificador de Transimpedância 56
3 Material e Métodos 61

3.1 Sensor de Força Uniaxial com Diafragmas Piezelétricos de Baixo Custo . . . 61
3.2 Sistema de Medida de Forças Biaxial . . . 63
3.3 Condicionador de Sinais para Sensores Piezelétricos . . . 64
3.4 Sensor Fotoelétrico . . . 66
3.5 Fusão de Sensores para a Verificação da Força Média de Impacto 69
3.5.1 Sensor de Força 201B03 . . . 70
3.5.2 Sensor de Contato Elétrico . . . 71
3.5.3 Atuação do Sensor Fotoelétrico no Sistema Multissensor . . 72
3.5.4 Forças Médias Teóricas . . . 75
3.5.5 Método de Calibração de Força com o Sistema Multissensor 76
3.6 Método de Calibração do Sistema de Medida de Forças Biaxial . 78
3.7 Riscamento de Superfície Metálica com Único Grão Abrasivo . . 81
4 Resultados e Discussões . . . **83**
4.1 Sistema Multissensor de Calibração de Força . . . 83
4.2 Calibração do Sistema de Medida de Forças Biaxial . . . 85
4.3 Testes de Riscamento de Superfície Metálica com Único Grão Abrasivo . . . 88
5 Conclusões . . . **93**

Referências . . . **95**

Apêndices **99**
APÊNDICE A Cálculo da Força Média de Impacto . . . **101**
A.1 O Conceito de Força . . . 101
A.2 Impulso . . . 102
A.3 Energia Cinética e Energia Potencial Gravitacional . . . 103
A.4 Energia Mecânica e o Princípio de Conservação . . . 103
A.5 Cálculo da Força Média de Impacto . . . 104
APÊNDICE B Transdutor de Emissão Acústica Construído com Diafragma Piezelétrico . . . **105**

1 Introdução

Em ambientes de produção industrial por manufatura onde há processos típicos de usinagem, a retificação está situada em um dos últimos estágios da cadeia produtiva. Precedida por operações como o corte, o fresamento, a furação e outras, a retificação confere à peça a combinação de menores desvios dimensionais e geométricos, o que normalmente não pode ser obtida por processos convencionais de usinagem com ferramentas de geometria definida. Nesse cenário, admitindo que a peça pré-usinada possui alto valor agregado quando alcança tal estágio, o monitoramento do processo de retificação desempenha uma função importante na redução dos custos de produção e no controle das propriedades mecânicas da peça.

A medida das forças presentes no processo de retificação, o qual é classificado como um processo de usinagem com geometria de corte não-definida, possibilita um melhor entendimento desse complexo mecanismo de remoção de material. O estudo das forças que atuam sobre a ferramenta de corte usada no processo de retificação, denominado rebolo, alicerça o desenvolvimento de novas técnicas de construção dessa ferramenta. A determinação do formato e da distribuição dos grãos abrasivos no rebolo, a escolha do tipo de ligante usado e outros aspectos de sua construção fundamentam-se em estudos relacionados às forças atuantes sobre cada elemento do processo.

Dentre os principais modelos de sensores de força empregados no monitoramento de processos de manufatura, destacam-se aqueles que possuem um elemento piezelétrico como transdutor. As propriedades físicas desse elemento favorecem a resposta em frequência dos sistemas de medição e permitem o monitoramento de processos onde forças com dinâmica rápida estão presentes, tal como ocorre na retificação. Há disponível no mercado uma grande quantidade de sensores piezelétricos de força cujos preços, geralmente elevados, são parcialmente determinados pela complexidade inerente ao corte dos cristais piezelétricos ou da produção e corte das cerâmicas piezelétricas, de acordo com o material usado em sua construção (GAUTSCHI, 2002, p. 14).

Em face às motivações para investigar o mecanismo de corte de um único grão abrasivo, e atentando-se ao elevado preço dos sensores de força comercializados, é apresentado nesta tese de doutorado um sistema de medida de forças biaxial, construído a partir de diafragmas piezelétricos de baixo custo, capaz de medir componentes de força com dinâmica rápida nos eixos normal e tangencial. Também é apresentado aqui um método de calibração que se vale da fusão de múltiplos sensores para determinar a força média teórica em um evento de colisão monitorado pelo sistema de medida.

A calibração do sistema de medida proposto é feita em uma escala de força de

até 130 N, que abrange valores obtidos em testes de riscamento com único grão abrasivo descritos na literatura. Em (ANDERSON; WARKENTIN; BAUER, 2011), por exemplo, os autores mediram as componentes de força normal e tangencial durante o riscamento da superfície de uma peça de aço AISI 4340, usando como ferramenta de corte uma ponta esférica de diamante, e obtiveram valores de força inferiores a 60 N no eixo normal e 8 N no eixo tangencial.

Uma vez calibrado, o sistema de medida de forças biaxial é aplicado em ensaios de riscamento da superfície de uma peça de aço SAE 1020, usando grão abrasivo do tipo óxido de alumínio rosa com granulometria 46. Diante dos sinais resultantes da medição das componentes de força presentes nesses ensaios, e dadas as respostas em magnitude e frequência obtidas durante o processo de calibração, o sistema de medida de forças se mostra adequado ao estudo dos mecanismos de corte de um único grão abrasivo a que fora proposto e possibilita, além disso, a sua aplicação no monitoramento de processos de manufatura.

1.1 Objetivos

O objetivo principal desta tese de doutorado é apresentar um sistema de medida de forças biaxial de baixo custo e com alta frequência de resposta, desenvolvido como apoio nos estudos de processos de retificação através de testes de riscamento com único grão abrasivo. Para se atingir esse objetivo, os seguintes objetivos secundários foram traçados:

- Projeto e desenvolvimento de um sensor de força uniaxial com elementos piezelétricos de baixo custo;
- Projeto e desenvolvimento de um condicionador de sinais, com respostas em magnitude e em frequência compatíveis com os transdutores utilizados;
- Desenvolvimento de um método de calibração do sistema de medida de forças proposto, observando uma escala de magnitude coerente com o processo a ser monitorado;
- Aplicação do sistema de medida de forças biaxial em testes de riscamento de superfície metálica com único grão abrasivo.

1.2 Organização do Texto

Esta tese de doutorado é dividida em cinco capítulos. Após este capítulo introdutório, é feita no Capítulo 2 uma revisão bibliográfica contendo alguns parâmetros do processo de retificação e as principais propriedades de sensores piezelétricos e de circuitos de

condicionamento de sinal. No Capítulo 3, são mostrados os métodos construtivos do sistema de medida de forças biaxial, os detalhes do sistema multissensor desenvolvido para a calibração do sistema de medida e a composição dos testes de riscamento com único grão abrasivo. Os resultados obtidos nos testes de calibração e nos testes de riscamento são discutidos no Capítulo 4. Concluindo, no Capítulo 5 são elencados os principais aspectos do sistema de medida apresentado, destacando o seu êxito no sensoriamento das forças presentes nos testes de riscamento e o seu potencial para ser aplicado no monitoramento de processos de manufatura, onde estejam presentes forças com dinâmica rápida.

5 Conclusões

O sistema de medida de forças dinâmicas proposto nesta tese de doutorado foi projetado e construído objetivando o estudo das forças presentes no processo de retificação, mais especificamente, das forças que envolvem os mecanismos de corte de um único grão abrasivo. Composto por dois sensores de força uniaxiais, cujos transdutores são diafragmas piezelétricos de baixo custo, esse sistema responde a impulsos de força aplicados nos eixos normal e tangencial.

Esse sistema também é composto por um circuito condicionador de sinais, projetado e construído em função das respostas em magnitude e em frequência do sensor piezelétrico para a medição de pequenos sinais de força com dinâmica rápida, como testes de riscamento. A configuração usada na construção do condicionador de sinais é a de um circuito amplificador de carga. A curva teórica de resposta em frequência do circuito projetado aponta uma frequência de corte superior de aproximadamente 1 MHz.

Sua calibração foi realizada por um sistema que se vale da fusão de múltiplos sensores para calcular a força média teórica de eventos de colisão de uma esfera metálica, a qual é lançada em queda livre, de forma controlada, contra uma superfície rígida. Esse processo de calibração possui dois métodos distintos para o cálculo da força média resultante do impacto da esfera. O primeiro método considera o impulso de força durante o período em que a esfera desacelera, do início da sua colisão com a superfície de referência até o instante em que atinge a velocidade nula. O segundo método considera todo o período em que a esfera permanece em contato com a superfície, do início da sua colisão até o momento em que é rebatida.

Ambos os métodos alcançaram bons níveis de precisão e de exatidão durante os ensaios de calibração, mas o método de cálculo por tempo de desaceleração apresentou os melhores resultados. Porém, referindo-se a esse primeiro método, o limite inferior de força da sua faixa de calibração é determinado pelo peso da esfera metálica, a qual deve ter um diâmetro mínimo suficiente para refletir a luz emitida pelo sensor fotoelétrico, que compõe o sistema de calibração. Isso restringiu o seu uso na calibração do sistema de medida de forças proposto, pois a faixa de interesse de medição foi limitada em 130 N. Portanto, o método usado para a calibração do sistema de medida foi o método por tempo de contato. Como resultado desse processo de calibração, o erro relativo apresentado pelo sistema de medida foi de 4,62 % para a componente de força normal e de 6,47 % para a componente de força tangencial.

Após calibrado, o sistema de medida de forças biaxial foi submetido a testes de riscamento com único grão abrasivo, realizados em um centro de usinagem CNC. Diante

dos sinais amostrados, o sistema apresentou respostas em magnitude e em frequência apropriadas aos testes a que fora projetado. Isso permite concluir que houve êxito no seu projeto e na sua execução, e que há condições de aplicá-lo no estudo dos mecanismos de corte do processo de retificação. Também é possível afirmar que há uma relação favorável entre os custos de produção do sistema e os seus benefícios, sobretudo ao considerar o seu potencial proveito em estudos com diferentes materiais empregados na construção do rebolo.

Há a perspectiva de se aplicar o sistema desenvolvido em ensaios de riscamento com diferentes configurações, em que se pretende realizar análises microscópicas mais detalhadas dos cortes. Dentre os aspectos a serem explorados nos futuros ensaios, estão a verificação da espessura equivalente do cavaco, a medida da profundidade de corte real e a relação existente entre os parâmetros de corte e as medidas das componentes de força.

Referências

AGARWAL, S.; RAO, P. V. Predictive modeling of force and power based on a new analytical undeformed chip thickness model in ceramic grinding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Elsevier Ltd., v. 65, p. 68 – 78, Fev. 2013. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2012.10.006. 39

ANDERSON, D.; WARKENTIN, A.; BAUER, R. Experimental and numerical investigations of single abrasive-grain cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Elsevier Ltd., v. 51, n. 12, p. 898 – 910, 2011. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2011.08.006. 30, 78

ATKINSON, K. E. *An Introduction to Numerical Analysis*. 2. ed. Nova York: John Wiley & Sons, Inc., 1989. 693 p. ISBN 0-471-62489-6. 77

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. *Electronic Devices and Circuit Theory*. 11. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2014. 928 p. ISBN 978-1-292-02563-6. 43

BUDOYA, D. E.; BAPTISTA, F. G. A comparative study of impedance measurement techniques for structural health monitoring applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 67, n. 4, p. 912 – 924, Abril 2018. DOI 10.1109/TIM.2018.2792854. 42

CARTER, B.; BROWN, T. R. Application Report SBOA092B. *Handbook of Operational Amplifier Applications*. Dallas: Texas Instruments, Inc., 2001. Revisado em Set. 2016. 93 p. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/an/sboa092b/sboa092b.pdf>. 43

DINEVA, P. et al. *Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials: Solution of Time-Harmonic Problems via BIEM*. Cham, Heidelberg, Nova York, Dordrecht, Londres: Springer, 2014. 249 p. ISBN 978-3-319-03960-2. 41

DOTTO, F. R. L. et al. In-dressing acoustic map by low-cost piezoelectric transducer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 67, n. 8, p. 6927 – 6936, 2020. DOI 10.1109/TIE.2019.2939958. 42

GAUTSCHI, G. *Piezoelectric Sensorics: Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers*. Berlim, Heidelberg: Springer, 2002. 264 p. ISBN 978-3-642-07600-8. 29, 39, 41, 50, 51, 52, 54

GRAEME, J. G. Application Bulletin AB-045. *Op Amp Performance Analysis*. Tucson: Burr-Brown Corporation, 1993. 8 p. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/an/sboa054/sboa054.pdf>. 47

GRAEME, J. G. *Photodiode Amplifiers: Op Amp Solutions*. Boston, Burr Ridge, Dubuque, Madison, Nova York, San Francisco, Saint Louis: McGraw-Hill, 1995. 252 p. ISBN 0-07-024247-X. 13, 14, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 68

GUERRINI, G.; BRUZZONE, A. A. G.; CRENNA, F. Single grain grinding: an experimental and FEM assessment. In: *10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '16*. : Elsevier B.V., 2017. v. 62, p. 287 – 292. DOI 10.1016/j.procir.2016.07.082. 40, 78

HAHN, R. S. On the nature of grinding process. In: *Proceedings of the 3rd International Machine Tool Design & Research Conference*. Oxford, Londres, Nova York, Paris: Pergamon Press, 1963. p. 129 – 154. 37

HERMANS, C.; STEYAERT, M. Broadband opto-electrical receivers in standard CMOS. In: ISMAIL, M. (Ed.). *Analog Circuits and Signal Processing Series*. Dordrecht: Springer, 2007. ISBN 978-1-4020-6222-3. 56, 60

HOROWITZ, P.; HILL, W. *The Art of Electronics*. 3. ed. Nova York: Cambridge University Press, 2015. 1192 p. ISBN 978-0-521-80926-9. 68

HU, Y. et al. Nonlinear behavior of a piezoelectric power harvester near resonance. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, IEEE, v. 53, n. 7, p. 1387 – 1391, Jul. 2006. DOI 10.1109/TUFFC.2006.1665088. 41

JUNG, W. G. (Ed.). *Op Amp Applications*. Analog Devices, Inc., 2002. 917 p. ISBN 0-916550-26-5. Disponível em: <http://www.analog.com/en/education/education-library/op-amp-applications-handbook.html>. 44, 47

KANNAPPAN, S.; MALKIN, S. Effects of grain size and operating parameters on the mechanics of grinding. *Journal of Engineering for Industry*, ASME, v. 94, n. 3, p. 833 – 842, Ago. 1972. DOI 10.1115/1.3428258. 39

KLOCKE, F. *Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping*. Berlim, Heidelberg: Springer, 2009. 433 p. ISBN 978-3-540-92258-2. 38

LALLY, J. Technical Note TN-17. *Accelerometer Selection Considerations - Charge and ICP® Integrated Circuit Piezoelectric*. Depew: PCB Piezotronics, Inc., 2005. 5 p. Disponível em: <https://www.pcb.com/techsupport/docs/vib/TN_17_VIB-0805.pdf>. 71

LEVEN, A.; REUTER, R.; BAEYENS, Y. Unified analytical expressions for transimpedance and equivalent input noise current of optical receivers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, IEEE, v. 48, n. 10, p. 1701 – 1706, 2000. DOI 10.1109/22.873898. 56

MALKIN, S.; GUO, C. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. 2. ed. Nova York: Industrial Press, 2008. 368 p. ISBN 978-0-8311-3247-7. 13, 35, 36, 37, 38

MARINESCU, I. D. et al. *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. 2. ed. Boca Raton, Londres, Nova York: CRC Press, 2016. 694 p. ISBN 978-1-4822-0670-8. 35

MURATA MANUFACTURING. *Piezoelectric Ceramics (PIEZOTITE®) Sensors*. Kyoto, 2008. Catálogo nº P19E-9. 42

MURATA MANUFACTURING. *Piezoelectric Sound Components*. Kyoto, 2018. Catálogo nº P37E-28. Disponível em: <https://www.murata.com/-/media/webrenewal/support/library/catalog/products/sound/p37e.ashx?la=en-gb>. 13, 42

NELSON, J. C. C. *Operation Amplifier Circuits: Analysis and Design*. Boston, Oxford, Melbourne, Singapura, Toronto, Munique, Nova Deli, Tóquio: Butterworth-Heinemann, 1995. 138 p. ISBN 0-7506-9468-8. 45, 46

OLJACA, M.; SURTIHADI, H. Operational amplifier gain stability, Part 1: General system analysis. *Analog Applications Journal*, Texas Instruments, Inc., n. 1, p. 20 – 23, 2010. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/an/slyt367/slyt367.pdf>. 13, 46, 47, 48, 49

OLJACA, M.; SURTIHADI, H. Operational amplifier gain stability, Part 2: DC gain-error analysis. *Analog Applications Journal*, Texas Instruments, Inc., n. 2, p. 24 – 28, 2010. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/an/slyt374/slyt374.pdf>. 46

PALLÀS-ARENY, R.; WEBSTER, J. G. *Sensors and Signal Conditioning*. 2. ed. Nova York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapura, Toronto: John Wiley & Sons, Inc., 2001. 570 p. ISBN 0-471-33232-1. 53, 54

PCB PIEZOTRONICS. *Installation Drawing M201/M211 Series Metric Force Ring*. Depew, 2010. Desenho nº M201-2010-90. Disponível em: <https://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/ForceTorque/Products/Drawing/PDF/M201-2010-90-A.pdf>. 70

PCB PIEZOTRONICS. *201B03 ICP® Force Sensor Specification Sheet*. Depew, 2011. Documento nº 35154. Disponível em: <https://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/ForceTorque/Products/Specsheets/201B03_D.pdf>. 70

PCB PIEZOTRONICS. *Model 482B11 Line Powered Signal Conditioner for ICP® Sensors - Installation and Operating Manual*. Depew, 2013. Documento nº 21354. Disponível em: <https://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Electronics/Products/Manuals/482B11.pdf>. 71

RAGAZZINI, J. R.; RANDALL, R. H.; RUSSELL, F. A. Analysis of problems in dynamics by electronic circuits. In: *Proceedings of the IRE*. Nova York: The Institute of Radio Engineers, Inc., 1947. v. 35, n. 5, p. 444 – 452. DOI 10.1109/JRPROC.1947.232616. 43

RIBEIRO, D. M. S. et al. Spectra measurements using piezoelectric diaphragms to detect burn in grinding process. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 66, n. 11, p. 3052 – 3063, Nov. 2017. DOI 10.1109/TIM.2017.2731038. 42

ROWE, W. B. *Principles of Modern Grinding Technology*. 2. ed. Amsterdam, Boston, Heidelberg, Londres, Nova York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapura, Sydney, Tóquio: William Andrew, 2014. 420 p. ISBN 978-0-323-24271-4. 13, 34, 36, 37

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. R. L. *Cálculo Numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais*. 2. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2000. 395 p. ISBN 978-85-346-0204-4. 78

SCHRAND, D. Cross-talk compensation using matrix methods. *IFSA Sensors & Transducers Journal*, International Frequency Sensor Association Publishing, v. 79, n. 5, p. 1157 – 1163, 2012. ISSN 1726-5479. 81

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. *Microlectronic Circuits*. 7. ed. Nova York, Oxford: Oxford University Press, 2015. 1436 p. ISBN 978–0–19–933913–6. 13, 43, 44, 45, 48, 49, 50

SERRIDGE, M.; LICHT, T. R. *Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers - Theory and Application Handbook*. Glostrup: Brüel & Kjær, 1987. 151 p. Disponível em: <https://www.bksv.com/media/doc/bb0694.pdf>. 13, 51, 52, 53

STANTON, S. C. et al. Nonlinear piezoelectricity in electroelastic energy harvesters: Modeling and experimental identification. *Journal of Applied Physics*, AIP Publishing, v. 108, n. 7, p. 1 – 9, Out. 2010. DOI 10.1063/1.3486519. 41

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Physics for Scientists and Engineers, with Modern Physics*. 6. ed. Nova York: W. H. Freeman and Company, 2008. 1412 p. ISBN 978-0-7167-8964-2. 102

VARGHESE, B. et al. Development of a sensor-integrated "intelligent" grinding wheel for in-process monitoring. In: *Annals of CIRP*. 2000. v. 49, n. 1, p. 231 – 234. DOI 10.1016/S0007-8506(07)62935-7. 39

VEATCH, D. W.; BOGUE, R. K. NASA Reference Publication 1159. *Analog Signal Conditioning for Flight-Test Instrumentation*. Edwards: NASA Ames Research Center, 1986. 184 p. Disponível em: <https://www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/88032main_H-1191.pdf>. 53, 54

WALKER, J.; HALLIDAY, D.; RESNICK, R. *Fundamentals of Physics, Extended*. 10. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2014. 1448 p. ISBN 978-1-118-23072-5. 15, 76, 101, 102, 103, 104

ZHANG, J. et al. Development of piezoelectric three-dimensional dynamometer for ϕ 300mm wafer grinder. *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications, v. 945 - 949, p. 2017 – 2020, 2014. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.2017. 40

ZUMBAHLEN, H. (Ed.). *Basic Linear Design*. Analog Devices, Inc., 2007. 1259 p. ISBN 0-916550-28-1. Disponível em: <http://www.analog.com/en/education/education-library/linear-circuit-design-handbook.html>. 47