UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO CIENTÍFICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNO VAN BELLEN

TÉCNICAS DE EMISSÃO ACÚSTICA PARA A CARACTERIZAÇÃO E MONITORAMENTO DO PROCESSO DE CORTE POR FIO DIAMANTADO CONTÍNUO

Florianópolis
2024

BRUNO VAN BELLEN

TÉCNICAS DE EMISSÃO ACÚSTICA PARA A CARACTERIZAÇÃO E MONITORAMENTO DO PROCESSO DE CORTE POR FIO DIAMANTADO CONTÍNUO

Trabalho de Conclusão do Curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Fernando Moreira Bordin, Dr. Eng.
Coorientador: Prof. Fabio Antonio Xavier, Dr. Eng. e Prof. Erick Cardoso Costa, Dr. Eng.

Florianópolis
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

van Bellen, Bruno
Técnicas de emissão acústica para a caracterização e monitoramento do processo de corte por fio diamantado contínuo / Bruno van Bellen ; orientador, Fernando Bordin, coorientador, Erick Costa, coorientador, Fabio Xavier, 2024.
117 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Emissão Acústica. 3. Fio diamantado. 4. Processamento de sinais. 5. Usinagem de material frágil. I. Bordin, Fernando. II. Costa, Erick. III. Xavier, Fabio IV. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Mecânica. V. Título.

BRUNO VAN BELLEN

TÉCNICAS DE EMISSÃO ACÚSTICA PARA A CARACTERIZAÇÃO E MONITORAMENTO DO PROCESSO DE CORTE POR FIO DIAMANTADO CONTÍNUO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico e aprovado em sua forma final pela Comisso Examinadora e pelo Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 01 de novembro de 2024.

Prof. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Dr. Eng.
Coordenadoria do Curso

Banca Examinadora:

Fernando Moreira Bordin, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Dr. Eng.

Prof. Júlio Apolinário Cordioli, Dr. Eng.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho reflete o incentivo das diversas pessoas admiráveis ao meu redor em que me inspiro.

Agradeço, acima de tudo, à minha família pelo apoio incondicional e pelos valores que me foram passados, sendo fundamentais para minha educação e formação pessoal na construção desse caminho. Sou imensamente grato pelos ensinamentos que moldaram quem sou hoje. Sempre foram a minha base para toda e qualquer decisão que tomei. Agradeço por cada sacrifício que vocês fizeram para que eu chegasse até aqui.

Agradeço aos meus queridos e amados amigos que estiveram ao meu lado não apenas nessa jornada, mas em todos os importantes momentos ao longo da minha vida. Em especial, sou imensamente grato ao Augusto, Lucas e Vitor, que estiveram comigo desde o início, pelos incontáveis momentos de descontração, pelas conversas que tornavam dias mais leves e pelas pausas que recarregavam nossas energias. Sou realmente sortudo por tê-los ao meu lado, e os momentos que compartilhamos ao longo desses anos serão sempre lembrados com especial carinho.

Ao meu amigo Vitor, pelo companheirismo não apenas de curso, mas de uma amizade de uma vida inteira. Por todo o stress que passamos em trabalhos, provas e matérias do curso, mas que juntos, tornaram-se mais leves. Sem contar as memórias inesquecíveis que construímos no decorrer dessa trajetória tão singular.

Ao meu orientador Fernando Moreira Bordin, pelo incentivo dado para se aventurar em um trabalho, antes, tão nebuloso. Pelo apoio, supervisão, incentivo e contribuição imprescindível para o desenvolvimento do trabalho e por sempre acreditar em mim e no meu trabalho.

Aos meus co-orientadores Fabio Antonio Xavier e Erick Cardoso Costa pela oportunidade e pelo suporte contínuo no decorrer do trabalho. Expresso profundamente minha gratidão pelos inúmeros ensinamentos pessoais e profissionais, assim como o compartilhamento generoso de conhecimentos que enriqueceram o trabalho.

Aos meus demais colegas do LMP, por todo o suporte, direto ou indireto, na realização do trabalho e pelos bons momentos. Ao Lucas Marchi e Milton Schneider pelo auxílio na realização dos cortes e operação da máquina. Ao Gabriel Kons pelos ensinamentos sobre fio diamantado. À Natalie pela disponibilização das amostras de carbeto de silício. Ao Elliton e ao Antônio pelas boas conversas realizadas em nossa sala.

Por fim, a todos que contribuíram, de qualquer forma, no desenvolvimento do trabalho.

"Simplicity is the final achievement. After one has played a vast quantity of notes and more notes, it is simplicity that emerges as the crowning reward of art."

(Fryderyk F. Chopin)

RESUMO

Desde sua primeira introdução em 1984, o processo de corte por fio diamantado de lingotes de silício em *wafers* tem impactado significativamente a usinagem de materiais frágeis, particularmente no processamento de silício cristalino. O uso de silício em células fotovoltaicas (FV) tem recebido atenção considerável devido às suas propriedades semicondutoras dentro da indústria fotovoltaica, servindo como uma alternativa eficiente para conversão de energia solar em energia elétrica, à medida em que a demanda por fontes renováveis aumenta. Tanto a transição na indústria de semicondutores, em que estima-se que as células FV detém cerca de 90% do mercado de silício convencional, quanto as tendências de redução de preços do substrato de silício, retratam uma tendência de viabilidade crescente para a implementação da energia solar, o que impulsiona ainda mais a inovação tecnológica no setor fotovoltaico. Nesse contexto, o desenvolvimento de técnicas avançadas de manufatura, como monitoramento e controle de processos, torna-se um ponto de partida crítico para otimização da eficiência da cadeia produtiva. Para esse fim, sistemas de emissão acústica (EA) têm sido amplamente aplicados no campo da manufatura devido à alta faixa de frequência e sensibilidade. Essa abordagem é particularmente eficaz no processo de retificação, servindo como um método eficaz para caracterização topográfica, dinâmica *in-process* e monitoramento do desgaste de rebolo. Apesar de sua extensa aplicação, não foram empregadas técnicas de EA em pesquisas sobre corte por fio diamantado para monitoramento de processos, destacando uma lacuna na literatura disponível. Sob essa perspectiva, o presente trabalho propõe uma abordagem inovadora para a implementação sistemática de instrumentação EA para caracterização do processo de corte por fio diamantado, dividida em três aspectos principais: 1) caracterização dinâmica e cinemática; 2) detecção de contato entre ferramenta e peça; 3) acompanhamento do desgaste da ferramenta. Sinais $\mathrm{EA_{RAW}}$ e $\mathrm{EA_{RMS}}$ foram adquiridos do processo de corte para extração de características, considerando as diferentes abordagens propostas. Dentre as ferramentas de processamento de sinais, análises no domínio do tempo, análise de Fourier, espectro de potência e análises no plano tempo-frequência, com ênfase na transformada de *wavelet* discreta, foram empregadas para extração de características do sinal. Técnicas de análise de processamento de sinais avançadas foram implementadas em linguagem de programação Python, em conjunto com o desenvolvimento de um algoritmo integrado à aquisição de dados para estabelecer um banco de dados estruturado que permite uma análise de dados eficiente e organizada. Os resultados mostraram um aumento na potência do sinal para velocidades de corte mais altas, enquanto mudanças na velocidade de avanço não produziram alterações significativas. O conteúdo de frequência exibiu pouca influência sob diferentes condições de corte. O estabelecimento de um limite dinâmico forneceu informações úteis para detecção de contato, em que janelas móveis de maior duração demonstraram ser mais sensíveis. Além disso, a transição de contato do fio foi fortemente influenciada pela constante de integração de tempo nos sinais $\mathrm{EA_{RMS}}$, em que velocidades de avanço mais baixas resultaram em uma resposta mais estável. A análise de desgaste de ferramenta baseada em tempo de corte e condição revelou um deslocamento de frequência, no qual tanto o espectro de potência quanto a extração de coeficientes de *wavelet* indicaram um aumento de energia no conteúdo de baixa frequência de ferramentas desgastadas.

Palavras-chave: fio diamantado; emissão acústica; processamento de sinais; usinagem de material frágil; *wavelet*.

ABSTRACT

Since its introduction in 1984, wire sawing process of silicon ingots into wafers has significantly impacted the machining of hard-brittle materials, particularly in crystalline silicon processing. Employment of silicon in photovoltaic (PV) cells has drawn considerable attention due to its semiconductor properties within the photovoltaic industry as an efficient method for converting solar energy into electrical energy, as the renewable sources demand increases. Both transition in the semiconductor industry, whereas PV cells are estimated to account up for 90% of the mainstream silicon market, and decreasing price trends over silicon substrate, suggest increasing feasibility for solar technology manufacturing which further drives technological innovation in the PV sector. In light of these trends, developing advanced manufacturing techniques such as process monitoring and control comes in as a critical starting point for optimizing production efficiency. For this purpose, acoustic emission (AE) systems have been widely applied in the manufacturing field due to its high frequency range and sensitivity. This approach is particularly effective in grinding process, serving as a reliable method for dynamic in-process characterization and wheel wear monitoring. Despite its extensive application, no research on wire sawing has employed AE techniques for process monitoring, highlighting a clear gap in the considered literature. Within this framework, the present work proposes an innovative approach to implementing AE tools for diamond wire sawing process characterization, divided into three key aspects: 1) dynamic and kinematic characterization; 2) workpiece-tool contact detection; 3) tool wear monitoring. Both AE_{RAW} and AE_{RMS} signals were acquired from the cutting process for feature extraction, considering different approaches. Among digital signal processing tools, time domain, Fourier analysis, power spectrum and time-frequency domain, with emphasis on the discrete wavelet transform were employed for signal feature extraction. In-depth signal processing analysis techniques were implemented within the Python environment, along the development of an integrated data acquisition algorithm for establishing a structured database for comprehensive data analysis handling. Results showed an increasing signal power for higher cutting speeds whilst changes in feed rate did not produce significant changes. Surprisingly, frequency content exhibited little to no influence under different cutting conditions. The designation of a dynamic threshold provided useful information for effective contact detection, with greater rolling time windows becoming more sensitive. Also, wire contact transition was heavily influenced by the time integration constant in EA_{RMS} signals, wherein lower feed rates resulted in a more stable response. Condition-based tool wear analysis revealed a frequency shift, in which both power spectrum and wavelet coefficient extraction indicated increased energy in the low frequency content of worn tools.

Keywords: diamond wire; acoustic emission; signal processing; hard-brittle materials machining; wavelet.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modo de remoção dúctil e frágil em materiais frágeis. a) MRD; b) MRF. 7
Figura 2 – Esquemático do processo MWSS. a) Máquina ferramenta; b) Interação ferramenta-peça. 9
Figura 3 – Ferramenta de fio diamantado DWS. a) Micrografia do fio diamantado eletrodepositado; b) Micrografia da seção tranversal do fio diamantado. 10
Figura 4 – Cinemática do processo DWS. 11
Figura 5 – Região da solda no fio diamantado. 12
Figura 6 – Distinção entre variáveis do processo e saída. 14
Figura 7 – Sinais característicos de fontes EA/ruído em diferentes escalas. 18
Figura 8 – Fontes de EA no processo DWS. 20
Figura 9 – Fontes de EA com relação ao mecanismo de remoção. a) MRD; b) MRF. 20
Figura 10 – Faixa de frequências de fenômenos envolvidos em processos de fabricação. 21
Figura 11 – Modelo de sistema dinâmico com ruídos/perturbações no sinal mensurado. 22
Figura 12 – Esquema lógico de processamento de sinal. 23
Figura 13 – Esquema de transdutores piezoelétricos. a) Sensor EA; b) Acelerômetro. 26
Figura 14 – Esquema de condicionamento básico de sinais analógicos 27
Figura 15 – Conversão A/D por amostragem. a) Amostragem e representação adequada; b) Amostragem insuficiente; c) Representação digital insuficiente. 29
Figura 16 – Componentes de sinal de processo no domínio do tempo. a) Deriva; b) Periodicidade; c) Evento/Falha; d) Ruído; e)Composição completa do sinal do processo. 30
Figura 17 – Resposta em frequência. a) Seno puro; b) Efeito *leakage* na frequência de um seno truncado. 31
Figura 18 – Tipos de funções janela. a) Retangular; b) Hann; c) Tukey; d) Exponencial. 32
Figura 19 – Efeito da aplicação da janela Hann no domínio da frequência. 32
Figura 20 – Resolução no plano tempo-frequência. 33
Figura 21 – Classificação de sinais. 34
Figura 22 – Exemplos de sinais estacionários e não estacionários. 35
Figura 23 – Máquina-ferramenta com componentes enumerados. 37
Figura 24 – Cinemática do processo de corte. 37
Figura 25 – Amostra de carbeto de silício utilizada para os cortes. 38
Figura 26 – Condicionador de sinais MSM. a) Painel frontal; b) Painel posterior. . . 39
Figura 27 – Transdutores de EA utilizados. a) S1; b) S2. 40
Figura 28 – Esquema de posicionamento de sensores EA na máquina-ferramenta. . 41
Figura 29 – Posicionamento dos sensores de EA na máquina-ferramenta (a) S1/A; (b) S1/B; (c) S2/C. 41
Figura 30 – Placa de aquisição de dados. 42

Figura 31 – Esquema de conexão de SM/EA e sistema DAQ. 43
Figura 32 – Fluxograma do algoritmo. 45
Figura 33 – Comparação de sinais brutos e filtrados. 48
Figura 34 – Sinal típico de uma operação de corte por fio diamantado completa. . . 50
Figura 35 – PSD extraída do processo de corte por fio diamantado. 52
Figura 36 – STFT extraída do início do processo de corte por fio diamantado. . . . 53
Figura 37 – Decomposição *wavelet* de um sinal bruto EA do processo. 55
Figura 38 – Esquematização de contato entre ferramenta-peça, transição e deflexão do fio. 57
Figura 39 – Sinal $\mathrm{EA_{RMS}}$ típico. 58
Figura 40 – Curva típica de desgaste de ferramentas. 60
Figura 41 – Potência do sinal para diferentes configurações de montagem de sensores. 61
Figura 42 – Comparação de filtros na resposta em frequência de sinais de corte e da máquina. 62
Figura 43 – Potência de sinais para diferentes combinações de $\mathrm{v_s}$ e $\mathrm{v_f}$. 63
Figura 44 – Espectro de potência para diferentes condiçõe cinemáticas de corte. . . 64
Figura 45 – Espectro de potência para diferentes condições cinemáticas de corte (escala log-z). 65
Figura 46 – DWT do sinal EA à condições de $\mathrm{v_s} = 20$ m/s e $\mathrm{v_f} = 1$ mm/min. . . . 66
Figura 47 – Resposta em frequência de coeficientes DWT. 68
Figura 48 – Etapas de contato. a) Fase I: vibração do comprimento livre do fio; b) Fase II: deflexão do fio e transição; c) Fase III: estabilização do fio na deflexão máxima. 69
Figura 49 – Detecção de contato de primeiros gumes abrasivos. 70
Figura 50 – Espectrograma para detecção de contato inicial. 70
Figura 51 – Decomposição *wavelet* de 6^a ordem db6 para detecção de contato. . . . 71
Figura 52 – Comparação de ΔT para aquisição de sinais $\mathrm{EA_{RMS}}$ para detecção de contato. 72
Figura 53 – Comparação de ΔT em sinais $\mathrm{EA_{RMS}}$ para dois níveis de $\mathrm{v_f}$. 73
Figura 54 – Comparação de $T_{\mathrm{R,w}}$ para determinação de LD na detecção de contato. 74
Figura 55 – Sinais $\mathrm{EA_{RMS}}$ para acompanhamento de desgaste. 75
Figura 56 – Valores RMS para tempo de corte relativo para ensaios de duração sucessivamente maior. 76
Figura 57 – Espectros de potência ao longo do tempo para acompanhamento do desgaste. 77
Figura 58 – Sinal bruto de longa duração. 78
Figura 59 – Comparação de sinais brutos de diferentes condições de ferramenta. . . 78
Figura 60 – Espectro de potência para diferentes condições de ferramenta. 79
Figura 61 – Decomposição *wavelet* de 6^a ordem db6 para cada condição de ferramenta. 80

Figura 62 – Resposta em frequência de coeficientes DWT baseado na condição de ferramenta. 81
Figura 63 – Espectro de potência PSD de ensaios na configuração S1/A. 95
Figura 64 – Espectro de potência PSD de ensaios na configuração S1/B. 95
Figura 65 – Espectro de potência PSD de ensaios na configuração S2/C. 96
Figura 66 – Comparação de sinal bruto e filtrado na condição de corte efetivo no domínio do tempo. 97
Figura 67 – Comparação de sinal bruto e filtrado na condição de máquina em vazio no domínio do tempo. 97
Figura 68 – Comparação de resposta em frequência de sinais brutos e filtrados para diferentes condições. 97
Figura 69 – Decomposição de 6^a ordem por DWT para v_s = 15 m/s e variando v_f. 98
Figura 70 – Resposta em frequência de coeficientes DWT para v_s = 15 m/s e variando v_f. 99
Figura 71 – Decomposição de 6^a ordem por DWT para v_s = 17,5 m/s e variando v_f. 100
Figura 72 – Resposta em frequência de coeficientes DWT para v_s = 15 m/s e variando v_f. 101
Figura 73 – Decomposição de 6^a ordem por DWT para v_s = 20 m/s e variando v_f. 102
Figura 74 – Resposta em frequência de coeficientes DWT para v_s = 20 m/s e variando v_f. 103
Figura 75 – Decomposição de 6^a ordem por DWT para v_s = 22,5 m/s e variando v_f. 104
Figura 76 – Resposta em frequência de coeficientes DWT para v_s = 22,5 m/s e variando v_f. 105
Figura 77 – Decomposição de 6^a ordem por DWT para v_s = 25 m/s e variando v_f. 106
Figura 78 – Resposta em frequência de coeficientes DWT para v_s = 25 m/s e variando v_f. 107
Figura 79 – Espectro de potência PSD para diferentes condições cinemáticas com filtro passa alta (LC = 50 kHz). 108
Figura 80 – Espectro de potência PSD para diferentes condições cinemáticas com filtro passa alta (LC = 50 kHz) (escala log-z). 109
Figura 81 – Espectro de potência PSD para diferentes condições de ferramenta com filtro digital passa alta (LC = 10 kHz). 110
Figura 82 – Espectro de potência PSD para diferentes condições de ferramenta com filtro digital passa alta (LC = 10 kHz) (escala log-z). 110
Figura 83 – Espectro de potência PSD para diferentes condições de ferramenta com filtro digital passa alta (LC = 50 kHz). 111
Figura 84 – Espectro de potência PSD para diferentes condições de ferramenta com filtro digital passa alta (LC = 50 kHz) (escala log-z). 111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicação de sensores para monitoramento de condição e processo. . . 15
Tabela 2 – Relação entre fontes de EA e características de sinal. 17
Tabela 3 – Síntese de aplicações de ferramentas de processamento de sinal em trabalhos acadêmicos de monitoramento. 25
Tabela 4 – Especificações de sensores EA. 40
Tabela 5 – Especificação de parâmetros padrão utilizados no SM/EA e sistema DAQ. 46
Tabela 6 – Valores de LC e HC para filtros digitais 47
Tabela 7 – Ferramentas para análise no domínio do tempo. 50
Tabela 8 – Planejamento experimental para caracterização cinemática. 56
Tabela 9 – Planejamento experimental para detecção de contato. 58
Tabela 10 – Planejamento experimental para acompanhamento de desgaste. 59
Tabela 11 – Planejamento experimental para caracterização de desgaste baseado em condição de ferramenta. 60
Tabela 12 – Potência (V^2) de coeficientes de decomposição de 6^a ordem de *wavelet* db6 67
Tabela 13 – Potência (V^2) de coeficientes de decomposição de 6^a ordem de *wavelet* db6 para condição de ferramenta. 79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico-Digital
ACF	Função de Auto-Correlação
DAQ	*Data Acquisition*
DFT	*Discrete Fourier Transform*
DWECDS	*Diamond Wire Electrochemical Discharge Sawing*
DWEDS	*Diamond Wire Electric Discharge Sawing*
DWS	*Diamond Wire Sawing*
DWT	*Discrete Wavelet Transform*
EA	Emissão Acústica
EEB	*Energy Efficient Buildings*
EMD	*Empirical Mode Decomposition*
EWS	*Electrochemical Wire Sawing*
FFT	*Fast Fourier Transform*
FV	Fotovoltaico
HC	*High Cutoff*
IMF	*Intrinsic Mode Function*
LC	*Low Cutoff*
LD	Limite Dinâmico
LDI	Limite Dinâmico Inferior
LDS	Limite Dinâmico Superior
LE	Limite Estático
LEI	Limite Estático Inferior
LES	Limite Estático Superior
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
MEMS	*Micro-Electromechanical Systems*
MRD	Modo de Remoção Dúctil
MRF	Modo de Remoção Frágil
MWSS	*Multi Wire Slurry Sawing*
PSD	*Power Spectral Density*
RMS	*Root Mean Square*
S1	Sensor EA de base magnética
S2	Sensor EA de base parafusada
SISO	*Single-input-Single-output*
SM/EA	Sistema de Monitoramento por Emissão Acústica
SMCF	Sistema de Monitoramento de Condição de Ferramenta
STFT	*Short Time Fourier Transform*
UADWS	*Ultrasonic-Assisted Diamond Wire Sawing*

LISTA DE SÍMBOLOS

$\mathrm{EA_{RAW}}$	Sinal bruto de EA [V]
$\mathrm{EA_{RMS}}$	Sinal RMS de EA [V]
$\mathrm{v_s}$	Velocidade de corte [m/s]
$\mathrm{v_f}$	Velocidade de avanço [mm/min]
ΔT	Constante de tempo de integração [ms]
$T_{\mathrm{R,w}}$	Duração da janela de tempo móvel para limite dinâmico [s]
$h_{\mathrm{cu,\ crít.}}$	Profundidade crítica de penetração [μm]
A_{EA}	Amplitude de onda de EA [$\mathrm{m^{-1}}$]
r_f	Distância da fonte de EA [m]
f_s	Frequência de amostragem [Hz]
$f_{\mathrm{máx.}}$	Frequência característica máxima [Hz]
f_N	Frequência de Nyquist [Hz]
Y_{RMS}	Valor RMS [V]
$W_{t,\tau}$	Vetor de janela de tempo móvel [-]
Q_α	Quantil α de um vetor [-]
P	Potência de um sinal no domínio do tempo [$\mathrm{V^2}$]
S_{yy}	Densidade de potência espectral [$\mathrm{V^2/Hz}$]
a_n	Coeficiente de aproximação da transformada *wavelet* de ordem n [V]
d_n	Coeficiente de detalhe da transformada *wavelet* de ordem n [V]
$N_{>\lvert\mathrm{DT}\rvert}$	Número de pontos acima do módulo do limite dinâmico [1]
T_{total}	Tempo total de corte [s]

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**1**
1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS	4
1.2.1	**Objetivo Geral**	**4**
1.2.2	**Objetivos Específicos**	**4**
2	**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**	**6**
2.1	USINAGEM DE MATERIAIS FRÁGEIS	6
2.2	USINAGEM COM FIO DIAMANTADO	8
2.2.1	***Multi Wire Slurry Sawing* (MWSS)**	**9**
2.2.2	***Diamond Wire Sawing* (DWS)**	**10**
2.2.2.1	*Fio Diamantado Contínuo*	*11*
2.3	MONITORAMENTO DE CONDIÇÃO E PROCESSO POR EMISSÃO ACÚSTICA	13
2.3.1	**Aspectos gerais de monitoramento de condição e processo**	**13**
2.3.2	**Monitoramento de condição e processo por emissão acústica**	**16**
2.3.3	**Fontes de emissão acústica no corte por fio diamantdo**	**19**
2.3.4	**Faixa de frequência de emissão acústica no corte por fio diamantado**	**20**
2.4	PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE SINAIS	22
2.4.1	**Transdutores piezoelétricos de EA**	**26**
2.4.2	**Condicionamento e digitalização de sinais**	**27**
2.4.2.1	*Conversão A/D (amostragem e aliasing)*	*28*
2.4.2.2	*Ferramentas para análise no domínio do tempo e da frequência*	*29*
2.4.2.3	*Processos estocásticos*	*34*
2.4.2.4	*Processos estacionários e não-estacionários*	*34*
3	**MATERIAIS E MÉTODOS**	**36**
3.1	MÁQUINA-FERRAMENTA	36
3.2	FERRAMENTA DE CORTE	37
3.3	AMOSTRAS PARA CORTES E ENSAIOS	38
3.4	SISTEMA DE MONITORAMENTO POR EA	38
3.4.1	**Transdutores de EA**	**39**
3.4.1.1	*Posicionamento de sensores EA*	*40*
3.4.2	**Sistema de aquisição e *setup* SM/EA com sistema DAQ**	**42**
3.4.2.1	*Estruturação da base de dados e metadados*	*43*
3.4.2.2	*Ajuste de parâmetros*	*46*
3.5	METODOLOGIA PARA PROCESSAMENTO DE SINAIS E EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS	47

3.5.1 Aplicação de filtros digitais . . . 47
3.5.2 Análise no domínio do tempo . . . 48
3.5.3 Análise no domínio da frequência . . . 50
3.5.3.1 Densidade de Potência Espectral (PSD) . . . 51
3.5.4 Análise no plano tempo-frequência . . . 52
3.5.4.1 Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT) . . . 52
3.5.4.2 Decomposição wavelet . . . 53
3.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL . . . 55
3.6.1 Caracterização cinemática do processo e posicionamento de sensores . . . 56
3.6.2 Detecção/Acompanhamento de contato ferramenta-peça . . . 57
3.6.3 Acompanhamento de desgaste de grãos abrasivos da ferramenta 59
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . 61
4.1 POSICIONAMENTO DE SENSORES EA . . . 61
4.2 SELEÇÃO DO FILTRO . . . 62
4.3 CARACTERIZAÇÃO CINEMÁTICA . . . 63
4.3.1 Extração de características no domínio do tempo . . . 63
4.3.2 Extração de características no domínio da frequência . . . 64
4.3.3 Extração de características de coeficientes *wavelet* . . . 65
4.4 DETECÇÃO DE CONTATO . . . 69
4.4.1 Fase I: Detecção de contato abrasivo inicial por sinais EA_{RAW} 69
4.4.2 Fase II: Detecção de contato e transição por sinais EA_{RMS} . 72
4.4.3 Limites estáticos e dinâmicos para detecção de contato . . . 73
4.5 ACOMPANHAMENTO DE DESGASTE . . . 75
4.5.1 Análise de evolução progressiva do desgaste . . . 75
4.5.2 Análise instantânea do desgaste para diferentes condições de ferramenta . . . 77
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . 82
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . 84
REFERÊNCIAS . . . 85
APÊNDICE A – RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE SENSORES . . . 95
APÊNDICE B – APLICAÇÃO DE FILTROS DIGITAIS EM SINAIS BRUTOS . . . 97
APÊNDICE C – DECOMPOSIÇÃO DO SINAL POR EXTRAÇÃO DE COEFICIENTES DWT NO TEMPO E NA FREQUÊNCIA . . . 98

APÊNDICE D – ANÁLISE DAS ALTAS FREQUÊNCIAS EM ESPECTROS DE POTÊNCIA DE DIFERENTES CONDIÇÕES CINEMÁTICAS POR MEIO DE FILTRO DIGITAL PASSA-ALTA 108
APÊNDICE E – ANÁLISE DAS ALTAS FREQUÊNCIAS EM ESPECTROS DE POTÊNCIA DE DIFERENTES CONDIÇÕES DE FERRAMENTA COM FILTRO DIGITAL PASSA-ALTA . . 110
ANEXO A – CÓDIGO PYTHON PARA AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS 112

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A conciliação entre a crescente demanda energética e as práticas sustentáveis tem se tornado o principal desafio associado à geração e distribuição de energia. Nesse contexto, a modalidade solar de geração de energia, por meio da utilização de módulos FV (Fotovoltaico) à base de silício mono ou policristalino, emerge como uma alternativa promissora na busca por fontes renováveis. Vislumbra-se a energia solar como uma fonte estratégica devido a sua capacidade de micro e minigeração distribuída, podendo ser integrada à rede elétrica, ampliando sua capacidade de geração e distribuição. Além disso, a fonte solar está intimamente relacionada com o advento da tecnologia de carros elétricos e a implementação de edifícios de alta eficiência energética (EEB) no meio urbano (AMARAL *et al.*, 2016; VASILIEV; NUR-E.-ALAM; ALAMEH, 2019; PACHECO; ORDÓÑEZ; MARTÍNEZ, 2012). Dessa forma, apresentando a maior taxa de crescimento dentre as fontes renováveis no Brasil, a modalidade solar já alcança uma potência instalada de aproximadamente 25 GW em território nacional, registrando um aumento de mais de 80% na capacidade instalada entre os anos 2021/2022 (EPE, 2023).

Referente à composição das placas FV, o silício se destaca atualmente como o principal substrato devido às características ópticas e de semicondutor, fundamentais para a conversão da luz solar em eletricidade de forma eficiente (KWAK, J. I. *et al.*, 2020; ZHANG, X.; LI, Y.; ZHANG, C., 2014). Somado a isso, o fenômeno de redução de mais de 50% do preço do silício por quilo (US$/kg), na última década resulta em uma crescente viabilidade de implementação, ao mesmo tempo que ilustra o potencial tecnológico e de inovação da energia solar (FU; JAMES; WOODHOUSE, 2015; BERNREUTER, 2024).

Considerando o processamento do silício, nota-se que ainda há limitações associadas à fabricação e manufatura que podem ser otimizadas para aumentar a sua eficiência e viabilidade econômica. O principal custo provém da produção de *wafers*, que são finas lâminas cortadas a partir de lingotes. O corte de *wafers* de silício cristalino é realizado, convencionalmente, pelo método *Multi Wire Slurry Sawing* (MWSS), no qual um único fio de aço inoxidável, cuja disposição forma uma malha de fios paralelos, é combinado a um meio fluido abrasivo. Sob uma abordagem diferente, no corte via *Diamond Wire Sawing* (DWS), emprega-se um fio recoberto de diamantes como abrasivos, fixados por eletrodeposição, constituindo uma das etapas de processamento. Para o pós-processamento de superfícies, empregam-se polimento, lapidação, texturização, etc. O método DWS é mais uma alternativa de corte para materiais frágeis, sendo amplamente adotado e consolidado na indústria, já superando o método MWSS para o processamento de silício (YIN *et al.*, 2021). Comparativamente, o processamento de materiais frágeis via DWS apresenta vantagens significativas em diversos aspectos, como na possibilidade de emprego de água como fluido lubrirrefrigerante, maior eficiência de corte e maior taxa de remoção de

material, sendo de 3x-6x maior que no MWSS (COSTA, E. C., 2019; WALLBURG *et al.*, 2022).

Conforme a classificação de processos de usinagem, o processo de corte por fio diamantado se enquadra em processos de ferramenta de geometria não definida, em que grãos abrasivos são alojados de forma aleatória sobre o fio. A disposição de gumes abrasivos para o corte de materiais frágeis, no método DWS, assim como no MWSS, resulta em danos à integridade da superfície que afetam as propriedades do semicondutor, comprometendo a eficiência de conversão energética das células solares. Dentre esses danos, destacam-se a amorfização das camadas da superfície e a formação e propagação de trincas e microtrincas. Além disso, o desgaste contínuo dos grãos abrasivos eletrodepositados junto à vibração e deflexão do fio induzem à perda de corte e ao rompimento da ferramenta. Esses fenômenos surgem como perturbações inerentes ao processo que, por sua vez, dificultam o controle sobre a integridade da superfície necessária para o alto desempenho de conversão energética exigida (WU, 2016).

Nessas circunstâncias, buscando o equilíbrio entre a obtenção de qualidade de superfície e produção ágil e eficiente, o desenvolvimento de estratégias de monitoramento, manutenção e controle do processo de corte são indispensáveis. Os três tipos de manutenção dividem-se em: 1) manutenção corretiva, que estabelece a ação de manutenção imediatamente após a falha; 2) manutenção preventiva, que se fundamenta em manutenções realizadas em intervalos regulares para prevenir falhas e reduzir a incidência de quebras; e 3) manutenção preditiva ou baseada em condição, em que decisões de manutenção são tomadas com base em condições de processo ou de operação da máquina capturadas pelo monitoramento do sistema, maximizando, desta forma, a eficiência operacional e disponibilidade (RANDALL, 2021).

Realizando uma analogia com o princípio da manutenção preditiva, técnicas de monitoramento, no contexto de processos de fabricação, atuam de forma semelhante. O acompanhamento e controle de variáveis do processo permitem a extração de informações relevantes que auxiliam na tomada de decisões com base nas condições de corte e de desgaste da ferramenta.

A avaliação da condição de um processo ou uma máquina pode ser abordada utilizando diferentes parâmetros de análise, em que o critério de seleção depende principalmente do tipo de processo, operação, máquina, disponbilidade de sensores e de eventos característicos que se pretendem detectar. O monitoramento de parâmetros como vibração, lubrificante, temperatura e de sinais de emissão acústica (EA) são os mais utilizados no monitoramento de máquinas e de processos de fabricação (MOHANTY, 2014; RANDALL, 2021; DORNFELD, David; LEE, D.-E., 2008).

A técnica de EA deriva da detecção de ondas elásticas propagadas em meios sólidos e se caracteriza por abranger faixas de frequências mais elevadas (10∼2000 kHz). Para muitas aplicações de monitoramento de processos de usinagem, técnicas de EA são as mais

eficientes na detecção de eventos de interesse e na correlação de parâmetros, enquanto técnicas de monitoramento de vibração são mais adequadas para análise de componente de máquinas (DORNFELD, David; LEE, D.-E., 2008; IDA; MEYENDORF, 2019; HELLIER, 2013).

Relativo ao corte por fio diamantado, o atrito, contato, remoção de material e demais interações entre ferramenta e peça podem ser consideradas como fontes de EA. Estes fenômenos podem, da mesma forma, ser identificados como eventos acústicos singulares ou contínuos durante o processo. Dessa forma, o emprego da técnica de EA permite verificar o comportamento do processo por meio da extração de sinais que apresentam correlações com as variáveis relevantes, como taxa de remoção de material, desgaste de ferramenta e qualidade da superfície. Além disso, é possível detectar situações de ocorrências específicas, como o contato entre ferramenta-peça, sendo bem caracterizado em sinais no domínio do tempo.

No entanto, observa-se que na literatura de usinagem via DWS de materiais frágeis há lacunas a serem preenchidas referentes a métodos de monitoramento de processo e sobre acompanhamento de desgaste do fio por métodos indiretos. Inexistentes, portanto, são os estudos voltados para a aplicação de técnicas de EA nesse contexto.

Diante desse contexto, a necessidade da determinação de uma abordagem experimental investigativa a respeito da aplicação de técnicas de EA no processo DWS, que permita avaliar interações ferramenta-peça e perturbações do processo a partir de sinais EA, torna-se evidente e constitui o principal escopo do trabalho. O desenvolvimento do trabalho visa estabelecer uma base inicial para métodos de monitoramento de DWS, oferecendo novas perspectivas para a otimização do processo e abrindo o caminho para futuras pesquisas.

O trabalho parte, em um primeiro momento, da avaliação de dois tipos de sensores EA: base magnética e base parafusada em relação ao seu posicionamento na máquina-ferramenta, buscando determinar a posição ótima e influência na aquisição do sinal bruto de emissão acústica $\mathrm{EA_{RAW}}$. Determinada a configuração de sensor mais adequada, busca-se identificar faixas de frequências específicas das fontes de EA no corte por fio diamantado, ainda não descritas na literatura, através do emprego de técnicas e ferramentas para processamento de sinais. Paralelamente, filtros digitais são avaliados para minimização do ruído gerado no sinal em virtude da configuração construtiva da máquina ferramenta (motor de passo, bomba, mesas deslizantes, transmissão, etc.).

Estabelecidos os parâmetros iniciais, segmenta-se o trabalho em três abordagens sistemáticas diferentes para a caracterização do processo: **1) caracterização cinemática**, em que sinais $\mathrm{EA_{RAW}}$ são capturados sob diferentes condições cinemáticas de velocidade corte ($\mathrm{v_s}$) e velocidade de avanço ($\mathrm{v_f}$), buscando identificar variações nos sinais sob diferentes perspectivas de análise; **2) detecção de contato e transição**, em que investigam-se, por meio de sinais $\mathrm{EA_{RMS}}$ e $\mathrm{EA_{RAW}}$, os primeiros contatos entre gumes abrasivos e peça

a partir do avanço da ferramenta, assim como o fenômeno de transição, em que nota-se uma dinâmica particular da deflexão do fio conforme o avanço; **3) acompanhamento de desgaste de ferramenta**, para o monitoramento de cortes de longa duração para verificação do comportamento do fio e dos mecanismos de evolução de desgaste envolvidos ao longo do tempo. Nesta mesma abordagem, são estabelecidas três condições de ferramenta, conforme o tempo de corte (baseado na curva de desgaste), permitindo uma análise instantânea, *i.e.* em janelas do sinal, relacionada à progressão de desgaste.

Propõe-se, complementarmente, o desenvolvimento de um modelo de limite (*threshold*) estático e dinâmico para monitoramento *on-line* do processo, que pode servir para detecção de contato ou de eventos de grande intensidade no corte.

Considerando o conjunto das três abordagens propostas, diferentes técnicas de processamento de sinal são empregadas conforme o fenômeno em estudo, abrangendo o domínio do tempo, domínio da frequência e o plano tempo-frequência. As ferramentas de processamento são implementadas via linguagem de programação Python, buscando integrar um algoritmo para a aquisição de dados e estruturação de uma base de dados adequada para facilitar a análise conforme as diversas variáveis de processo envolvidas em cada operação.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo investigar, a partir de uma abordagem experimental, a aplicação da técnica de EA no processo de corte de materiais frágeis por fio diamantado contínuo. A implementação da metodologia de análise por EA busca caracterizar diferentes aspectos físicos e cinemáticos do processo, até então não investigados sob essa perspectiva. Sinais $\mathrm{EA_{RAW}}$ e $\mathrm{EA_{RMS}}$ do processo serão adquiridos para extrair informações relevantes acerca das condições de corte, detecção de contato e desgaste de ferramenta.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos podem ser especificamente divididos em:

a) Desenvolver um algoritmo para estruturação e organização de base de dados integrado à aquisição de sinais;

b) Empregar diferentes ferramentas de processamento de sinais digitais (domínio do tempo, domínio da frequência e plano tempo-frequência) para extração de características de sinais do processo;

c) Avaliar sinais $\mathrm{EA_{RAW}}$ de dois tipos de sensores EA (base magnética, base parafusada) quanto ao seu posicionamento em relação à fonte de EA durante o

processo;

d) Obter sinais de EA relativos à maquina ferramenta e ao processo de corte para desenvolver um filtro passa-banda de modo a suprimir ruidos indesejados que não agregam informações ao sinal extraído em relação ao corte;

e) Identificar faixas específicas de frequências características do processo de corte por fio diamantado de materiais frágeis;

f) Extrair informações de sinais EA para caracterização cinemática em função de diferentes velocidades de corte v_s e velocidades de avanço v_f;

g) Identificar contato entre ferramenta-peça e faixa de transição a partir de avaliação de sinais EA_{RMS};

h) Desenvolver um limite *threshold* estático e dinâmico para monitoramento do processo e detecção de eventos;

i) Avaliar sinais EA_{RAW} e EA_{RMS} para acompanhamento caracterização de desgaste de ferramenta de fio diamantado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo introduz a fundamentação teórica e embasamento técnico, abordando conceitos fundamentais para o desenvolvimento do trabalho. Primeiramente, apresentam-se, na Seção 2.1, os conceitos de mecânica da fratura associada à usinagem de materiais frágeis. Na Seção 2.2 expõe-se uma revisão em relação ao corte por fio diamantado. Além disso, são abordados aspectos específicos acerca da técnica DWS com fio diamantado contínuo empregada no trabalho. Tomando por referência a literatura de aplicação de EA em processos de retificação, em que podem ser identificadas características análogas ao DWS, a Seção 2.3, detalha aspectos específicos da técnica de EA considerando transdutores e os fenômenos de propagação das ondas elásticas associadas a eventos específicos durante o corte. A Seção 2.4 concentra-se na exposição das técnicas e ferramentas de processamento e análise de sinais empregadas para extração de informações relevantes do sinal.

2.1 USINAGEM DE MATERIAIS FRÁGEIS

Inovações tecnológicas na indústria eletrônica com aplicações em circuitos, instrumentação, painéis FV e sensores MEMS conferiram grande relevância a materiais cristalinos de propriedades semicondutoras como o silício, germânio, arsenieto de gálio e safira. Essa classe de materiais ganhou destaque por suas propriedades ópticas e físicas, resultando em um fenômeno de transição na indústria convencional de semicondutores (WODITSCH; KOCH, 2002). Os materiais se destacam não apenas por suas propriedades de semicondutor, mas por suas características de alta dureza e baixa tenacidade à fratura. Por serem de natureza frágil, apresentam baixa usinabilidade em termos de qualidade da superfície. Em decorrência dessa característica frágil, a etapa de usinagem e processamento desses materiais de alto valor agregado torna-se uma etapa crítica no processo de fabricação. Em um setor em que se exige um nível de precisão de acabamento tão alto, a introdução de danos à integridade da superfície da peça se destaca como um dos principais desafios relacionados ao corte de materiais frágeis (KÖNIG, Wilfried, 2006; KLOCKE; KUCHLE, 2009; NEO; KUMAR, A. S.; RAHMAN, 2012).

Considerando a fragilidade de materiais, os mecanismos de deformação podem variar quanto à reversibilidade energética da transformação. Quando tensões compressivas ou cisalhantes resultantes superam valores de tensão do regime elástico do material, o processo passa a ser irreversível associado à dissipação de energia excessiva. As deformações irreversíveis são, portanto, divididas quanto à plasticidade e à fragilidade. A plasticidade está associada ao mecanismo dúctil de corte ou Modo de Remoção Dúctil (MRD), em que ocorre o escoamento plástico na remoção de material devido aos esforços cisalhantes que perturbam a rede cristalina. No Modo de Remoção Frágil (MRF), a remoção de material é caracterizada pela formação de fraturas macroscópicas e propagação de trincas e microtrincas, provocando danos à integridade da superfície (BIFANO, Thomas G; DOW;

SCATTERGOOD, 1991; ANTWI; LIU; WANG, 2018).

Devido à introdução de danos que afetam nas propriedades desejadas dos materiais, apesar do regime MRF ser predominante nas operações de processamento e acabamento dos materiais frágeis, foram estudadas maneiras de se minimizar o regime frágil no processo de corte. Foi visualizado pela primeira vez, por King e Tabor (1954), a possibilidade de induzir mecanismos de remoção dúctil MRD em ensaios de riscamento de sais de rocha, em que verificou-se a predominância do MRD sobre o MRF. Desde então, a introdução do regime dúctil em materiais frágeis tem sido amplamente estudada, verificando que em profundidades de corte suficientemente pequenas ($\sim$1 μm), o regime de remoção de material torna-se independente da natureza do material (dúctil, frágil, cristalino, amorfo, etc.). Pode-se compreender este fenômeno da seguinte forma: na medida que a profundidade de corte é reduzida, o regime MRD torna-se energeticamente mais favorável em relação à propagação de trincas (BIFANO, Thomas G; DOW; SCATTERGOOD, 1991).

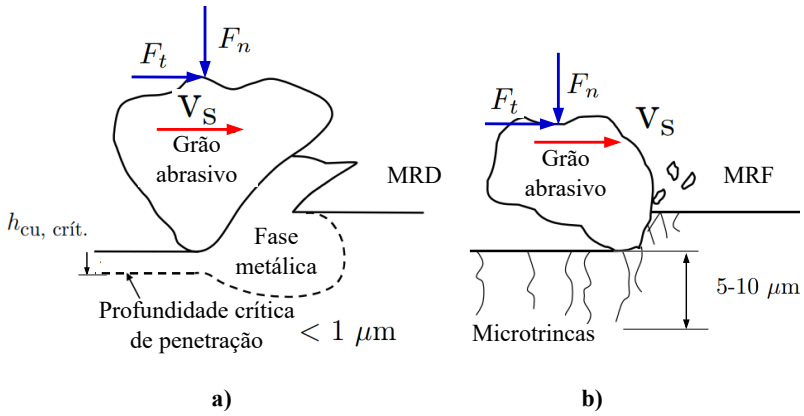


Figura 1 – Modo de remoção dúctil e frágil em materiais frágeis. a) MRD; b) MRF.

Fonte: Adaptado de Domnich e Gogotsi (2002).

Observa-se, portanto, uma região de transição nos materiais relacionada ao regime de remoção dúctil e frágil associada a uma profundidade de penetração crítica $h_{\text{cu, crít.}}$ dos abrasivos na peça (BLACKLEY; SCATTERGOOD, 1991). Configura-se o comportamento dúctil devido a uma transfiguração do material para uma fase metálica, independente da sua natureza, sobre solicitações hidrostáticas, conforme mostrado no esquema da Fig. 1 (DOMNICH; GOGOTSI, 2002).

A fratura do material, relacionada a formação de microtrincas, caracteriza-se por um evento de liberação de energia no material. O mecanismo de formação e propagação de microtrincas na subsuperfície do material foi detalhado em ensaios de indentação conforme Lawn e Wilshaw (1975), em que a carga normal do indentador sobre a peça, primeiramente em regime plástico, ao superar a tensão de escoamento do material, forma trincas abaixo da região de transição, que tendem a propagar-se na medida em que se aumenta a carga aplicada. Em estudos posteriores, foram identificadas três fases de progressão de danos

na superfície: 1) contato e deformação elástica; 2) aumento da espessura de cavaco não-deformado e deformação plástica; 3) formação de trincas laterais e axiais e remoção de material na forma de fragmentos (SWAIN, 1979).

De maneira geral, o mecanismo de remoção MRD produz uma superfície livre de danos de subsuperfície e de trincas/microtrincas, sendo relevante para a fabricação de *wafers*. Há, portanto, para este modo de remoção, um limiar de pressão de contato que resulta em uma mudança de fase induzida. Da mesma forma, pode-se associar uma espessura de cavaco não-deformado crítica para a transição entre os regimes de corte dúctil ou frágil (KUMAR, A.; MELKOTE, 2018).

2.2 USINAGEM COM FIO DIAMANTADO

Os processos de usinagem com ferramentas de geometria não definida englobam operações em que a interação entre ferramenta-peça não pode ser determinada de forma determinística. Nestas operações, os gumes de corte são formados por grãos abrasivos cuja posição, tamanho e formato são indeterminados. Esses grãos entram em contato com a peça provocando a remoção de material. Se enquadram, nesta definição os processos convencionais de retificação, lapidação e polimento, para exemplificar (KÖNIG, Wilfried, 2006).

Considerando a cinemática e as interações ferramenta-peça do processo de corte por fio diamantado, pode-se incluir este processo conforme a definição de operações de ferramenta de geometria não definida. No processo em questão, grãos abrasivos de diamante, por meio de uma disposição em uma suspensão fluídica ou fixação por ligante metálico ou resinóide distribuídos de forma aleatória, servem como gume para a ferramenta de corte (COSTA, E. C., 2019).

O processo de corte por fio diamantado é classificado quanto a disposição dos abrasivos em relação ao fio: abrasivos em suspensão livre ou fixados. O método mais convencional relacionado a corte de silício é por abrasivos livres, correspondente ao *Multi Wire Slurry Sawing* (MWSS), em que lingotes de silícios são introduzidos a uma malha de múltiplos fios de aço trefilado (aço mola ASTM-228 ou aço austenítico AISI 304) (CÓRDULA, 2023), possibilitando o corte simultâneo de mútiplos de *wafers*. Apesar deste método ter sido extensamente empregado na indústria nas últimas décadas, vislumbra-se o método *Diamond Wire Sawing* (DWS), em que grãos abrasivos são fixados a um único fio, como uma alternativa ecologicamente mais viável, além de apresentar vantagens econômicas, já detendo maior parte do mercado em relação ao corte de silício (WU, 2016).

Muito embora os dois processos supracitados se enquadrem dentre os mais utilizados na indústria de corte de materiais frágeis, visualizam-se, hoje, esforços direcionados para a concepção de novas alternativas relacionadas com a tecnologia do fio diamantado. Como exemplo de tecnlogias inovadoras emergentes nessa área podem ser citados os métodos EWS, DWEDS, DWECDS para a combinação de fio diamantado e descargas

eletroquímicas; e UADWS, que se utiliza de vibrações ultrassônicas para o corte. Essas técnicas, ainda emergentes, utilizam princípios semelhantes ao processo de corte por fio diamantado (ZHANG, N.; LI, H.; GAO, 2024).

2.2.1 *Multi Wire Slurry Sawing* (MWSS)

A disposição de um fio de aço trefilado em um um sistema de cilindros guias, que forma uma malha, junto de um escoamento de um meio fluídico (geralmente polietilenoglicol) na direção de corte fio, consiste no princípio de funcionamento do método MWSS. A remoção de material e corte de múltiplos *wafers* se dá pela interação dos abrasivos suspensos em solução com a peça a partir do movimento no sentido da velocidade de corte v_s. De forma simultânea, o movimento de introdução da peça na malha de fios é controlada pela velocidade de avanço v_f (WU, 2016).

Um esquema da máquina empregada no processo e da cinemática é ilustrado na Fig. 2, em que o carretel de entrada alimenta o fio, sendo enrolado conforme os sulcos dos cilindros que impõem a espessura dos *wafers*. O carretel de saída conduz os fios para a saída ou realimentação do processo.

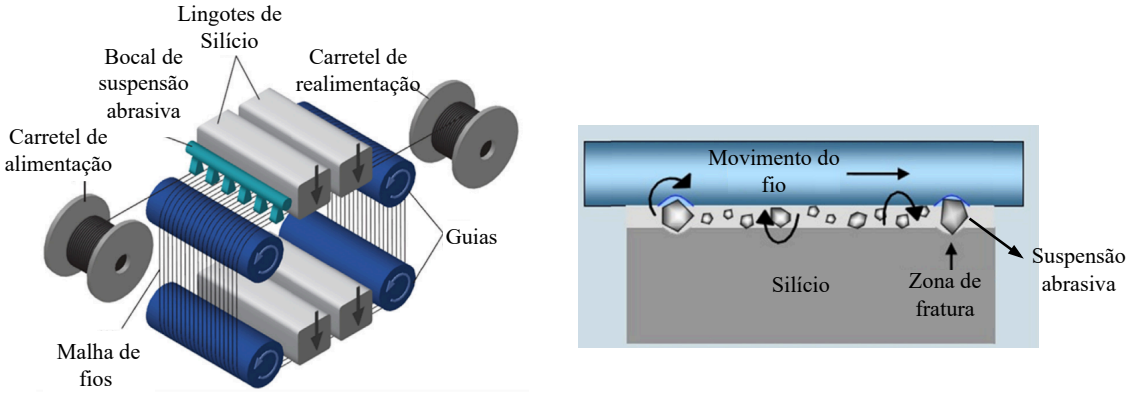


Figura 2 – Esquemático do processo MWSS. a) Máquina ferramenta; b) Interação ferramenta-peça.

Fonte: Adaptado de Wu (2016).

Os parâmetros cinemáticos do MWSS correspondem a uma velocidade de corte v_s na faixa de 10∼35 m/s; a velocidade avanço v_f é limitada a 0,3∼0,5 mm/min. É necessário utilizar um longo comprimento de fio em uma bobina, da ordem de 300∼500 km, por se dispor de um fio não contínuo no processo. A ordem de grandeza de processamento, para um lingote de silício de seção 156 x 156 mm^2, é de ∼6500 *wafers*/dia. Além disso, a dissipação viscosa devido ao atrito entre fluido e peça pode provocar um aumento de temperatura no substrato da ordem de 40∼60 ^oC. É importante mencionar, também, que não se verifica a presença de regimes de remoção dúcteis MRD neste método. Apesar do

MWSS ter baixo custo agregado em seu processamento, comparado aos demais processos de corte de materiais frágeis, o descarte da solução abrasiva usada contendo partículas de carbeto de silício e a separação dos cavacos de silício tornam o processo ecologicamente insustentável (KUMAR, A.; MELKOTE, 2018).

2.2.2 *Diamond Wire Sawing* (DWS)

Como forma alternativa de processamento de materiais frágeis, a fixação de grãos de diamante sobre um fio de aço constitui a principal característica da técnica DWS. Neste método, grãos abrasivos são alojados de forma aleatória sobre a alma do fio com orientação e trajetórias pré-definidas. Essa restrição quanto ao movimento dos abrasivos impõem uma trajetória que pode ser considerada plana, tornando possível a formação de perfis de corte dúcteis conforme o regime MRD. A deposição dos abrasivos pode ser obtida através de uma camada ligante sendo metálica ou resinóide (KLOCKE; KUCHLE, 2009; COSTA, E. C., 2019).

A tecnologia de fixação de abrasivos em ferramentas por ligante metálico abrange processos de sinterização, brasagem e eletrodeposição. O fio diamantado, por conter camada única, *i.e.* monoligante, é limitado à eletrodeposição. Caracteriza-se a eletrodeposição pelo revestimento de uma fina camada de metal sobre outro, em que o material de base é imerso em uma solução eletrolítica contendo o material que se pretende revestir, aplicando, assim, uma corrente. Para haver a condução elétrica, o material deve ser de natureza condutora, o que não é característico de abrasivos de diamante. Para isso, um substrato de níquel é adicionado como um metal de sacrifício, possibilitando a fixação dos abrasivos cuja deposição formam o perfil da ferramenta, conforme ilustrado na Fig. 3 (MODESTO, 1997).

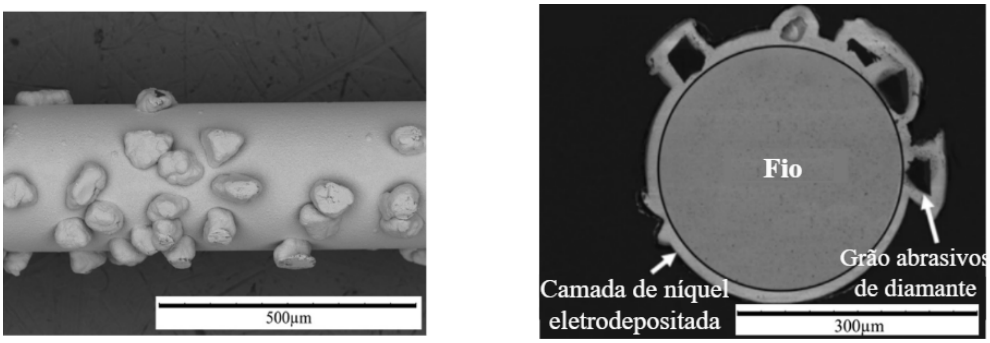


Figura 3 – Ferramenta de fio diamantado DWS. a) Micrografia do fio diamantado eletrodepositado; b) Micrografia da seção tranversal do fio diamantado.

Fonte: (COSTA, E. C. *et al.*, 2020).

Considerando a presença do regime MRD neste método, o DWS se apresenta como uma alternativa viável para o processamento de materiais frágeis livres de dano na

subsuperfície. Entretanto, o que ocorre na prática é uma mistura de regimes MRD e MRF no processo, influenciados parcialmente pelos parâmetros cinemáticos de velocidade de corte v_s e velocidade de avanço v_f. Abordagens experimentais e de modelagem numérica determinaram uma combinação de parâmetros ótima para a remoção dúctil (COSTA, E. C. *et al.*, 2025; BELLEN, 2024). A Fig. 4 ilustra um esquema da cinemática do fio representando remoção de material, formação de trincas e parâmetros cinemáticos relevantes (KUMAR, A.; MELKOTE, 2018).

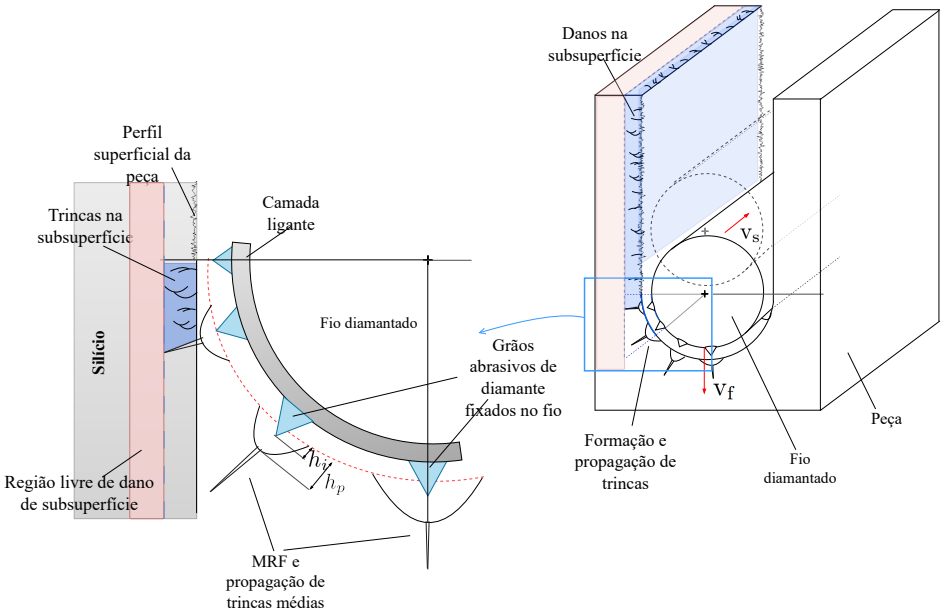


Figura 4 – Cinemática do processo DWS.

Fonte: Autor, baseado em Bellen (2024).

Comparativamente, o método DWS apresenta vantagens quanto às limitações cinemáticas. A velocidade de corte é similar, na faixa de 10∼35 m/s, enquanto se verifica um aumento na faixa aceitável para velocidade de avanço, de 0,5∼2,0 mm/min. O processo DWS se mostra, da mesma forma mais produtivo e eficiente: considerando as mesmas dimensões do lingote de silício anteriormente mencionado, o processamento diário pode chegar a 13800 *wafers*/dia. Além disso, a solução abrasiva repleta de material contaminante, outrora utilizada no MWSS pode ser substituída por uma solução baseada em água, evidenciando a viabilidade sustentável do processo (KUMAR, A.; MELKOTE, 2018).

2.2.2.1 Fio Diamantado Contínuo

As técnicas de corte por fio diamantado mencionadas anteriormente dispõem da utilização de grandes comprimentos de fio alimentados por um carretel. Uma inovação tecnológica utilizada para o reaproveitamento da ferramenta de corte, amplamente utilizada para fins acadêmicos, é a utilização do movimento de corte por fio diamantado contínuo.

Nesta aplicação, as extremidades da ferramenta de corte são unidas, formando um *loop* contínuo da ferramenta de corte (KNOBLAUCH, Ricardo *et al.*, 2017a).

Semelhante aos processos anteriores, o movimento de corte se dá pelo acionamento de polias guia, porém com um trecho significativamente menor de fio, em que o ciclo de corte se repete para cada passagem de comprimento útil do fio unido. Dessa forma, a utilização do fio diamantado contínuo se mostra particularmente útil para simular parâmetros cinemáticos na indústria, evitando a utilização dispendiosa de ferramenta e material. Além disso, torna-se possível, inclusive, acompanhar o desgaste da ferramenta através da observação de grupos de grãos abrasivos, ou até abrasivos unitários (KNOBLAUCH, Ricardo *et al.*, 2018; RONSONI, 2024).

O processo de união dos fios foi estudado por Souza (2019) e Barcelos (2023), em que pelo princípio da soldagem de topo, protótipos de máquina de soldagem de fio diamantado foram desenvolvidas. Em decorrência do ponto crítico do fio ser na região da solda, as etapas de soldagem demandam um cuidado rigoroso e são divididas em: 1) corte de um segmento de fio; 2) preparação e lixamento das extremidades para assegurar o paralelismo das superfícies em contato; 3) alinhamento das pontas do fio na bancada experimental garantindo a concentricidade; 4) aplicação de uma corrente elétrica por um determinado período, somada à força proporcionada por uma mola de fixação, que possibilitam a solda de topo; 5) lixamento posterior da junta de solda na região da união (BARCELOS, 2023).

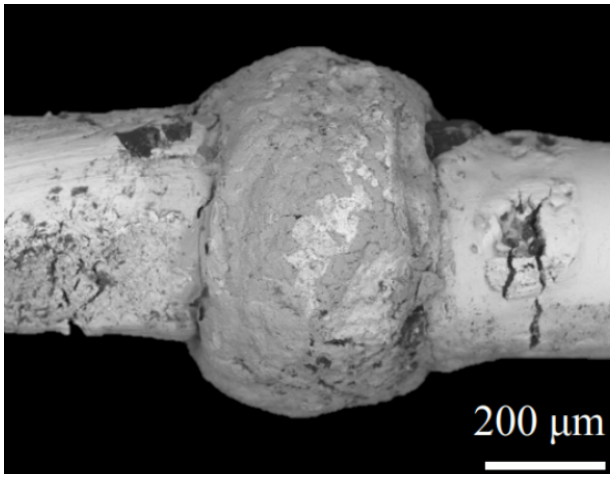


Figura 5 – Região da solda no fio diamantado.

Fonte: (KNOBLAUCH, R., 2019)

A Fig. 5 ilustra a região de soldagem do fio, em que é possível visualizar a zona termicamente afetada pelo calor na soldagem. Foi relatado que há uma alteração significativa na estrutura cristalina do fio, em que a predominância de grãos de tamanho maior, ou grosseiros, sugerem um processo de recristalização no tratamento térmico do fio durante a soldagem (KNOBLAUCH, R., 2019).

2.3 MONITORAMENTO DE CONDIÇÃO E PROCESSO POR EMISSÃO ACÚSTICA

2.3.1 Aspectos gerais de monitoramento de condição e processo

A crescente competitividade entre as empresas, em uma escala global, tem provocado uma demanda que acaba por exigir melhores qualidades de acabamento de produtos, redução de custos de fabricação e uma pressão contínua para aumentar eficiência de processos a nível de manufatura. Somado a isso, a escassez cada vez maior de operadores experientes de máquinas tem forçado os fabricantes a buscar alternativas tecnológicas de forma a manter as qualidades exigidas pelo meio. Nesse contexto, fabricantes tem procurado cada vez mais soluções de automação de processos para atender as demandas, garantindo consistência e repetibilidade de operações, deixando de ser dependente exclusivamente de pessoas ou operadores que estão, naturalmente, sujeitos a erros (LIANG, Steven Y; HECKER; LANDERS, 2004).

Conforme discutido pelos renomados autores nas áreas de produção e gestão da qualidade Slack, Chambers, Johnston *et al.* (2009) e Campos (2014), a implementação adequada, em uma linha produtiva, de estratégias de manutenção de máquinas e de controle de processos, além de reduzir custos, contribui para disponibilidade, vida útil, confiabilidade e desempenho contínuo de máquinas, maximizando, dessa forma, a eficiência da cadeia. Dentre as três formas de manutenção, a manutenção preditiva, apesar do alto custo de investimento, se encaixa como mais adequada considerando a automação e otimização de processos. Enquanto a manutenção corretiva, logo após a falha, se caracteriza por sua imprevisibilidade, comprometendo a linha produtiva; a manutenção preventiva, feita em intervalos regulares, pode produzir custos desnecessários. Por último, a manutenção preditiva parte do monitoramento de condição da máquina ou ferramenta. O monitoramento contínuo do estado em que a máquina e ferramenta se encontram, além de ser capaz de transmitir informações a respeito de fenômenos específicos do processo, levanta dados necessários para avaliação e tomadas de decisão que podem reduzir custos (KARDEC; NASCIF, 2009).

Relativo ao controle de processos de fabricação, sistemas típicos de monitoramento operam conforme a seguinte lógica: existem, na região de corte, diversas variáveis relacionadas ao processo, como vibrações, taxa de remoção de material, ruído, desgaste de ferramenta, temperatura e acabamento, que são influenciadas pelo estado da ferramenta de corte e pelas condições cinemáticas do processo. Dessa forma, as variáveis e parâmetros relevantes podem ser medidas diretamente ou indiretamente através da utilização de sensores e/ou transdutores, que se torna economicamente mais viável. Os sinais extraídos dos sensores são, em seguida, processados no domínio do tempo e da frequência, gerando informações acerca da condição da ferramenta e do processo. Essas características dos sinais são analisadas por sistemas de decisão (intervenção humana ou não) para um então diagnóstico final (TETI *et al.*, 2010).

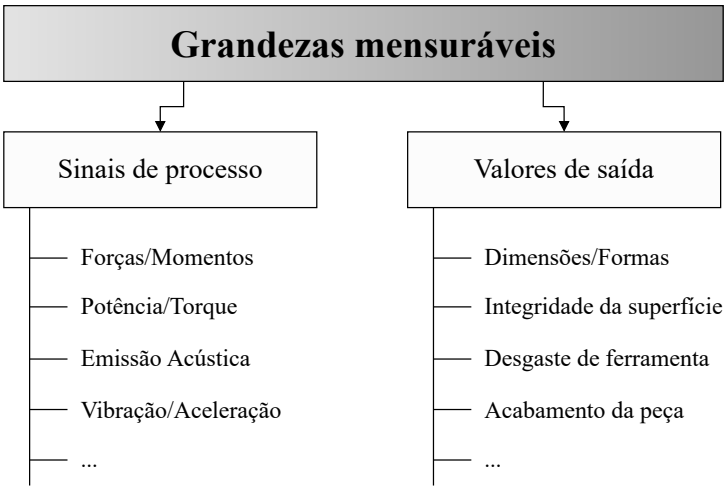


Figura 6 – Distinção entre variáveis do processo e saída.

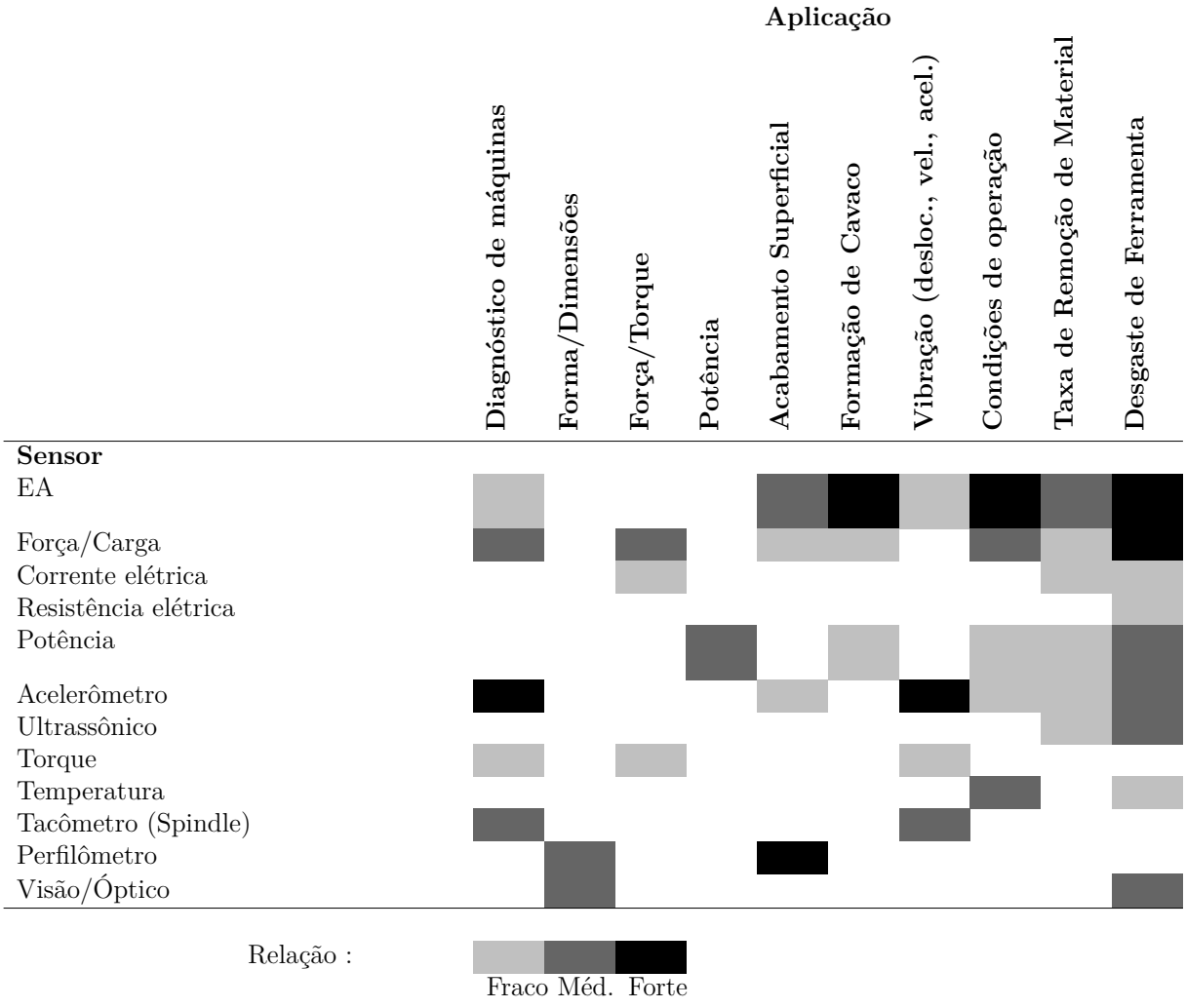
Fonte: Adaptado de Tönshoff, Friemuth e Becker (2002).

O cerne da questão, a partir do que foi exposto sobre monitoramento, reside, portanto, na extração de informações relevantes acerca das variáveis envolvidas no processo. Dada a complexidade inerente de processos de fabricação, muitas das variáveis associadas às operações, como desgaste de ferramenta ou integridade da superfície não podem ser mensuradas diretamente com facilidade. Assim, as técnicas de medição de monitoramento são divididas em abordagens diretas ou indiretas. A forma direta de medição envolve a quantificação real de uma variável. Por exemplo, no caso de desgaste de ferramenta, uma medição direta pode ser realizada empregando inspeção visual da própria ferramenta por meio de processamento de imagem via câmeras. Esta abordagem, apesar da alta precisão de diagnóstico, devido às limitações de aplicação prática, são mais restritas à pesquisa e trabalhos acadêmicos. A forma indireta, por outro lado, expressa as grandezas por meio de correlações entre variáveis de interesse e sinais de sensores (vibração, temperatura, EA, etc.). Além disso, a abordagem indireta permite, também, a utilização de sistemas de monitoramento *on-line* não intrusivos que não interferem no processo analisado, embora fontes de incerteza como ruídos indesejados estejam presentes nessa forma de análise. Os métodos de caracterização *in-process* ou *on-line*, de forma geral, assim como a implementação de Sistema de Monitoramento de Condição de Ferramenta (SMCF) para análise e previsão de desgaste ferramenta estão incluídos na forma indireta. Dessa maneira, a implementação de um sistema de monitoramento de processo por sensores demonstra-se viável para processos de usinagem, além de ser amplamente utilizado em aplicações na indústria (TETI *et al.*, 2010; KUNTOĞLU *et al.*, 2020).

Uma extensa variedade de sensores e suas combinações podem ser empregados para análise de parâmetros específicos, de modo a se extrair informações e eventos singulares signifcativos relacionados à condição da ferramenta ou processo. Dentre as diversas variáveis e estratégias de monitoramento, pode-se aplicar o monitoramento de sinais vibratórios

em máquinas, a partir da caracterização dos sinais característicos de elementos de máquinas (RANDALL, 2021); monitoramento de temperatura, perturbada por fenômenos de aquecimento em componentes elétricos (BAGAVATHIAPPAN *et al.*, 2013); ou análise de propriedades de fluídos lubrirrefrigerantes, por conter informações sobre desgaste ou vazamentos (WAKIRU *et al.*, 2019). A Tab. 1 reúne diferentes tipos de sensores e estratégias de monitoramento de máquinas e, sobremodo, seu emprego em SMCF considerando suas aplicações específicas referentes às variáveis de processo.

Tabela 1 – Aplicação de sensores para monitoramento de condição e processo.



Fonte: Baseado em David Dornfeld e Dae-Eun Lee (2008) e Guimarães *et al.* (2004).

2.3.2 Monitoramento de condição e processo por emissão acústica

Há muito tempo, operadores de máquinas utilizam o som durante a usinagem para monitorar o processo de corte, identificando variações mínimas, considerando as diversas variáveis de processo, como desgaste da ferramenta. A propagação sonora, outrora identificada pelos operadores mais experientes como um indicador característico, está associada à geração de ondas elásticas em um meio material devido à deformação e distorções/rearranjos da estrutura cristalina do material usinado. Assim, as perturbações na estrutura fornecem energia suficiente para a propagação das ondas de tensão em meios sólidos, líquidos ou gasosos, em um fenônemo conhecido como "ondas Rayleigh", ou simplesmente, ondas EA, que podem ser detectadas pelos sensores EA (KONIG, 1990; DORNFELD, David; LEE, D.-E., 2008).

A propagação das ondas elásticas de tensão se dá de forma volumétrica, em que são identificadas componentes longitudinais e tranversais de propagação nas ondas. Pode-se afirmar, desta forma, que devido à fenônemos de dissipação e amortecimento na rede atômica do material, a amplitude de uma onda de EA (A_{EA}) é função da distância da fonte (r_f) em que foi gerada a onda, sendo inversamente proporcional (LINKE, 2008). Esta relação sugere uma forte influência de posicionamento de sensores quanto à fonte de emissão na aquisição do sinal. Por isso, a seleção do local e a forma como os sensores EA são montados devem ser feitos de forma criteriosa.

Assim, a relação pode ser expressada pela Eq. (1), abaixo:

$$A_{\mathrm{EA}} = f({r_f}^{-1}) \approx 1/r_f \tag{1}$$

A energia de um sinal EA gerado em um processo de usinagem, assim como sua atenuação estão associados aos fenônemos de taxa de remoção de material, taxa de deformação, níveis de solicitação mecânica na peça e formação de cavaco. Estes eventos distinguem-se quanto à amplitude, transitoriedade, continuidade e à faixa de frequência envolvida de acordo com o processo em questão. Por isso, estratégias adequadas de monitoramento por EA surgem a partir do momento em que torna-se possível identificar correlações entre os parâmetros mencionados e mudanças nos sinais característicos de emissão. Entretanto, considerando o contexto do processo como um todo, fontes de ruídos perturbam o sinal com vibrações externas, influência de fluido lubrirrefrigerante, motor, transmissão, etc., que são captados pelos sensores, exigindo que o sinal seja posteriormente processado e/ou filtrado (DORNFELD, DA; KANNATEY-ASIBU, 1980).

Procurando garantir que o sinal contemple informações relevantes acerca do processo, deve-se garantir que a variação da fonte de interesse seja claramente identificada e diferenciada das demais. A eficiência de um sistema de monitoramento depende, portanto, da capacidade do projetista em compreender e ponderar todas as potenciais variáveis que influenciam de alguma forma no processo e na aquisição do sinal. Assim, deve-se levar em conta a variação da emissão conforme os eventos de interesse, relacionando-os às

fontes de emissão. A literatura disponível fornece uma cobertura abrangente e detalhada sobre este tema (DORNFELD, 1992). Felizmente, a literatura disponível tem amplamente documentadas relações e possíveis origens de fontes de EA em processos de fabricação. A Tab. 2 traz características específicas acerca de quais fenômenos/variáveis são influentes no sinal relativo às fontes de EA. Nota-se a influência de uma diversidade de parâmetros não controláveis que não são de interesse, sobremodo para processos de fabricação.

Tabela 2 – Relação entre fontes de EA e características de sinal.

Fonte EA	**Amplitude/Características do sinal**
Impacto mecânico	Força de contato entre elementos
Elementos rolantes	Velocidade relativa das superfícies dos elementos
Elementos translacionais	Velocidade de contato/impacto
Ruído hidráulico	Periodicidade/frequência da fonte
Engrenamento	Propriedades dos materiais em contato
Contato mecânico	Propriedades relativas ao materiais em contato (dureza, densidade, resistência mecânica)
Variação de tensão/corrente	Tipo de transmissão e aquisição de sinal
Atrito/fricção	Eficiência de acoplamento do sensor
Fratura do elemento	Tensão/corrente da descarga
Distorção do elemento (deformação plástica)	Taxa de propagação da fratura taxa de deformação volume de material deformado
	Efeitos de excentricidade/desvio
	Lubrificação

Fonte: Adaptado de Dornfeld (1992).

Considerando a usinagem de ultraprecisão, os sensores EA são suficientemente sensíveis para detectar fenômenos de perturbação na estrutura ou remoção de material do material, podendo alcançar a escala nanométrica. Na Fig. 7, são ilustrados sinais característicos de EA relacionados à remoção de material. A aplicação de EA se encontra em bandas elevadas de frequência, contemplando uma ampla faixa de detecção de eventos de remoção de material em diferentes escalas em comparação aos demais tipos de sensores. No contexto de precisão e monitoramento de processos, isso demonstra uma evidente versatlidade de sua aplicação.

Em aplicações práticas de monitoramento de processos de usinagem por sensores EA, os tipos de sinais extraídos podem ser divididos em sinais tipo *burst* e do tipo contínuo. Convencionalmente, associam-se os sinais contínuos às deformações e ao escoamento plástico, em que a formação de cavaco pode ser considerada regular e constante. Em contraste, o sinal tipo *burst* é caracterizado pela ocorrência de fenômenos específicos durante o processo, como a formação de trincas, fratura, rompimento da ferramenta, etc. Os sinais tipo *burst* compõem a principal fonte dos sinais EA. Esses sinais podem ser visualizados como picos definidos nos gráficos de aquisição de sinais brutos $\mathrm{EA_{RAW}}$. Entretanto, o que ocorre de fato nos sinais *burst* são eventos acústicos quase instantâneos e transitórios, que são gerados e atenuados em um período muito curto de tempo. Dessa forma, a sobreposição

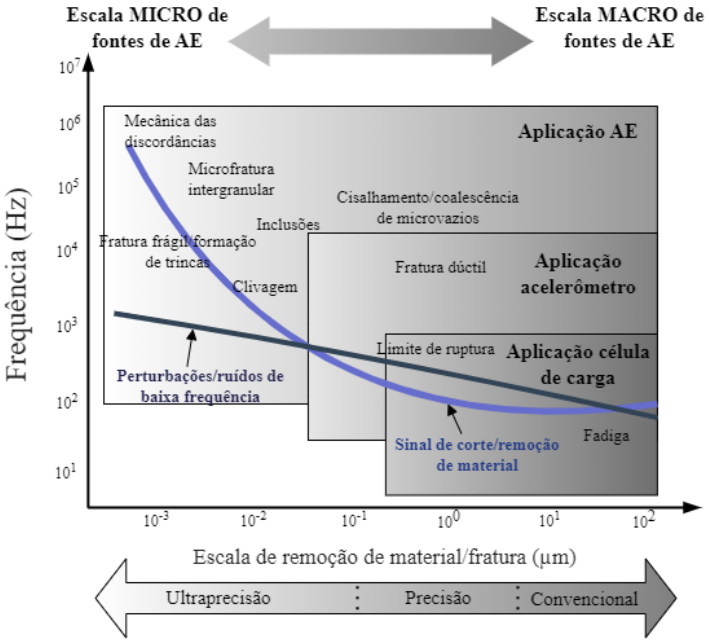


Figura 7 – Sinais característicos de fontes EA/ruído em diferentes escalas.

Fonte: Adaptado de David Dornfeld e Dae-Eun Lee (2008).

de milhares desses eventos forma um sinal que se assemelha a um sinal contínuo (KONIG, 1990; INASAKI, 1998; DORNFELD, David; LEE, D.-E., 2008; HELLIER, 2013).

A viabilidade de aplicação e montagem combinada com a alta sensibilidade para detecção de eventos contínuos ou transitórios, especificamente em processos de usinagem, permite o monitoramento por EA ser empregado em uma variedade de aplicações. Além disso, a faixa elevada de frequência de 10∼2000 kHz é favorável, sobremodo em processos de fabricação, ao contrário de diagnóstico de máquinas, em que predominam as baixas frequências. Inicialmente, o uso de sinais EA foi aplicado por DA Dornfeld e Kannatey-Asibu (1980) em SMCF para avaliação de desgaste de ferramenta de geometria definida, em que a taxa de remoção de material foi relacionada de forma satisfatória com o sinal. Para o caso de geometria definida, o tipo de emissão, amplitude, energia e frequência do sinal pode, inclusive, ser bem modelado e previsto de forma analítica (PAN; DORNFELD, DA, 1986). O monitoramento por EA permite, da mesma forma, ser aplicado em processos de usinagem com geometria não definida, em que o contato de cada gume (contato friccional, ou remoção de material) com a peça pode ser considerada como uma fonte de emissão. O processo de retificação destaca-se pela ampla faixa de aplicação nessa área (KONIG, 1990), em que o método EA pode ser aplicado para caracterização topográfica de rebolos a partir de métodos de caracterização dinâmica (BOARON, 2009, 2015). Também, empregou-se em SMCF para monitoramento de desgaste de rebolo (LIANG, S.; DORNFELD, DA, 1989); e determinação do contato entre rebolo e peça por análise no domínio do tempo de sinais brutos EA_{RAW} (WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996).

2.3.3 Fontes de emissão acústica no corte por fio diamantdo

O processo de corte por fio diamantado se caracteriza pela remoção de material a partir da interação de grãos abrasivos de geometria não definida com a peça. Nesse caso, os contatos singulares de cada gume, seja contato friccional ou em determinado regime de corte são acompanhados por uma liberação de energia que se manifesta em ondas de tensão que se propagam pela peça (SUSIČ; GRABEC, 2000; MARINESCU *et al.*, 2006). Ao contrário do processo DWS, em que não há registros na literatura disponível sobre aplicação de EA, outros processos de geometria não definida, em especial, a retificação, a aplicação EA foi amplamente estudada e documentada (KLOCKE; KUCHLE, 2009).

Em particular, a disposição fixa de grãos sobre a superfície do fio no método DWS, imprime uma trajetória plana com relação à cinemática do processo. Desta forma, os mecanismos de remoção e cinemática do corte por DWS muito se assemelham ao processo de retificação convencional (COSTA, E. C., 2019). Distingue-se, entretanto, o DWS e a retificação com relação à rigidez de ferramenta, que está associada à detecção de contato. Considerando a flexibilidade da ferramenta de corte por fio diamantado, a caracterização de contato e interação da ferramenta mais se assemelham em relação ao processo de retificação por cinta (*belt grinding*) (PANDIYAN; TJAHJOWIDODO, 2019; CHENG *et al.*, 2020).

A movimentação em *loop* sucessiva da ferramenta do fio diamantado contínuo no DWS amplifica o efeito de desgaste dos grãos, ocorrendo de forma mais intensa comparado aos processos alternantes (modo peregrino), em razão do comprimento útil relativamente pequeno do fio (KNOBLAUCH, Ricardo *et al.*, 2018). Desta forma, ao longo do tempo, ocorre uma transformação das características geométricas e da forma dos gumes abrasivos em contato com a peça. De modo geral, observa-se o fenômeno de arredondamento e plataformização dos grãos, assim como a redução do diâmetro médio do fio devido aos mecanismos de desgaste de grãos (RONSONI, 2024).

Diante do exposto, diversas fontes distintas de EA, no corte por DWS, precisam ser consideradas. A Fig. 8 ilustra as diversas formas de geração de ondas de EA no processo. Observa-se que os mecaninsmos de remoção de material em função da protusão, mecanismos de desgaste e da propagação de trincas desempenham papel crítico de fontes de EA.

Associando os modos de remoção presentes no processo em questão às possíveis fontes de EA, é razoável distinguir os sinais contínuos ou *burst* com base nos regimes de corte. Em virtude da predominância dos mecanismos de deformação plástica, o regime MRD pode ser atribuído ao sinais contínuos. Nesse modo, o escoamento de cavaco é bem definido e não há formação de trincas. Já o MRF, é considerado como característico de sinais *burst*, em que os eventos de formação e propagação de trincas associadas aos danos de subsuperfície correspondem a liberação de uma grande quantidade de energia em um curto período de tempo (YIN *et al.*, 2021).

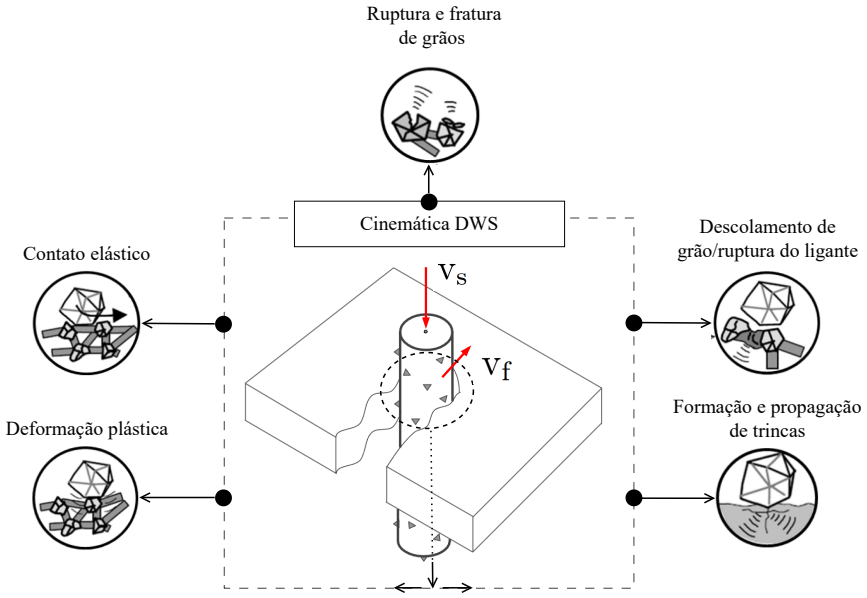


Figura 8 – Fontes de EA no processo DWS.

Fonte: Autor, 2024.

A Fig. 9 representa a distinção dos mecanismos MRD e MRF com respeito às fontes de EA consideradas. É importante notar que as fontes de emissão compreendem fenômenos de contato friccional, remoção de material e formação de trincas, propagando-se tanto na ferramenta quanto na peça.

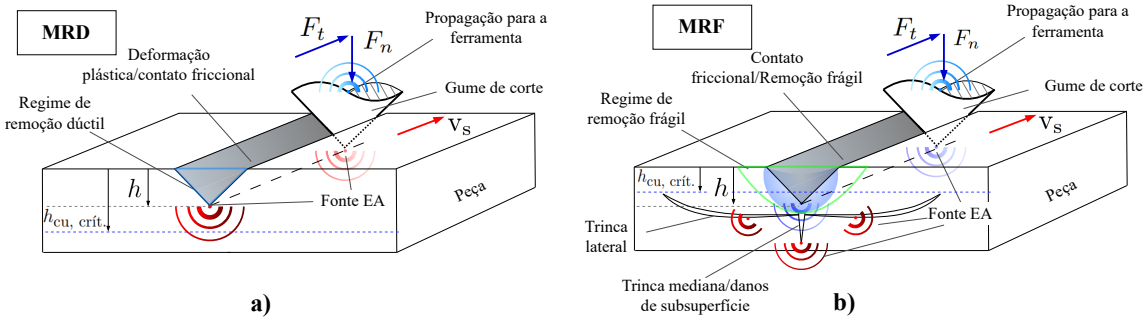


Figura 9 – Fontes de EA com relação ao mecanismo de remoção. a) MRD; b) MRF.

Fonte: Autor, 2024.

2.3.4 Faixa de frequência de emissão acústica no corte por fio diamantado

Em razão da inexistência de biblografia acerca de aplicação de EA no processo DWS, não há faixa de frequência especificamente definida para os fenômenos de interesse de remoção de material e fratura. Não apenas isso, mas na própria aplicação em retificação, profundamente investigada, os limites inferior e superior da faixa de frequência, são, da mesma forma, subjetivos, em que há uma variação dependente da sua aplicação. De forma geral, considera-se que as frequências características dos fenômenos acústicos estão

situadas em uma faixa de frequência entre 10 kHz até 1 MHz (DORNFELD, David; LEE, D.-E., 2008). Para conveniência, entretanto, toma-se uma faixa mais ampla de frequência por não se conhecer ou sequer ter alguma documentação das fontes EA no processo DWS.

Na operação de corte, observam-se interferências e perturbações nos sinais provocados por aspectos construtivos da máquina além do fenômenos de remoção de material. O efeito é acentuado principalmente nas baixas frequências, em que os ruído proeminentes de componentes mecânicos (transmissão, engrenamento, motor, rolamento) ocupam a faixa de 10 Hz a 1 kHz, conforme mostra o gráfico da Fig. 10 (KÖNIG; ALTINTAS; MEMIS, 1995; RAVINDRA; SRINIVASA; KRISHNAMURTHY, 1997; HASSUI *et al.*, 1998).

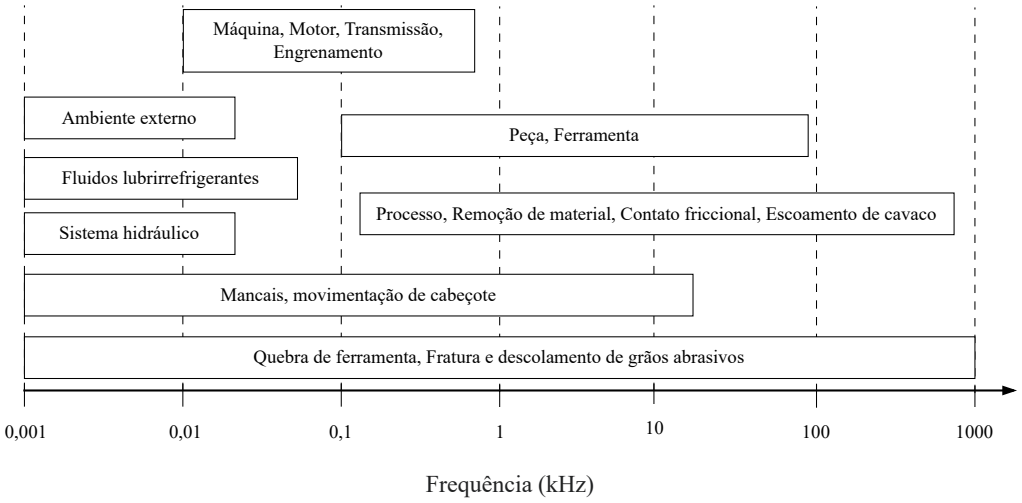


Figura 10 – Faixa de frequências de fenômenos envolvidos em processos de fabricação.

Fonte: Adaptado de Boaron (2015) e Klocke e Kuchle (2009).

2.4 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE SINAIS

A extração de informações e a caracterização não apenas qualitativa, mas quantitativa de fenônemos físicos é um elemento chave para avaliação de processos, além de tornar possível a compreensão e previsão do comportamento de um sistema em análise. A forma de se caracterizar um sistema ou fenômeno físico, ou ainda, parâmetros do sistema de análise, se dá em forma de uma série temporal, ou um sinal. A natureza dinâmica de um sistema, conforme a teoria de sistemas, pode ser interpretada como uma composição de um sinal de entrada $x(t)$ e uma resposta associada $y(t)$, independente de sua complexidade, conforme ilustrado na Fig. 11. O desafio, entretanto, de se caracterizar um sistema na prática provém da dificuldade de se medir $x(t)$ ou $y(t)$ diretamente, ou seja, ruídos e perturbações são inerentes a sistemas reais, e, dessa forma, contaminam o sinal medido. Ou até mesmo, $x(t)$ e $y(t)$ podem ser sinais não determinísticos e de descrições analíticas de elevada complexidade (SHIN, K.; HAMMOND, 2008).

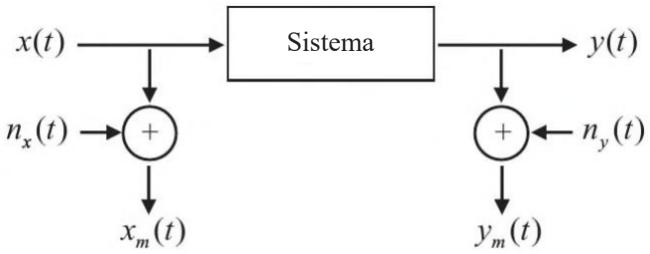


Figura 11 – Modelo de sistema dinâmico com ruídos/perturbações no sinal mensurado.

Fonte: Adaptado de Kihong Shin e Hammond (2008).

Na Fig. 11 $n_x(t)$ e $n_y(t)$, representam as perturbações de um sistema real, em que desejando-se extrair informações de $x(t)$ e $y(t)$, o sinal realmente mensurado é $x_m(t)$ e $y_m(t)$. Dessa forma, as técnicas de processamento de sinais podem ser entendidas como ferramentas para extração de informações de interesse de um sinal, ou separação das componentes indesejadas para o processo. Essas técnicas envolvem uma variedade de operações matemáticas (SMITH, 2003; SHIN, K.; HAMMOND, 2008).

A caracterização de processos físicos por meio de sinais se baseia em uma etapa crítica que consiste na seleção adequada de transdutores empregados na instrumentação do processo ou de uma operação. Os transdutores utilizados devem ser capazes de correlacionar as variações de grandezas físicas de interesse com as características do processo para a conversão apropriada de um sinal. Dessa forma, a extração do máximo de informações relevantes sobre o sinal detectado por um transdutor usualmente requer um procedimento padrão para o processamento de sinal, conforme mostram as etapas que contemplam a sequência lógica da Fig. 12 (BOARON, 2015).

Seguindo a lógica, um sinal detectado por um transdutor e/ou sensor que compreende a grandeza física mensurada é do tipo analógico ou contínuo que varia no tempo.

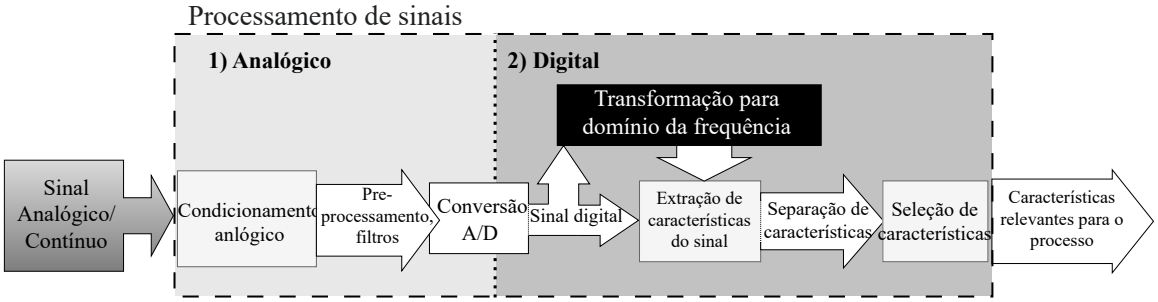


Figura 12 – Esquema lógico de processamento de sinal.

Fonte: Adaptado de Caraguay (2018).

Assim, a primeira etapa envolve o pré-processamento e condicionamento do sinal capturado, em que empregam-se filtros analógicos passa-banda, retificadores e amplificadores, os quais objetivam isolar o sinal de interesse, bem como reduzir perturbações elétricas ou mecânicas geralmente contidas no sinal. Esta etapa serve de preparação para a digitalização do sinal. Na sequência, o sinal é digitalizado por meio de instrumentos de conversão analógico-digital (conversor A/D), usualmente inseridos no próprio sistema de aquisição de dados (DAQ) (TETI *et al.*, 2010).

A digitalização de um sinal contínuo parte do princípio de amostrar o sinal em intervalos discretos de tempo a partir de uma frequência de amostragem f_s estabelecida. De modo a não descaracterizar o sinal real, a frequência de amostragem deve ser criteriosamente definida, seguindo o teorema de Nyquist para evitar efeitos de *aliasing* (SMITH, 2003; CARAGUAY, 2018).

Um sinal digitalizado permite a utilização de técnicas e ferramentas disponíveis para processamento de sinais digitais, em que pode-se extrair informações determinantes da natureza do sinal. Dividem-se as ferramentas de processamento de sinal quanto a: 1) domínio do tempo e; 2) domínio da frequência. A análise no domínio do tempo usualmente tem a finalidade para identificação visual de fenômenos específicos no contexto monitoramento *online*, como em detecção de contato de rebolos em peças, apesar de não ser possível extrair muitas informações relativas à natureza do sinal. Também, utilizam-se técnicas de extrapolação de limites estáticos/dinâmicos para detecção de fratura de ferramenta, ou para extração valores RMS para caracterização de magnitude do sinal (KÖNIG; ALTINTAS; MEMIS, 1995; WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996; LIAO, 2010). Para as análises no domínio da frequência costuma-se empregar a transformada rápida de Fourier (FFT), densidade de potência espectral (PSD) e transformada de Hilbert para identificação de componentes de frequência relevantes de um sinal ou para demodulação do sinal no monitoramento de máquinas (RANDALL, 2021). A vantagem da aplicação de transformações no domínio do tempo para frequência e vice-versa em sinais digitais reside em não haver qualquer perda de informações contidas do sinal (TETI *et al.*, 2010; BOARON, 2015).

Alternativamente, existem métodos de processamento de sinal que integram tanto o domínio do tempo quanto da frequência em uma ferramenta. Nesse caso, destacam-se a transformada de Fourier de tempo curto (STFT), a decomposição *wavelet* por transformada *wavelet* discreta (DWT) e a transformada de Huang-Hilbert, ou modo de decomposição empírica (EMD). Recentemente, muito tem-se empregado tais métodos de análise simultânea nos dois domínios em aplicações de SMCF, detecção de eventos específicos e determinação de tendências e modos intrínsecos do sinal, além de superarem diversas limitações impostas pelos métodos convencionais, por exemplo a limitação de resolução nas faixas de alta frequência (HUANG *et al.*, 1998; LIAO *et al.*, 2007; BI *et al.*, 2021).

O conjunto de técnicas de processamento de sinais digitais disponíveis hoje não se limitam somente aos mencionados. Entretanto, apesar de haver uma extensa variedade de ferramentas de processamento de sinal, a escolha e aplicação de uma ferramenta ou método devem ser realizadas de maneira criteriosa, uma vez que nem todas são capazes de extrair informações do sinal que possam ser correlacionadas com a variação do processo ou com algum fenômenos físico presente. A determinação deve refletir a caracterização adequada do processo, relativo aos parâmetros e fenômenos que desejam-se investigar. Dessa forma, a partir da aplicação de um conjunto de ferramentas adequado, a análise e o processamento do sinal levam à caracterização mais precisa de um sistema ou processo (TETI *et al.*, 2010).

No contexto da área de manufatura, em particular, no monitoramento de diferentes processos de fabricação, uma variedade de técnicas de processamento de sinais foi aplicada para diferentes tipos de sinais de grandezas físicas mensuradas. Cada ferramenta é empregada de modo a caracterizar diferentes particularidades de fenômenos físico inerentes ao processo. A Tab. 3 reúne, de forma sintética, trabalhos de pesquisas sob diferentes escopos em que foram empregados ferramentas de processamento de sinal para caracterizar diferentes especificidades de processo. É importante mencionar que não se observa qualquer trabalho referente ao processo DWS.

Tabela 3 – Síntese de aplicações de ferramentas de processamento de sinal em trabalhos acadêmicos de monitoramento.

Referência	**Processo**	**Sinal**	**Análise de sinal**	**Aplicação/Detecção de fenômenos**
(LIANG, S.; DORNFELD, DA, 1989)	Retificação	EA	Valor RMS, EA_{RMS}, domínio do tempo	SMCF, acompanhamento de desgaste de ferramenta.
(HASSUI *et al.*, 1998)	Retificação	Vibração, EA	FFT, sinal bruto EA_{RAW}	Rugosidade, SMCF, Modo de remoção de material (fase elástica).
(RAVINDRA; SRINIVASA; KRISHNAMURTHY, 1997)	Torneamento	EA	Valor RMS, PSD, Modelo auto-regressivo	SMCF, quebra de ferramenta, desgaste de flanco.
(BIFANO, T.; YI, 1992)	Retificação	EA	PSD	Taxa de remoção de material, transição MRD para MRF, indicadores de remoção de material.
(BOARON, 2009)	Retificação	EA	Valor RMS, domínio do tempo	Detecção de contato e determinação de posição centralizada entre rebolo e peça.
(SUSIČ; GRABEC, 2000)	Retificação	EA	PSD, regressão não paramétrica, funções de auto-correlação (ACF)	Caracterização de rebolos, SMCF.
(MOKBEL; MAKSOUD, 2000)	Retificação	EA	FFT, PSD	Condições cinemáticas, rugosidade.
(LIAO, 2010)	Retificação	EA	Decomposição *wavelet* discreta, modelo auto-regressivo	SMCF, extração de características de condição de processo.
(PANDIYAN; TJAHJOWIDODO, 2019)	Retificação de cinta	EA	FFT, STFT	SMCF, comparação de condição de ferramenta.
(BOARON, 2015)	Retificação	EA, Força, Momento	PSD	Caracterização topográfica de rebolos, caracterização dinâmica, SMCF.
(KWAK, J.-S.; HA, 2004)	Retificação	Força, Potência	Decomposição *wavelet* discreta, valor de pico RMS	Detecção de tempo de retificação.
(KÖNIG; ALTINTAS; MEMIS, 1995)	Retificação	EA	RMS, PSD	Controle de retificação cilíndrica externa de mergulho, Remoção de material.
(MAHATA; SHAKYA; BABU, 2021)	Retificação	EA, Força	Transformada de Hilbert-Huang, Modo de decomposição empírica (EMD), decomposição *wavelet*	Detecção de contato, SMCF, acompanhamento de desgaste.

Fonte: Autor, 2024.

2.4.1 Transdutores piezoelétricos de EA

O fenômeno de EA se caracteriza pela propagação de ondas volumétricas em um meio devido à liberação de grande quantidade de energia provocada pela alteração da estrutura cristalina do material. Mais especificamente, em processos de fabricação com ferramentas de geometria não definida, os eventos acústicos são transitórios e determinados pelas diversas interações de contato entre grão abrasivo e peça durante a usinagem. A determinação da intensidade de um evento não pode ser mensurada diretamente. Por isso, o papel de um transdutor de EA é tornar qualificável os níveis de intensidade de propagação de ondas associados aos esforços, à remoção de material e à condição geral do processo e da máquina, que serve, nesse caso, como meio para propagação (TÖNSHOFF; FRIEMUTH; BECKER, 2002).

O aspecto característico uma onda acústica está associado ao transporte de energia em um meio. Em cristais piezoelétricos, a energia mecânica transportada por ondas elásticas de tensão é convertida em carga elétrica proporcional à dinâmica inercial periódica do elemento, em função das propriedades piezoelétricas (KÖNIG; ALTINTAS; MEMIS, 1995).

Encontra-se o efeito da piezoeletricidade em materiais cristalinos. A deformação e perturbação da estrutura cristalina do material resultam numa alteração da polarização em cargas elétricas. Assim, as cargas positivas e negativas são deslocadas, provocando um ambiente polarizado não equilibrado, criando uma diferença de potencial e um pulso. Como consequência, uma excitação contínua dos cristais piezoelétricos gera um sinal contínuo de tensão (REGTIEN; DERTIEN, 2018).

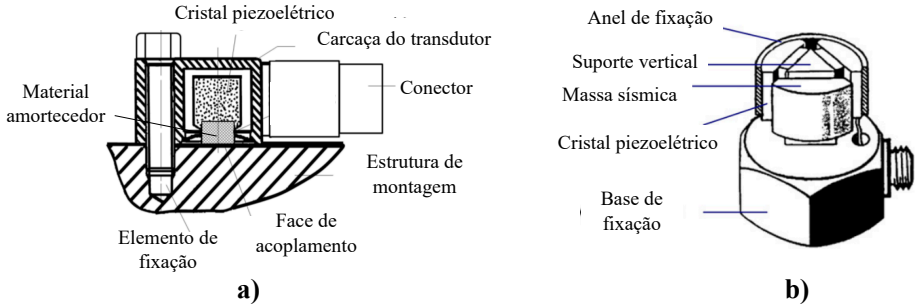


Figura 13 – Esquema de transdutores piezoelétricos. a) Sensor EA; b) Acelerômetro.

Fonte: Adaptado de Boaron (2015) e Regtien e Dertien (2018).

Os transdutores de EA distinguem-se dos demais transdutores de aceleração (acelerômetros) na característica de elevada sensibilidade, além de dispensar o uso de uma massa sísmica no sensor, mas apenas um elemento de amortecimento aplicado diretamente ao sensor conforme mostra a Fig. 13. Além da característica de alta sensibilidade, a baixa impedância sísmica devido à ausência de uma massa no sensor permite a caracterização de bandas elevadas de frequências, mas com uma magnitude de detecção reduzida. Por outro lado, os acelerômetros são destinados a uma faixa média-baixa com uma amplitude

maior de sinal aquisitado, em comparação com sensores EA (HELLIER, 2013; REGTIEN; DERTIEN, 2018).

Desta forma, muito se emprega a técnica de EA no monitoramento de processos de fabricação usando a vantagem da faixa característica em frequências mais elevadas. Considerando que ruídos de motor, rolamentos e fluidos de corte, inerentes ao processo, se situam em uma banda de frequência baixa, os sinais de EA não se sobrepõem inteiramente aos sinais de ruído indesejados, livrando o sinal, em grande parte, de eventos irrelevantes.

2.4.2 Condicionamento e digitalização de sinais

A aquisição de sinais provenientes de transdutores ou sensores é de forma analógica ou contínua. O sinal analógico representa usualmente o sinal bruto do processo, em que estão presentes ruídos de diversas fontes indesejadas e que comprometem a interpretação e as técnicas de processamento de sinal em etapas posteriores. Por isso, o sinal analógico, antes de ser digitalizado para o processamento, deve passar por uma etapa de pré-processamento, realizado por um sistema de condicionador de sinais, geralmente integrado na instrumentação do sistema DAQ para preparar o sinal para a conversão digital (CARAGUAY, 2018).

Em particular, os sinais de transdutores piezoelétricos de EA, em virtude da sua alta impedância elétrica, capturam sinal com uma magnitude inicialmente reduzida, devendo ser, portanto, conectado a um amplificador *buffer* ou de entrada. Isto reforça a importância do posicionamento adequado do sensor, devendo ser o mais próximo da fonte de propagação. Em seguida, o sinal analógico deve ser filtrado através de filtros passa-alta e passa-baixa para adequar a faixa de resposta em frequência de interesse e suprimir ruídos de alta frequência ou distribuídos por todo a faixa de frequência (NOCETI FILHO, 1998). Imediatamente antes da digitalização, conforme o esquema de um sistema de condicionamento da Fig. 14, o sinal é amplificado novamente para garantir que o intervalo de tensão do sinal seja igual ao intervalo permitido na entrada de um conversor A/D (TETI *et al.*, 2010).

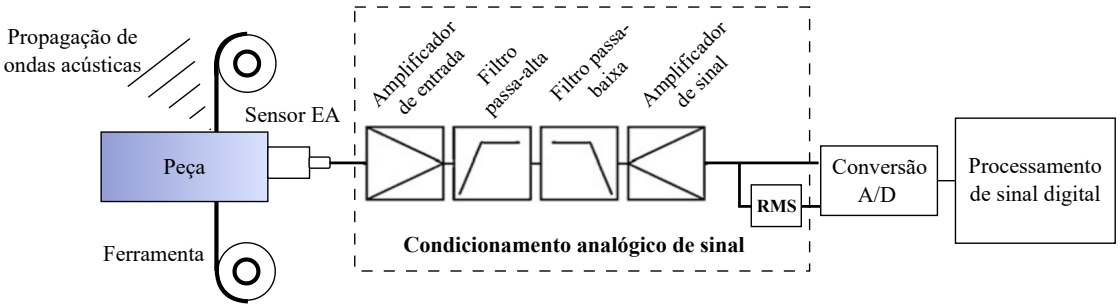


Figura 14 – Esquema de condicionamento básico de sinais analógicos

Fonte: Baseado em Teti *et al.* (2010).

Por causa da alta concentração de energia acústica na região de corte detectada

pelos sensores EA, a amplificação exagerada pode saturar o sinal. A aplicação de um filtro passa-alta em um sinal saturado pode resultar em uma distorção, que leva geralmente à interpretações e avaliações errôneas do sinal. Por isso, a seleção de parâmetros de ganho de elementos de condicionamento de sinal deve ser extremamente criteriosa, sendo feita, usualmente por testes experimentais e ajuste manual. Pode-se mitigar os efeitos de distorções de sinal reduzindo o ganho de amplificadores de entrada em comparação com o ganho de sinal, em que o sinal já é filtrado. Via de regra, deve-se manter o ganho de entrada sempre abaixo do ganho de sinal (SENSIS IND. COM. EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS LTDA., 2002; TETI *et al.*, 2010).

2.4.2.1 Conversão A/D (amostragem e aliasing)

A continuidade de um sinal analógico prevê valores de uma grandeza para todo e cada instante de tempo. A premissa para utilizar técnicas de processamento digital, as quais se mostram computacionalmente mais eficientes que o processamento analógico, parte da discretização do domínio do tempo. O processo de partição do tempo em intervalos discretos é o princípio da conversão analógico-digital em que o sinal contínuo pode ser representado digitalmente através de um conversor A/D, geralmente integrado ao sistema DAQ (SHIN, K.; HAMMOND, 2008).

Um dispositivo A/D recebe como entrada um sinal contínuo no domínio do tempo, fornecendo uma representação digital do sinal a partir da amostragem e quantização dos valores, em forma de *bits*, em intervalos discretos de tempo. O processo de amostragem é determinado pela frequência de amostragem (f_s), que indica a taxa de conversão de um sinal analógico em pontos discretos do sinal amostrado (SHIN, K.; HAMMOND, 2008).

Em termos práticos, frequências f_s elevadas representam com mais precisão o sinal, implicando, entretanto, em limitações de processamento computacional, devido à aquisição de um conjunto muito grande de dados. Para exemplificar, sinais transitórios no tempo (em longos intervalos) amostrados a uma taxa f_s muito elevada podem tornar a amostragem computacionalmente exigente, comprometendo a capacidade de armazenamento. Em contraponto, conforme ilustrado pela Fig. 15, frequências de amostragem f_s excessivamente baixas resultam numa representação insuficiente do sinal a tal ponto de descaracterizar as frequências características do sinal mensurado, resultando no efeito de *aliasing* (SMITH, 2003; BOARON, 2015).

Efeitos de *aliasing* ou de representação insuficiente provocam distorções espectrais em que frequências não características do sinal se manifestam no domínio da frequência, resultando na perda de informações da natureza do sinal. Como forma de mitigar ou evitar completamente os erros de *aliasing*, o teorema de Nyquist-Shannon, conforme Eq. (2) postula que a máxima frequência característica $f_{\text{máx.}}$de um sinal só pode ser ser adequadamente representada, i.e. sem efeitos de *aliasing*, a uma taxa de amostragem específica mínima ($f_{s,\text{mín.}}$) de valor 2x maior que a frequência máxima do sinal que

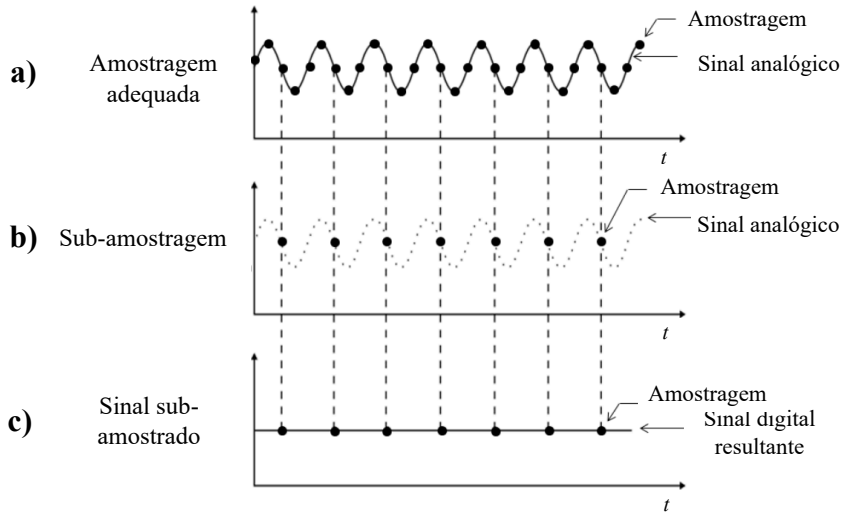


Figura 15 – Conversão A/D por amostragem. a) Amostragem e representação adequada; b) Amostragem insuficiente; c) Representação digital insuficiente.

Fonte: Adaptado de Kihong Shin e Hammond (2008).

deseja-se representar digitalmente. Este valor corresponde à frequência de Nyquist (f_N).

$$f_{s,\text{mín.}} = f_N = 2 \cdot f_{\text{máx.}} \tag{2}$$

2.4.2.2 Ferramentas para análise no domínio do tempo e da frequência

Parâmetros estatísticos descritivos, como média aritmética, desvio padrão, variância, tendência ou até curtose se apresentam como técnicas simples e diretas para monitoramento de condição de processos (SUBRAHMANYA; SHIN, Y. C., 2008). Na medida em que eleva-se a complexidade de um processo analisado, as interpretações de parâmetros tão simples podem tornar-se ambíguas, dificultando a extração de informações acerca do objeto de estudo. A partir do momento em que esses indicadores elementares tornam-se insuficientes, deve-se, portanto, recorrer à ferramentas mais sofisticadas (HUANG *et al.*, 1998; RINTA-RUNSALA, 2000).

No caso de monitoramento de processos de fabricação, associam-se parâmetros descritivos diretos à análise de sinais de transdutores no domínio do tempo. Uma análise no domínio do tempo usualmente limita-se a recursos de níveis de energia e valores RMS da grandeza medida, ou até como um indicador de eventos de grande intensidade. Muitas vezes, sinal no domínio do tempo pode ser utilizado como um indicador visual de características de deriva ou um evento específico, por exemplo, que compõem o sinal bruto, conforme ilustrado na Fig. 16. Apesar das limitações, o sinal no tempo pode ser significativamente eficaz, sendo amplamente utilizado, no caso do processo de retificação, em detecção e diferenciação entre as etapas de contato entre rebolo e peça e aplicação de limites (*thresholds*) estáticos ou dinâmicos para identificação de eventos (WEBSTER;

DONG; LINDSAY, 1996; DORNFELD, David; LEE, D.-E., 2008).

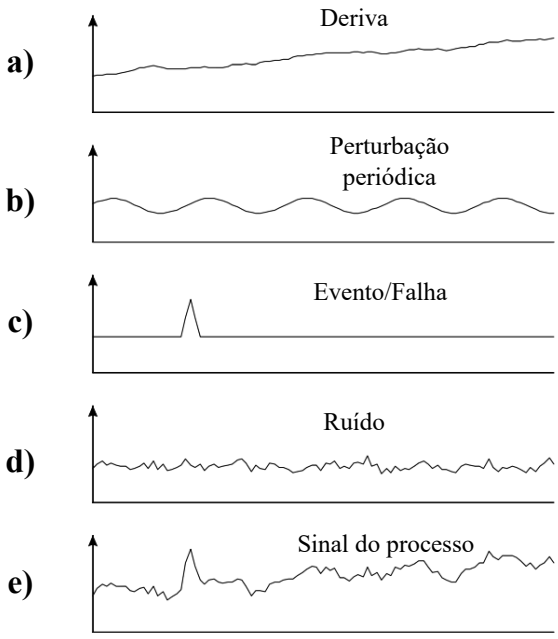


Figura 16 – Componentes de sinal de processo no domínio do tempo. a) Deriva; b) Periodicidade; c) Evento/Falha; d) Ruído; e)Composição completa do sinal do processo.

Fonte: Adaptado de Rinta-Runsala (2000).

Dentre as diferentes abordagens utilizadas para extrair informações indiretas e potencialmente relevantes de um sinal, a transformada de Fourier é amplamente reconhecida como uma ferramenta eficaz para extração de conteúdo de um sinal. A popularidade da transformada de Fourier se deve ao desenvolvimento do algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT), sendo nada mais que uma forma eficiente de implementar a transformada de Fourier discreta (DFT). Observa-se uma extensa variedade dessa ferramenta em aplicações na área de análise de dados. O espectro resultante da análise de Fourier fornece um panorama geral que permite avaliar globalmente a distribuição de magnitude de componentes periódicos no domínio da frequência. Tradicionalmente, o princípio da transformada é a decomposição de um sinal em suas componentes harmônicas de senos e cossenos, considerando toda a extensão do sinal (HUANG *et al.*, 1998; SHIN, K.; HAMMOND, 2008).

Da transformada de Fourier, deriva a ferramenta de densidade espectral de potência (PSD), em que realiza-se a FFT da função de autocorrelação ACF (ver Seção 3.5 para descrição matemática das ferramentas de processamento de sinal), resultando em um espectro de potência. A PSD é computada por meio da DFT, como sendo a média quadrática das amplitudes das faixas de frequência, normalizadas pelo número de amostras do sinal amostrado, fornecendo a distribuição de potência, na forma real, e não complexa,

das componentes de frequência. Em um sinal de tensão, a unidade da PSD é da forma [V^2/Hz] (SHIN, K.; HAMMOND, 2008).

Apesar da flexibilidade de aplicação da FFT em condições gerais, a ferramenta se restringe a algumas condições características referente à natureza do sinal. Para se obter um espectro que tenha algum significado físico, o sinal mensurado deve respeitar duas condições: 1) sistema linear; 2) processo estacionário (ver Seção 2.4.2.4). A restrição de estacionariedade, no segundo item, traz consigo algumas implicações: visto que o espectro obtido pela FFT não têm qualquer resolução temporal, o sinal é decomposto em toda a sua extensão do início ao fim. Isto é, se um sinal varia o conteúdo de frequência no tempo, o conteúdo global de frequência requer componentes harmônicos adicionais para simular o sinal não-estacionário, resultando em uma dispersão nas magnitudes de frequência não caracteríticas do sinal. Além disso, outro tipo de distorção espectral parte do seguinte princípio: sabendo que a decomposição do sinal se utiliza da superposição linear de funções trigonométricas, sinais que diferem das funções fundamentais seno e cosseno, em qualquer aspecto, requerem componentes harmônicas adicionais para serem representadas, distribuindo o conteúdo de frequência em frequências adjacentes, em um fenômeno que denomina-se *leakage*. Para exemplificar, a Fig. 17a) mostra a FFT de um seno puro de duração infinita. Na Fig. 17b), observa-se o efeito de *leakage*, em que o seno truncado precisa de mais componetes de frequências para ser adequadamente representado (HUANG *et al.*, 1998; GUIMARÃES *et al.*, 2004).

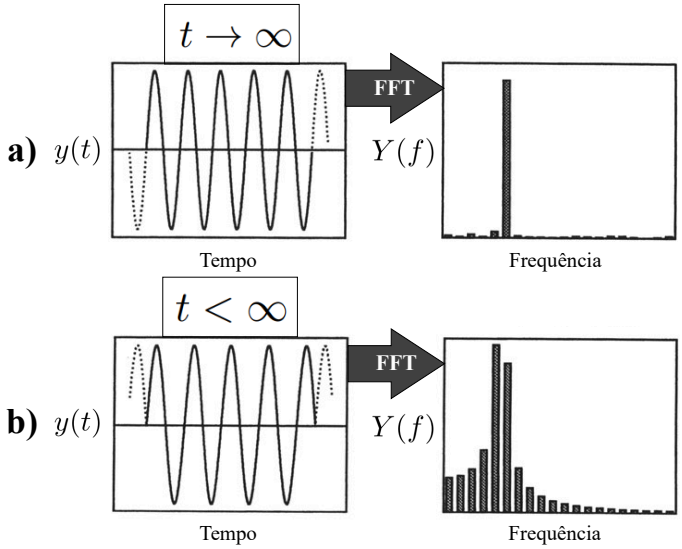


Figura 17 – Resposta em frequência. a) Seno puro; b) Efeito *leakage* na frequência de um seno truncado.

Fonte: Adaptado de Ewins (2009).

Como forma de reduzir os efeitos de *leakage* espectral, aplica-se a técnica de janelamento do sinal, que consiste na multiplicação do sinal por uma função janela $w(t)$ ao longo de um intervalo de tempo T. O que acontece, operacionalmente, é uma convolução no

domínio da frequência (RANDALL, 2021). Dentre as características dessa ferramenta, o janelamento permite suavizar descontinuidades do sinal, ou analisar intervalos bem definidos de uma função. Diversas funções janelas são definidas na literatura de processamento de sinais digitais, em que cada tipo atende diferentes critérios de supressão de efeitos de *leakage*, conforme exposto na Fig. 18.

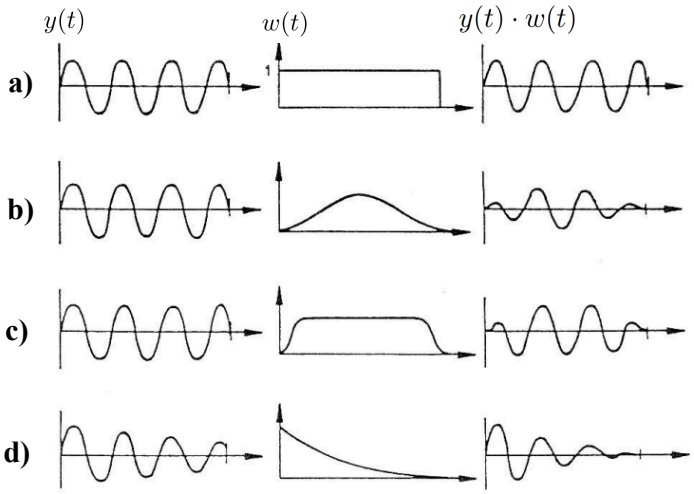


Figura 18 – Tipos de funções janela. a) Retangular; b) Hann; c) Tukey; d) Exponencial.

Fonte: Adaptado de Ewins (2009).

A janela Hann, em homenagem ao matemático Julis von Hann, conhecida também como *Hanning* (Fig. 18b)), configura-se como a mais adequada para aplicações de análise de sinais aleatórios e não determinísticos, em que não se conhece, a priori, o conteúdo de frequência (WICKRAMARACHI, 2003).

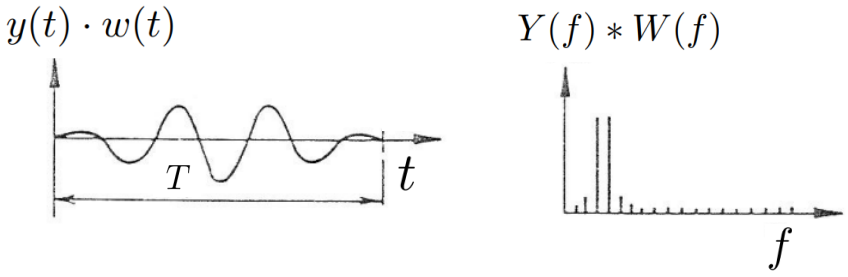


Figura 19 – Efeito da aplicação da janela Hann no domínio da frequência.

Fonte: Adaptado de Ewins (2009).

O conteúdo de frequência de um sinal não-estacionário só pode ser adequadamente avaliado no plano tempo-frequência, usualmente em uma forma de espectrograma. Se utilizando do mesmo conceito de janelamento, a transformada de Fourier de tempo curto (STFT) fornece essa representação por meio do janelamento sucessivo do sinal em intervalos discretos de tempo. Entretanto, como a STFT é derivada da própria FFT, os segmentos do sinal submetidos ao janelamento devem ser individualmente estacionários. Além disso,

uma limitação que surge devido ao método de janelamento na STFT é a definição do tamanho da janela. Para exemplificar, a utilização uma janela de tempo curto garante que o sinal seja localmente estacionário. Por outro lado, a melhor resolução de frequências requer sinais mais longos no tempo, o que pode, enfim comprometer a análise de sinais com conteúdos em frequências mais elevadas. Ou seja, o conflito entre resolução de tempo e de frequência acarreta um problema de *trade off*, devendo-se priorizar aquela que melhor se adequa ao objetivo da análise (HUANG *et al.*, 1998; YANG; YU, 2012).

Alternativamente, a abordagem da decomposição do sinal em coeficientes *wavelet*, viabilizada pela transformada de *wavelet* discreta (DWT), permite uma análise multi-resolução de processos não-estacionários. Essencialmente, a DWT é uma transformada de Fourier aplicada a um janelamento ajustável que permite um equilíbrio entre resolução do tempo e frequência (HUANG *et al.*, 1998), conforme explicitado na Fig. 20. Dessa forma, na análise multi-resolução, faixas de frequência elevadas são avaliadas com uma melhor resolução temporal que as frequências mais baixas. Esta proporção entre os dois domínios viabiliza o emprego da DWT em aplicações de frequências mais elevadas sem perder informações relevantes sobre o conteúdo do sinal. Isto torna a análise *wavelet* uma ferramenta robusta para casos com fenômenos de diferentes escalas (MAHATA; SHAKYA; BABU, 2021).

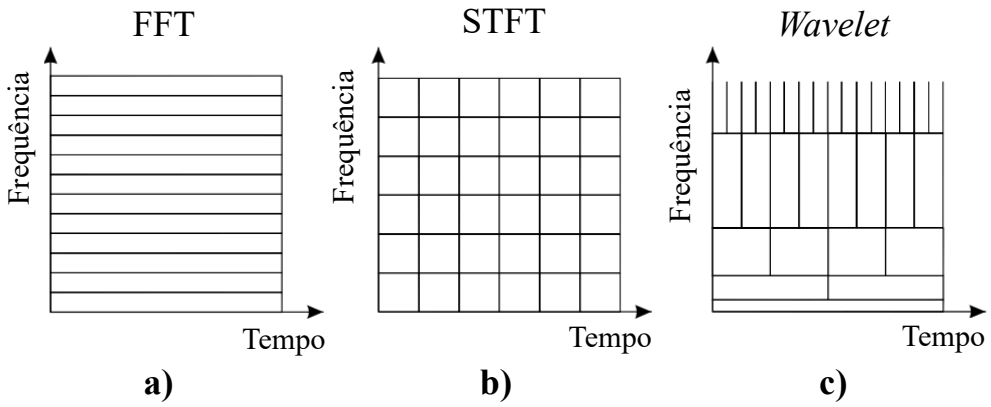


Figura 20 – Resolução no plano tempo-frequência.

Fonte: Adaptado de Rinta-Runsala (2000).

Recentemente, Huang *et al.* (1998) revolucionou o campo de processamento digital de sinais a partir da introdução da transformada de Hilbert-Huang, ou simplesmente, decomposição de modo empírico (EMD). A ferramenta EMD, similar à transformada de *wavelet* é fortemente indicada para análise de processos não-lineares e não-estacionários, em que o sinal é decomposto em funções de modo intrínsecos (IMF) sem a necessidade de uma função base.

2.4.2.3 Processos estocásticos

Conforme a classificação de sinais (Fig. 21), um processo estocástico ou aleatório representa a variação de uma variável aleatória não determinística no domínio do tempo. Historicamente, na área da manufatura, associam-se os processos estocásticos à medições de vibração, força e também EA de processos de usinagem com ferramenta de geometria não definida (KLOCKE; KUCHLE, 2009).

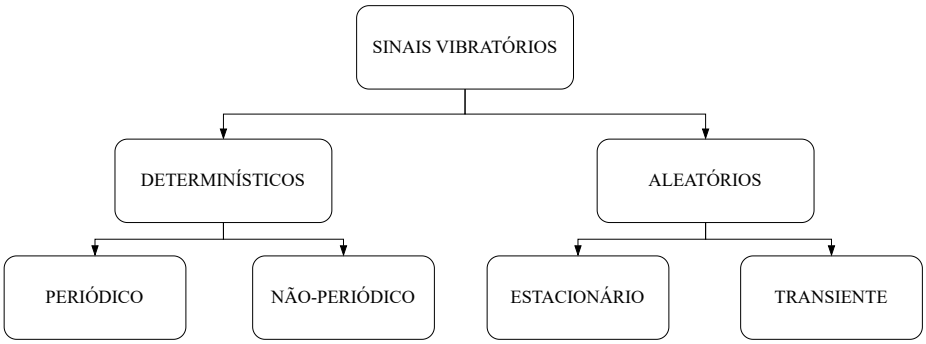


Figura 21 – Classificação de sinais.

Fonte: Adaptado de Kihong Shin e Hammond (2008).

A caracterização de um sinal aleatório usualmente requer um conjunto (*ensemble*) de medições do fenômeno analisado em vez de uma medição singular, criando uma base de dados adequada de um processo estocástico (SHIN, K.; HAMMOND, 2008; BOARON, 2015).

2.4.2.4 Processos estacionários e não-estacionários

No domínio do tempo, a variação de parâmetros estatísticos descritivos mencionados anteriormente indica um processo não estacionário. A condição de estacionariedade é uma idealização restrita e muito difícil de ser obtida na prática. Entretanto, a hipótese de sinal estacionário pode ser particularmente útil para aplicações de sinais aleatórios. Quando se dispõe de apenas um conjunto de dados referente a um único sinal no domínio do tempo, a ideia de *ensemble* não pode ser aplicada, o que ocorre frequentemente em processos. Considerando esse caso, assumir um sinal estacionário, quando adequado, torna-se uma ferramenta útil para permitir uma média no tempo, para a determinação de parâmetros de interesse. A aplicação dessa condição, entretanto, deve levar em conta critérios que garantem que a hipótese estabelecida é suficientemente satisfatória (BOARON, 2015).

Sinais estacionários e não estacionários típicos conforme a variação de determinados parâmetros estatíticos são ilustrados na Fig. 22

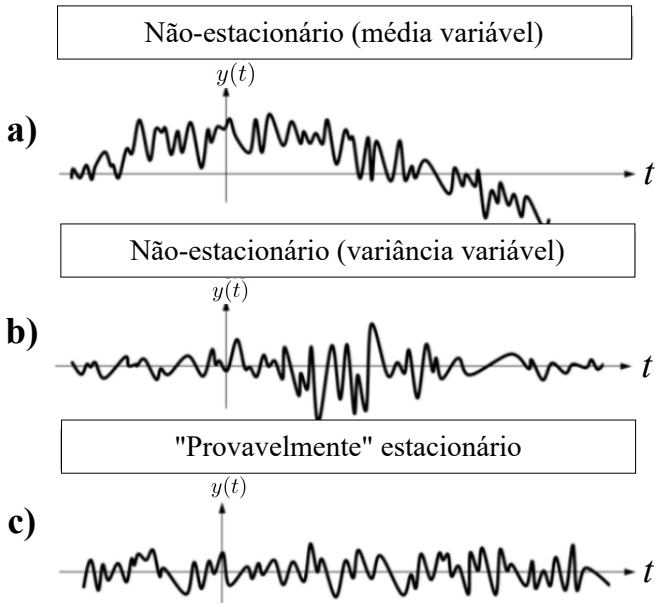


Figura 22 – Exemplos de sinais estacionários e não estacionários.

Fonte: Adaptado de Kihong Shin e Hammond (2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo descreve a metodologia e o aparato experimental utilizado para o desenvolvimento do trabalho, disponibilizado pelo Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) da UFSC. Nas Seções 3.1, 3.2 e 3.3 caracterizam-se a máquina-ferramenta, ferramenta e amostras utilizadas para a aquisição de sinais nos testes experimentais. Em seguida, na Seção 3.4, descreve-se o sistema de monitoramento por EA utilizado, incluindo a descrição dos sensores, montagem/conexão de equipamentos e a metodologia para a aquisição de sinais e organização de uma base de dados adequada. Na Seção 3.5, são apresentadas as descrições e detalhamento das ferramentas de processamento de sinal empregadas. Por fim, na Seção 3.6, listam-se os parâmetros utilizados para os ensaios, considerando as diferentes abordagens propostas: 1) caracterização cinemática do processo; 2) detecção de contato e transição; 3) acompanhamento da progressão de desgaste da ferramenta.

3.1 MÁQUINA-FERRAMENTA

A máquina-ferramenta utilizada para o corte por fio diamantado contínuo desenvolvida por Ricardo Knoblauch *et al.* (2017b) em um trabalho de doutorado no LMP constitui como o sistema utilizado para a realização dos testes experimentais e montagem do sistema de monitoramento por emissão acústica. Um segmento de fio diamantado contínuo, cujas extremidades foram unidas por meio de uma solda de topo (KNOBLAUCH, Ricardo *et al.*, 2017a), é montado em um par de polias de Teflon® acionadas por eixos rotativos regulados para garantir a velocidade de corte (v_s) constante. A plataforma da polia deslizante para o posicionamento e tensionamento do fio dispõe de guias e mancais aeroestáticos que asseguram um atrito baixo, permitindo a aplicação de tensão no fio de forma correspondente e precisa. O corte é realizado pelo fio, cuja movimentação em *loop* (eixo x), nas polias montadas sobre os eixos rotativos, garante o movimento contínuo. Somado a um movimento de avanço (eixo y), o fio entra em contato com a peça fixada em uma morsa, realizando o corte. O componente de motor elétrico AC, controlado por um inversor de frequência, é responsável por acionar a polia principal a, conforme Fig. 23, atingindo uma velocidade máxima de $v_s = 26$ m/s. O movimento de avanço ocorre apenas no eixo y, em que um motor de passo controla a velocidade de avanço (v_f), com um mínimo de $v_f = 0{,}08$ mm/min. O ajuste no eixo z para a determinação da espessura da amostra usinada é feito manualmente, alterando a posição de fixação da peça na morsa. O tensionamento do fio é determinado pela pressão de ar em um cilindro pneumático e controlado por uma mola na plataforma deslizante (COSTA, E. C. *et al.*, 2020).

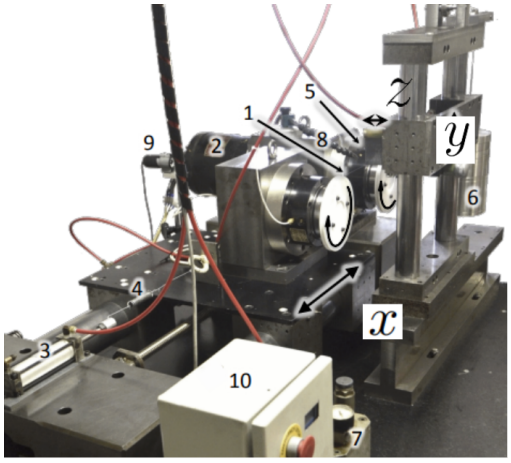


Figura 23 – Máquina-ferramenta com componentes enumerados.

Fonte: Adaptado de Ricardo Knoblauch *et al.* (2017b) e Erick Cardoso Costa *et al.* (2020).

Conforme o esquema simplificado de funcionamento da máquina na Fig. 24, o fio diamantado, ao contrário de outros processos abrasivos, é considerada uma ferramenta flexível. Dessa forma, a ferramenta de corte, em um primeiro momento, é submetida a maiores níveis de vibração. Na medida em que o fio penetra na peça, removendo material, surge uma força em oposição ao movimento de avanço, provocando uma deflexão $\delta(x)$ do fio (TEOMETE, 2011). O comprimento livre do fio forma um arco cujo ângulo ϕ e deflexão máxima δ são função da tensão T_w no fio (WEI; KAO, 2000; COSTA, E. C. *et al.*, 2020).

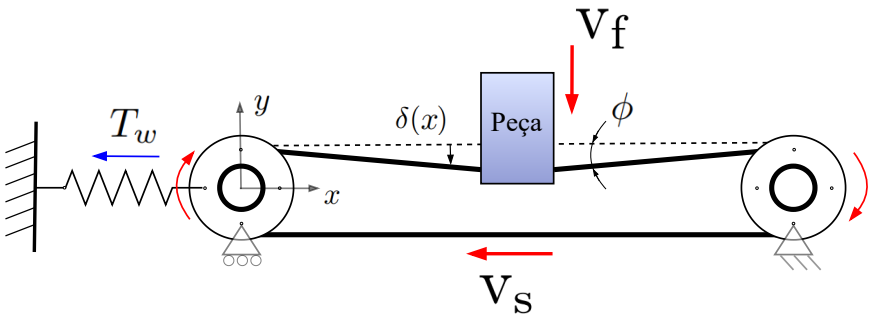


Figura 24 – Cinemática do processo de corte.

Fonte: Autor, 2024.

3.2 FERRAMENTA DE CORTE

A ferramenta de corte empregada para os cortes consiste em um fio diamantado comercial fornecido pela empresa *Ensoll*. O diâmetro nominal da ferramenta é de 450 μm com densidade de 60% de abrasivos. O diâmetro interno do fio é especificado em 300 μm.

3.3 AMOSTRAS PARA CORTES E ENSAIOS

A amostra utilizada para os cortes e realização dos ensaios foi o carbeto de silício, conforme ilustrado na Fig. 25. A utilização de um material frágil permite a observação de fenômenos de remoção dúctil-frágil, apropriada para o corte por fio diamantado contínuo. Além disso, a característica de elevada dureza do carbeto de silício acelera o processo de progressão de desgaste, sendo, portanto, relevante para essa abordagem.

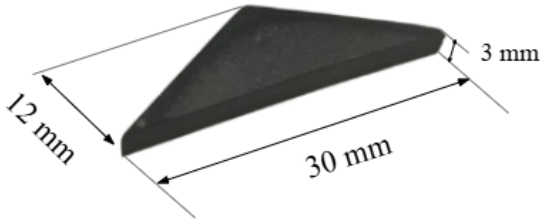


Figura 25 – Amostra de carbeto de silício utilizada para os cortes.

Fonte: Autor, 2024.

3.4 SISTEMA DE MONITORAMENTO POR EA

Medições de sinais EA foram conduzidas por meio da implementação de um sistema de monitoramento por EA (SM/EA). O SM/EA proposto consiste em um sistema *Single-input-Single-output* (SISO), em que para cada ensaio, um único sensor é fixado em uma determinada posição referente à máquina-peça, adquirindo um sinal convertido em tensão elétrica, de unidade em volts (V).

Para a realização dos testes experimentais, foi utilizado um condicionador de sinais para monitoramento de processos Sensis Ltda, modelo MSM. O aparelho permite a amplificação e filtragem de sinais analógicos capturados pelos transdutores EA, permitindo a utilização simultânea de até 13 entradas para transdutores e 2 níveis de comparação (SENSIS IND. COM. EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS LTDA., 2002). Na execução dos testes, entretanto, utilizou-se apenas a conexão de um sensor e uma saída para a aquisição de dados.

Seguindo o esquema da Fig. 26, os fenômenos acústicos detectados pelos transdutores são primeiramente convertidos em um sinal elétrico proporcional, em virtude do efeito piezoelétrico. Assim, o sinal de tensão é transmitido por meio de uma conexão BNC para o condicionador de sinais em uma das entradas analógicas do painel posterior (Fig. 26b). Além das entradas analógicas, o condicionador de sinais MSM dispõe das conexões de saída (EA_{RAW} e EA_{RMS}), de alimentação, conexão DB15 para comunicação com comando numérico e entradas para placas de aquisição DAQ.

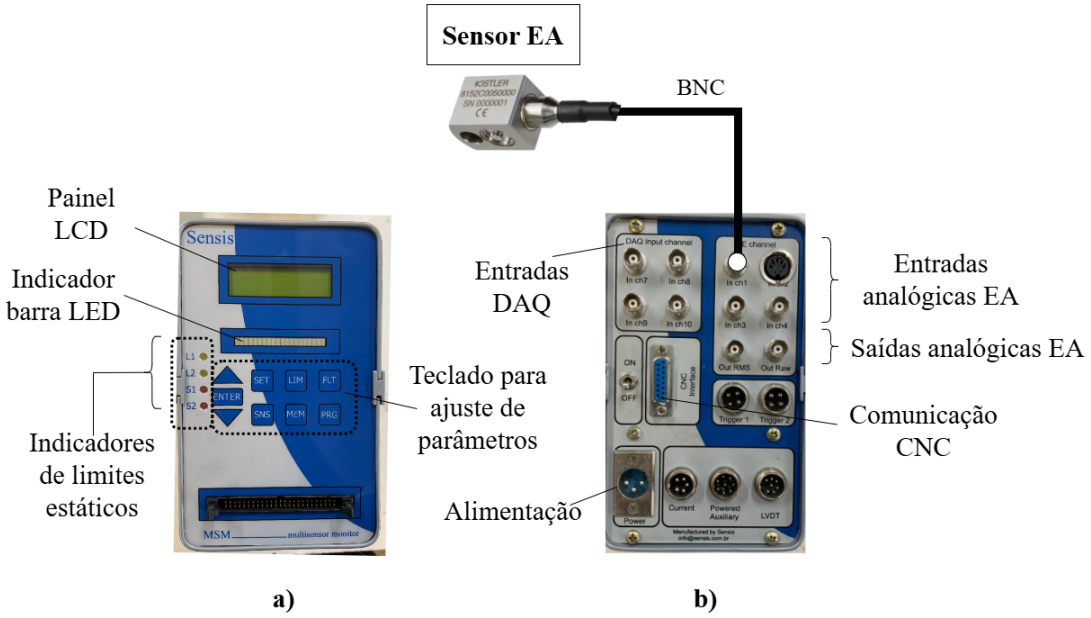


Figura 26 – Condicionador de sinais MSM. a) Painel frontal; b) Painel posterior.

Fonte: Adaptado de SENSIS IND. COM. EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS LTDA. (2002).

No painel frontal, a disposição de um teclado permite o ajuste dos parâmetros de ganhos de entrada e de sinal, seleção de filtros analógicos, redução de ruído e constante de tempo de integração ΔT. Toda a configuração de parâmetros e memória do dispositivo é realizada por meio do manuseio do teclado e visualização direta no *display* LCD. O painel frontal também contém indicadores LEDs (L1, L2, S1, S2 e barra LED) em que visualiza-se a intensidade do sinal capturado, auxiliando a determinação de parâmetros de ganho.

3.4.1 Transdutores de EA

Para aquisição dos sinais de EA, foram utilizados dois sensores de emissão acústica Kistler modelo 8152B de especificações semelhantes variando quanto ao tipo de fixação: fixação de base parafusada e base magnética. As dimensões reduzidas dos sensores de EA facilitam o posicionamento e fixação em componentes da máquina-ferramenta ou peça. Isso permite a montagem dos sensores mais próxima às fontes de EA, contribuindo para a obtenção de um sinal com menor influência de ruídos e perturbações.

Recomenda-se, para a aquisição de dados correspondentes ao processo, a fixação dos sensores sobre uma superfície plana livre de descontinuidades ou irregularidades (KISTLER INSTRUMENT CORPORATION, 2007).

O sensor de fixação por base parafusada exige a utilização de um parafuso M6, enquanto o sensor de base magnética é fixado de maneira facilmente removível. Segundo os fabricantes, é sugerido, para garantir a aderência do sensor de base parafusada em relação às superfícies, o uso de uma graxa (graxa de silicone, por exemplo) entre as duas interfaces. A Tab. 4 reúne as especificações técnicas dos dois sensores utilizados para os

ensaios no trabalho. Para fins de praticidade, o sensor de base magnética é referido por S1 e o de base parafusada por S2.

Tabela 4 – Especificações de sensores EA.

S1 (*Type* 8152B-111)			**S2 (*Type* 8152B-121)**		
Fixação	Faixa de frequência [kHz]	Sensibilidade [dB_{ref} 1V/(m/s)]	Fixação	Faixa de frequência [kHz]	Sensibilidade [dB_{ref} 1V/(m/s)]
Magnética	10-900	57	Parafusada (M6)	10-900	57

Fonte: Adaptado de KISTLER INSTRUMENT CORPORATION (2007).

a) **b)**

Figura 27 – Transdutores de EA utilizados. a) S1; b) S2.

Fonte: Autor, 2024.

3.4.1.1 Posicionamento de sensores EA

Considerando que as fontes de EA estão diretamente associadas à interação ferramenta-peça, procurou-se posicionar os sensores nas regiões mais próximas desses elementos. Dessa forma, o posicionamento nas proximdades das fontes de interesse garante a aquisição de um sinal EA com menores interferências geradas pela máquina e de demais ruídos.

Por causa da configuração do processo de corte por fio diamantado DWS, em que a ferramenta é flexível e as peças apresentam dimensões significativamente pequenas, não é viável acoplar os sensores diretamente a esses componentes, assim como em processos de retificação, por exemplo. Por isso, a montagem dos sensores foi feita diretamente na máquina-ferramenta. Para se obter um sinal mais puro e representativo de EA, os sensores foram posicionados nos elementos sujeitos a maior intensidade de propagação das ondas do processo de corte, como no elemento em que a peça é fixada (morsa) e nas proximidades da polia em que o fio é enrolado, vide Fig. 28.

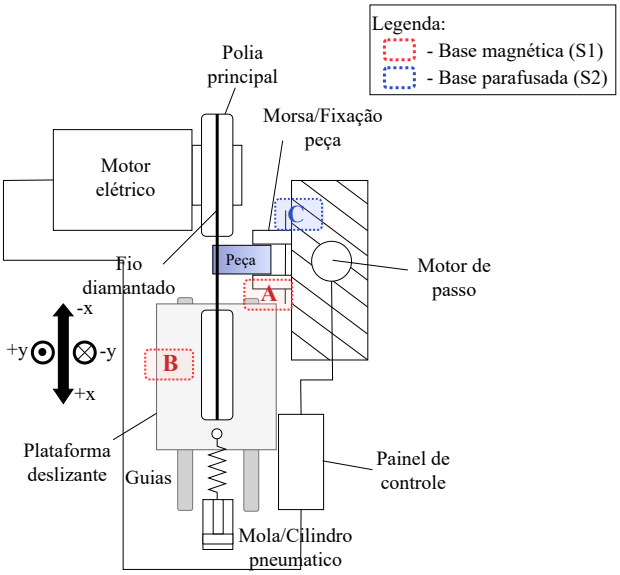
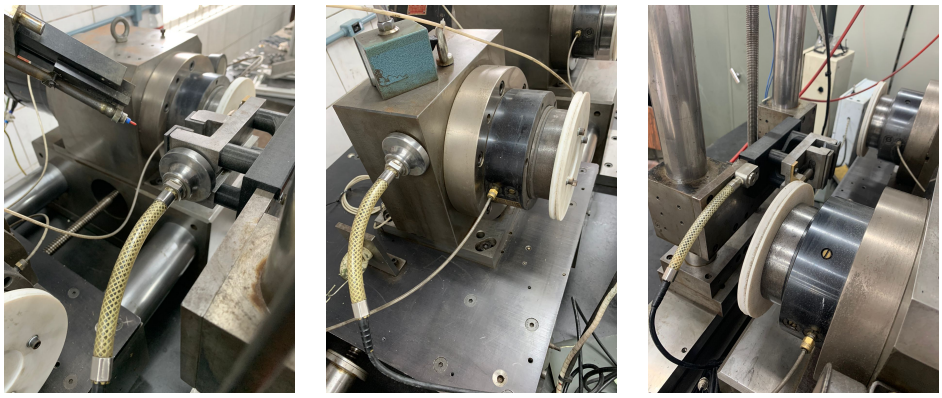


Figura 28 – Esquema de posicionamento de sensores EA na máquina-ferramenta.

Fonte: Autor, 2024.

Foram elegidas três posições (A, B e C) relativas à fixação dos dois sensores S1 e S2 na máquina-ferramenta, conforme o esquema da Fig. 28. O sensor S1, pela facilidade e versatilidade de posicionamento, é fixado à morsa em que se fixa a peça (posição A), procurando detectar as variações de processo e fenômenos acústicos diretamente relacionados às interações da ferramenta com a peça. Também procurou-se posicionar S1 próximo à polia secundária da plataforma deslizante, com a ideia de capturar sinais provenientes propagados pela própria ferramenta. O sensor S2 é montado em um dos furos da estrutura que contém o motor de passo, responsável pelo avanço da peça, próximo a morsa. Fixou-se o sensor por meio de um conjunto parafuso M6, porca e arruela. A Fig. 29 mostra os sensores S1 e S2 nas respectivas posições determinadas.



(a) **(b)** **(c)**

Figura 29 – Posicionamento dos sensores de EA na máquina-ferramenta (a) S1/A; (b) S1/B; (c) S2/C.

Fonte: Autor, 2024.

3.4.2 Sistema de aquisição e *setup* SM/EA com sistema DAQ

A conversão A/D para a representação digital dos sinais EA, capturados pelos sensores, é realizada por meio da placa de aquisição National Instruments *type* NI USB-6218 (Fig. 30), implementada como parte do sistema DAQ. A placa possui, ao todo, 32 canais de entrada analógica 16-bit, com uma taxa de aquisição máxima de $f_s = 250$ kHz para canais de modo único (*single channel modes*) (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

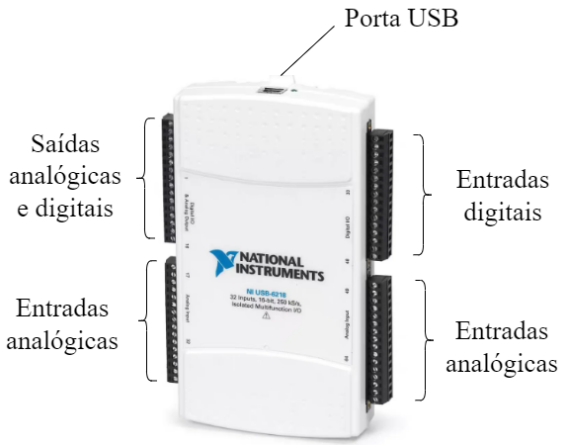


Figura 30 – Placa de aquisição de dados.

Fonte: Adaptado de National Instruments (2012).

A transmissão dos sinais EA para o sistema DAQ é realizada por meio de um cabo coaxial com a conexão simultânea de um canal de entrada analógica (*Analog Input* ou AI) e um canal para aterramento para evitar ruídos elétricos e perturbações nos sinais aquisitados. A conexão do sistema DAQ com um computador para gravação e armazenamento de dados é feita via cabo USB. Os dispositivos da National Instruments devem ser compatíveis com os *drivers* do computador, sendo necessário a instalação dos *softwares* e *drivers* requisitados (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

Conforme detalhado no esquema de *setup* e instrumentação, na Fig. 31, o sensor EA é conectado via cabo BNC no condicionador de sinais na entrada analógica "In ch1". A digitalização dos sinais de EA ocorre na placa de aquisição por uma conexão de cabo coaxial na saída "Out RAW" ou "Out RMS" do condicionador de sinais. Como mostrado no mapeamento das portas da placa NI, os canais 28 e 29 são utilizados como entradas analógicas, correspondendo, respectivamente, às portas "AI GND" (aterramento) e "AI 6", sendo necessários para a configuração no *software*.

Considerando a metodologia de aquisição e armazenamento dos dados dos ensaios, foi desenvolvido um algoritmo na linguagem Pyhton para estabelecer uma base de dados estruturada e de forma organizada ao longo do trabalho. O código (ver Anexo A) permite a integração entre o sistema DAQ e computador, para ajuste e determinação de parâmetros de medição desejados, assim como auxilia na manipulação dos dados na etapa pós-processamento.

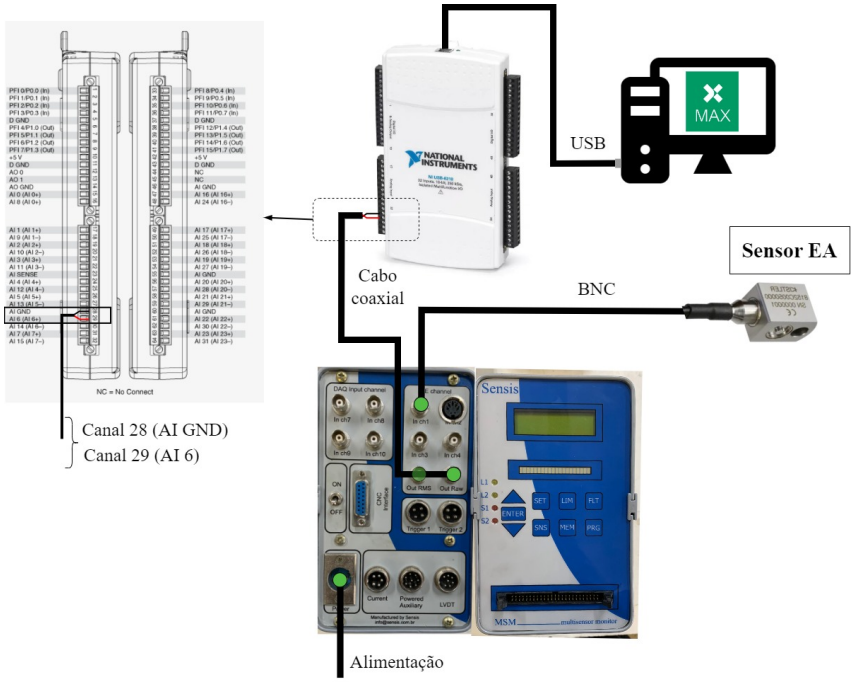


Figura 31 – Esquema de conexão de SM/EA e sistema DAQ.

Fonte: Autor, 2024.

A compatibilidade entre a placa de aquisição e o ambiente Python é viabilizada pela implementação da biblioteca `NI-DAQmx`[1] no código, em que os recursos de medição fornecidos pela National Instruments podem ser ajustados e programados no próprio ambiente de programação.

Seguindo a lógica do código, o canal de aquisição do sinal analógico deve, primeiramente, ser configurado. Para isso, conforme as conexões da placa, define-se para o dispositivo "AE01"a entrada "ai6". As demais configurações do canal, como número total de amostras, taxa de aquisição, modo de amostragem, etc. são definidas a partir da função `nidaqmx.Task()`, adicionando um canal analógico de tensão, em V, por `task.ai_channels.add_ai_voltage_chan()`. No decorrer do trabalho, considerando a configuração do terminal, optou-se por utilizar o *Referenced Single Ended* (RSE), em que o sinal é medido conforme a diferença de potencial entre o terra "AI GND" e a entrada analógica. Ademais, foi utilizado o modo de aquisição finita, ou seja, a partir da escolha de um tempo total de medição e uma frequência de amostragem, calcula-se o número total de amostras, que é dado como entrada no programa. Por fim, a aquisição do sinal de EA, em V, é realizada na duração especificada pelo comando `task.read()`.

3.4.2.1 Estruturação da base de dados e metadados

Uma vantagem de se trabalhar em um ambiente Python, considerando a aquisição de dados, surge na facilidade de estruturação e organização da base de dados, com um

[1] Ver documentação em https://nidaqmx-python.readthedocs.io/en/stable/

enfoque especial na formatação de metadados. Metadados são informações sobre os dados principais (nesse caso, sinal EA), facilitando a identificação, organização e descrição dos dados para análise. Por exemplo, na aquisição de um sinal em um processo de usinagem, os metadados de uma operação incluem, dentre outros, condições cinemáticas de corte, ferramenta e material da peça.

No contexto particular de monitoramento de processos de fabricação, cada operação envolve parâmetros de entrada, ou, condições da máquina ou de ferramenta que afetam diretamente o resultado daquela operação (KLOCKE; KUCHLE, 2009). Nesse caso, deseja-se sempre conhecer e controlar as variáveis de processo, procurando quantificá-las para prever com precisão o comportamento do sistema e os resultados. Dessa forma, um arranjo estruturado de metadados relativos a cada ensaio, com um sinal resultante associado, torna-se fundamental para a organização, análise e pós-processamento. Além disso, a base de dados de monitoramento por meio de transdutores/sensores deve incluir, nos metadados, informações associadas aos tipos de sensores, características do sinal, grandeza mensurada, taxa de aquisição, posição, etc.

Dessa forma, o algoritmo desenvolvido permite, paralelamente à leitura e armazenamento de dados, a entrada e documentação de parâmetros relevantes para cada ensaio, como mostrado no esquema da Fig. 32. Com base na estrutura do código, antes mesmo da configuração do canal, determinam-se todas as variáveis e condições de interesse do ensaio (f_s, tipo de sensor, tempo de ensaio, posição do sensor, v_s, v_f, etc.) e até uma breve descrição do ensaio em formato *string*. Na sequência, com o auxílio da biblioteca `pandas`[2], os dados sobre a medição são armazenados em um formato `DataFrame`, permitindo uma associação de base de dados às respectivas colunas e à indexação pré-definidas (MCKINNEY *et al.*, 2010).

[2] Ver documentação em https://pandas.pydata.org/docs/index.html

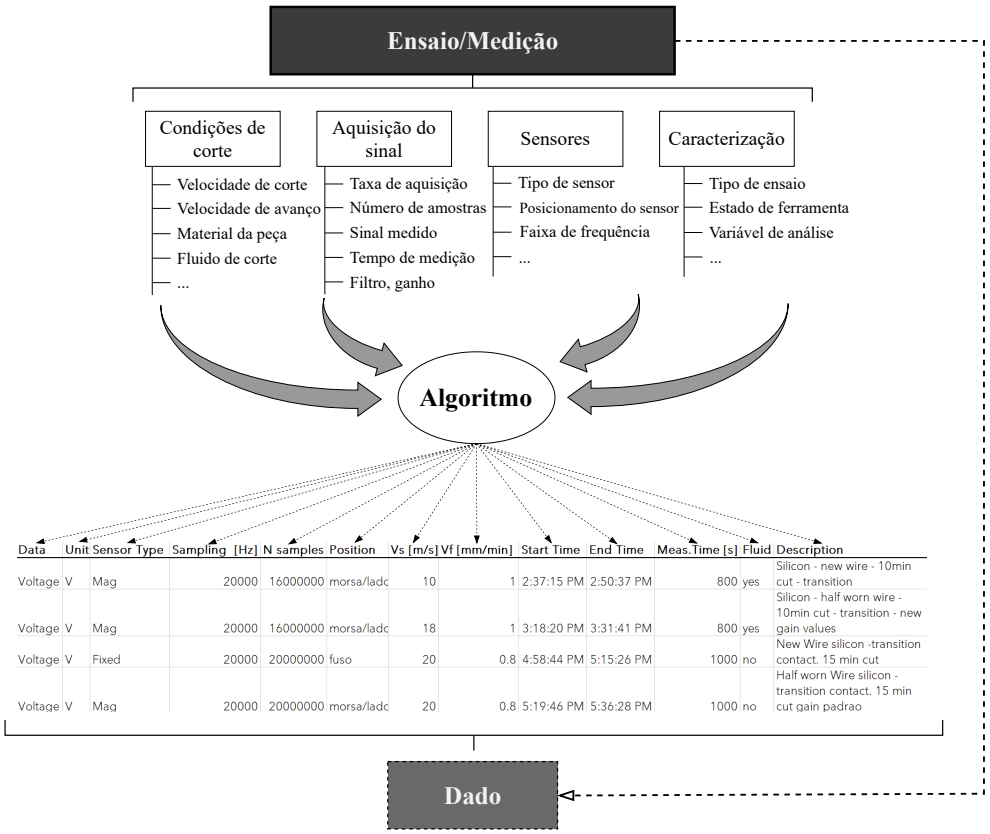


Figura 32 – Fluxograma do algoritmo.

Fonte: Autor, 2024.

Concluída a aquisição de sinal, os dados lidos são armazenados em forma de vetor escalar, com a utilização da biblioteca `numpy`[3], em um `numpy.array()` (HARRIS *et al.*, 2020). Assim, o vetor com os dados lidos do sinal é armazenado na coluna `Data` do `DataFrame` geral no índice associado ao ensaio. De forma simplificada, cada linha do `DataFrame` geral é correspondente a um ensaio/medição realizado, contendo todos os parâmetros utilizados e detalhamentos ou informações relevantes. Assim, ao fim de cada ensaio, os dados são anexados à base de dados composta pelo `DataFrame` geral, ampliando a cada medição.

O armazenamento de sinais no domínio tempo de longa duração, a uma alta frequência de amostragem em formatos `.csv`, comumente utilizado para análise de dados, se torna um desafio. A dificuldade de se lidar com vetores tão grandes (+ 50 milhões de pontos) nesse formato é contornada pelo emprego do módulo `pickle`[4], que permite a serialização ou "empacotamento" de um conjunto de dados. Isto é, um objeto complexo (como um `numpy.array()`) é convertido em uma sequência de *bytes* que pode ser armazenada sem perda de informações. Em conjunto, a biblioteca `pandas` consegue ler e extrair facilmente as informações armazenadas em formato `.pkl`.

[3] Ver documentação em https://numpy.org/doc/2.1/
[4] Ver documentação em https://docs.python.org/3/library/pickle.html

A extração de dados é realizada também pela biblioteca `pandas`, permitindo a filtragem de dados correspondente à características que desejam-se analisar. Por exemplo, pode-se filtrar dados por meio da manipulação do `DataFrame` quanto ao tipo de sensor, posicionamento e outros parâmetros de entrada, possibilitando uma comparação direta e prática.

3.4.2.2 Ajuste de parâmetros

De forma a uniformizar os ensaios e aquisição de sinais EA, são estabelecidos valores padrão de parâmetros tanto no condicionador de sinais Sensis, quanto na configuração dos canais do sistema DAQ. O ajuste de parâmetros do condicionador de sinais foi feito de maneira empírica procurando uma relação específica que evitasse a saturação do sinal, porém com energia suficientemente representativa. Com relação aos ganhos, foram estabelecidos valores de ganho de entrada de 10 e ganho de sinal de 30. O valor da redução de ruído foi maximizado (99%) de modo a evitar interferências elétricas ou da máquina. Os valores de *High Cutoff* (HC) para o filtros analógicos passa-baixa e *Low Cutoff* (LC) para o passa-alta são definidos em uma faixa ampla de frequência, de 100 kHz e 500 Hz, respectivamente. Determina-se essa faixa abrangente para investigar as faixas de frequência do processo em questão. Assim, conhecidas essas faixas, o sinal pode passar por filtros digitais no pós-processamento para mitigar ou eliminar ruídos indesejados. A constante de tempo de integração ΔT é definida como 1 ms, variando nos ensaios de contato.

Tabela 5 – Especificação de parâmetros padrão utilizados no SM/EA e sistema DAQ.

Condicionamento de sinais		**Sistema DAQ**	
Ganho de entrada	10	Canal entrada sensor EA	In ch1
Ganho de sinal	30	Canal saída DAQ	Out RAW
Redução de ruído	99%	Portas entrada NI	Analog Input 28/29
Filtro passa-baixa (HC)	100 kHz	Dispositivo virtual NI-MAX	AE01
Filtro passa-alta (LC)	500 Hz	Canal virtual NI-MAX	Voltage/ai06
Constante de tempo (ΔT)	1 ms	Configuração terminal	RSE
		Freq. amostragem (f_s)	20 kHz ou 200 kHz

Fonte: Autor, 2024.

Com relação ao sistema de aquisição DAQ, os canais e conexões são padronizados da mesma forma, conforme detalhado anteriormente. A saída DAQ varia entre "Out RAW" e "Out RMS", considerando as diferentes abordagens. Para os ensaios de contato, procurou-se utilizar "Out RMS". A frequência de amostragem f_s é escolhida dependente da característica do ensaio realizado. Para a caracterização das faixas de frequência escolhe-se $f_s = 200$ kHz. Para ensaios de medições de maior duração é estabelecida $f_s = 20$ kHz para evitar sobrecarga do algoritmo e armazenamento de vetores muito extensos.

A Tab. 5 apresenta de forma resumida todos os parâmetros utilizados no condicionador de sinais e configurações do sistema DAQ no decorrer do trabalho.

3.5 METODOLOGIA PARA PROCESSAMENTO DE SINAIS E EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS

Após a aquisição e armazenamentos de sinais analógicos EA (sinal de tensão, em V) condicionados pelo sistema SM/EA, e a conversão digital propriamente realizada pelo sistema DAQ, a representação digital do sinal pode ser devidamente tratada para a extração de informações sobre o processo.

A partir da representação digital, diferentes características relevantes podem ser extraídas de sinais utilizando ferramentas para análise no domínio do tempo, da frequência e do plano tempo-frequência.

3.5.1 Aplicação de filtros digitais

Na etapa de condicionamento de sinais EA, o sinal é submetido a um filtro analógico passa-banda presente no próprio dispositivo condicionador. Entretanto, a escolha das frequências de *cutoffs* (LC e HC) do filtro analógico foram escolhidas de modo a serem amplamente espaçadas, a fim de evitar a atenuação de frequências características previamente desconhecidas do processo. Assim, mesmo passando por uma etapa de filtragem inicial, o sinal pode ainda conter ruídos indesejados do processo (máquina-ferramenta, elementos de transmissão, fluido de corte, etc.).

Em razão do baixo custo computacional, a aplicação de filtros digitais no pós-processamento surge como uma alternativa viável para suprimir os ruídos restantes. Dessa forma, procurando minimizar a influência dos ruídos da máquina no processo, foi utilizada uma metodologia de comparação entre sinais provenientes unicamente do funcionamento da máquina e, em contrapartida, sinais do processo de corte. Para isso, foram extraídos sinais EA da máquina operando em vazio (sem o corte efetivo da peça) e uma operação de corte em condições usuais. Foram estabelecidos e combinados entre si 3 valores de LC e HC, formando diferentes filtros passa-banda digitais. A partir de uma análise da resposta em frequência para cada combinação de LC e HC, foi escolhido o filtro cujos parâmetros resultaram na maior supressão do conteúdo de frequência no sinal da máquina operando em vazio, em comparação com o sinal em que ocorre o corte efetivo.

Tabela 6 – Valores de LC e HC para filtros digitais

LC [kHz]	**HC [kHz]**
0.1	100
1	50
5	20

Fonte: Autor, 2024.

A implementação dos filtros digitais é realizada por meio da função `butterworth` do módulo `signal` da biblioteca `scipy`[5]. A escolha de um filtro *butterworth* de 6ª ordem se deve às características de resposta em frequência suavizada e de planicidade de platô na banda passante (NOCETI FILHO, 1998).

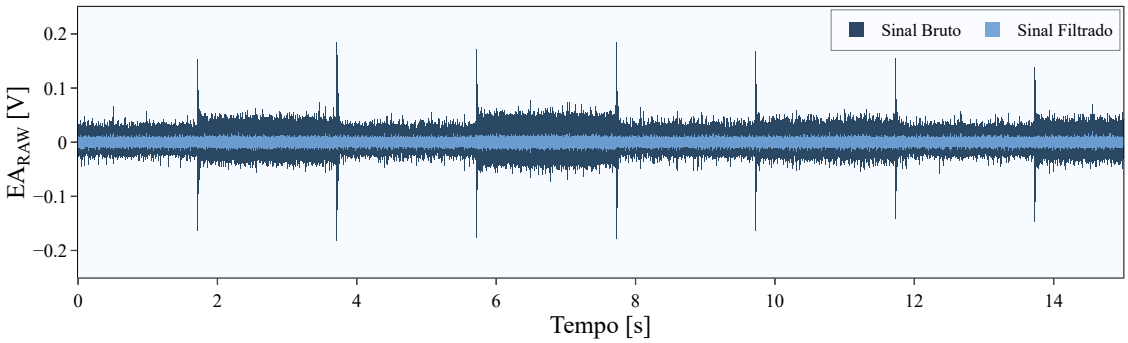


Figura 33 – Comparação de sinais brutos e filtrados.

Fonte: Autor, 2024.

3.5.2 Análise no domínio do tempo

Embora a extração de informações de um sinal EA no domínio do tempo não permita uma caracterização aprofundada da natureza do sinal, a visualização no tempo, assim como a determinação de parâmetros estatísticos descritivos, por mais simples que possam ser, podem servir muitas vezes como ferramentas básicas para a descrição do processo. A representação do sinal no tempo facilita a identificação visual de fenômenos característicos ou particularidades do processo e eventos acústicos (na Fig. 33, observa-se claramente o funcionamento do motor de passo no sinal não filtrado). Além disso, o monitoramento de limites (*thresholds*) estáticos (LE) ou limites dinâmicos (LD) para detecção de eventos singulares pode ser implementado através de uma análise no domínio do tempo.

A determinação de limites LE ou LD contribui para a detecção de eventos acústicos de grande intensidade ou para identificação de fenômenos fora do padrão no domínio do tempo. Normalmente, espera-se que um sinal bem comportado esteja sempre dentro da faixa definida, não apresentando, portanto, qualquer anomalia. No contexto de processos de fabricação, a superação dessa faixa pode ser, frequentemente, associada a um pico no sinal, que representa, possivelmente, a ruptura de ferramenta, impacto ou contato com a peça.

No presente trabalho, LE é tomado com base no valor RMS do sinal (Y_{RMS}) com um fator de 5, sendo utilizado apenas no pós-processamento. A definição de LD, por outro lado, se fundamenta na existência de uma janela de tempo móvel (*rolling/sliding window*)

[5] Ver documentação em https://docs.scipy.org/doc/scipy/

$W_{t,\tau}$ de duração $T_{\mathrm{R,w}}$, em que uma janela de um sinal deslocada de τ com k elementos pode ser escrita como:

$$W_{t,\tau} = \begin{bmatrix} y(t+\tau) \\ y(t+\tau-\Delta t) \\ y(t+\tau-2\Delta t) \\ \vdots \\ y(t+\tau-T_{\mathrm{R,w}}) \end{bmatrix}_k \tag{3}$$

em que, para um sinal digital, $k = f_s \cdot T_{\mathrm{R,w}}$. É importante mencionar, ainda em casos de sinais digitais com N amostras, que o deslocamento τ de cada janela ocorre em intervalos discretos e sobrepostos de tal forma que ocorre uma defasagem do sinal em razão do tamanho da janela para comparação. Em forma matemática, τ assume:

$$\tau \in \{n \in \mathbb{N} \mid f_s \cdot T_{\mathrm{R,w}} \leq n \leq N\}. \tag{4}$$

A implementação da janela móvel é auxiliada por meio da função `pandas.rolling()` da biblioteca `pandas`.

Para cada janela de tempo, a delimitação dos limites superior e inferior é realizada por meio da aplicação de uma função quantil Q_α associado a uma fração α correspondente ao vetor, implementado pela função `pandas.quantile()`. Escolhe-se um quantil de $\alpha =$ 0,99, indicando que 99% dos dados do vetor $W_{t,\tau}$ estão abaixo do resultado da aplicação de Q_α. Além disso, soma-se o valor Y_{RMS} a esse limite com o objetivo de dar margem à faixa estabelecida.

Desta forma, o intervalo LD é formado pelo limite dinâmico superior (LDS) dado por:

$$LDS_{t,\tau} = Y_{\mathrm{RMS}} + Q_\alpha(W_{t,\tau}) \tag{5}$$

Pelo limite dinâmico inferior (LDI), considerando valores negativos provenientes de sinais $\mathrm{EA_{RAW}}$, deve se tomar o valor de quantil escolhido originalmente subtraído de 1, correspondendo, nesse caso, à $\alpha = 0{,}01$. Escreve-se, portanto:

$$LDI_{t,\tau} = -Y_{\mathrm{RMS}} - Q_{1-\alpha}(W_{t,\tau}). \tag{6}$$

Considerando um sinal discreto, representado digitalmente por $y[i]$ com número N de amostras, listam-se, na Tab. 7, os parâmetros estatísticos que podem ser extraídos do domínio temporal. No trabalho, emprega-se majoritariamente o valor de potência P do sinal e Y_{RMS} para caracterização no domínio do tempo. A variância e potência para sinais $\mathrm{EA_{RAW}}$ são numericamente muito próximos por terem a média próxima de 0. Apresentam-se, também na Tab. 7, as faixas LE e LD adotadas. Na Seção 4.4, discute-se detalhadamente sobre o efeito da implementação de LE e LD para detecção de contato.

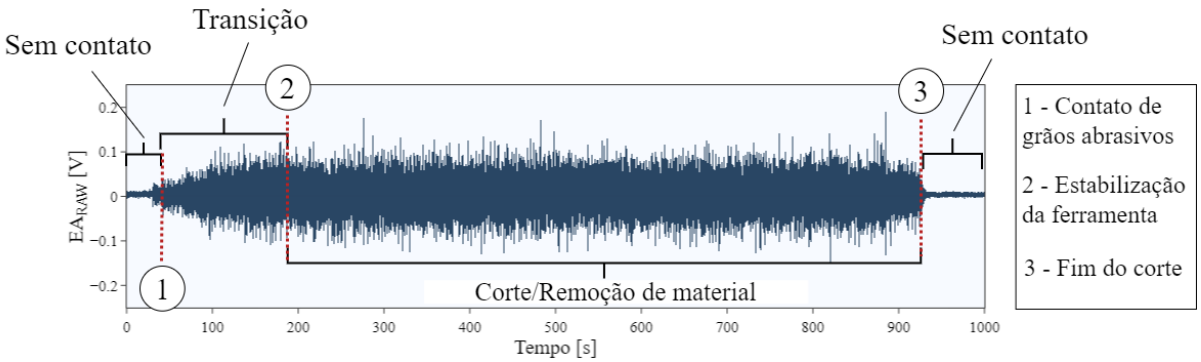


Figura 34 – Sinal típico de uma operação de corte por fio diamantado completa.

Fonte: Autor, 2024.

Um sinal típico do processo de corte por fio diamantado pode ser visualizado na Fig. 34, em que as diferentes etapas do processo podem ser facilmente distinguidas a partir da análise no tempo.

Tabela 7 – Ferramentas para análise no domínio do tempo.

Parâmetro descritivo	**Formulação**	**Método**
Média	$\bar{Y} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y[i]$	`np.mean()`
Valor RMS	$Y_{\text{RMS}} = [\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y[i]^2]^{1/2}$	`endaq.calc.stats.rms()`
Variância	$Y_{\text{var}} = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(y[i] - \bar{Y})^2$	`np.var()`
Potência	$P = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y[i]^2$	`np.mean(signal**2)`
Fator de pico	$Y_{\text{fp}} = \frac{1}{2}(maxy[i] - miny[i])$	`scipy.signal.find_peaks()`
Fator de forma	$Y_{\text{ff}} = Y_{\text{fp}} / \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \lvert y[i]\rvert$	`np.mean(abs(signal))`
Limite (*Threshold*)	**Formulação adotada**	**Método**
Limite estático	$\lvert LE\rvert = 5 \cdot Y_{\text{RMS}}$	`5*np.sqrt(np.mean(signal**2))`
Limite dinâmico	$LDS_{t,\tau} = Y_{\text{RMS}} + Q_{\alpha}(W_{t,\tau})$	`pd.rolling(window=k, center=False).quantile(alpha)`
	$LDI_{t,\tau} = -Y_{\text{RMS}} - Q_{1-\alpha}(W_{t,\tau})$	

Fonte: Autor, 2024.

3.5.3 Análise no domínio da frequência

A transformação do sinal no domínio tempo para o domínio da frequência torna-se uma ferramenta útil, uma vez que informações e características relevantes sobre o sinal podem ser diretamente extraídas do espectro. Para aplicações de monitoramento

de processos e de condição, componentes de frequência estão associados à fenômenos específicos dentro de sua faixa característica, complementando, assim, a análise e extração de características.

3.5.3.1 Densidade de Potência Espectral (PSD)

Da definição da transformada de Fourier, conforme Eq. (7), um sinal estacionário no tempo é reconstruído no domínio da frequência por componentes harmônicas de funções fundamentais trigonométricas.

$$\mathscr{F}\{y(t)\} = Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)e^{-j2\pi ft}dt \tag{7}$$

Considerando processos estocásticos reais, ou que não seguem estritamente o critério de estacionariedade, além de não serem bem definidos por frequências características, opta-se, para a análise na frequência, pelo emprego da densidade de potência espectral (PSD) como ferramenta. A PSD permite representar o sinal como uma decomposição energética no conteúdo de frequência, indicando a potência de cada componente de frequência na forma de espectro.

$$S_{yy}(f) = \mathscr{F}\{R_{yy}(\tau)\} = \int_{-\infty}^{\infty} R_{yy}(\tau)e^{-j2\pi f\tau}d\tau \tag{8}$$

Como consequência da aplicações em sistemas estocásticos, o cálculo da PSD está associada às funções de auto-correlação (ACF), que descrevem a relação do sinal com um conjunto de amostras esperadas $\mathscr{E}$ de si próprio defasadas de τ, auxiliando na identificação de frequências predominantes no sinal. Pode-se demonstrar que uma ACF está diretamente relacionada com a transformada inversa de Fourier da potência do sinal (SHIN, K.; HAMMOND, 2008).

$$R_{yy}(\tau) = \mathscr{E}[y(t)y(t+\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} |Y(f)|^2 e^{j2\pi f\tau}df \tag{9}$$

Numericamente, os espectros PSD foram obtidos por meio da função `psd.welch()` do módulo `calc` da biblioteca `endaq`[6], em que se utiliza do método de Welch. O método de Welch segmenta o sinal em janelas sobrepostas para a realização de médias e obtenção do espectro. No trabalho foi utilizada, para a segmentação, a janela do tipo Hann com *overlap* de 50 % com um número de amostras necessário para garantir uma resolução de frequência de 0,5 Hz.

[6] Ver documentação em https://docs.endaq.com/en/latest/

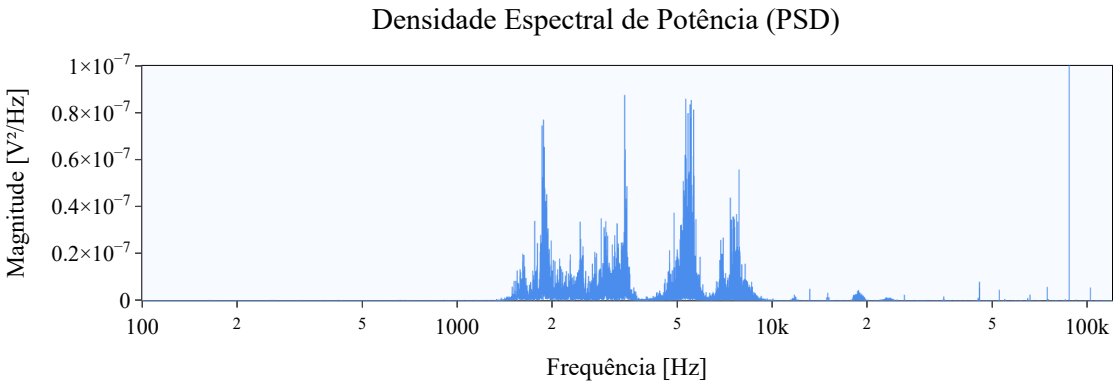


Figura 35 – PSD extraída do processo de corte por fio diamantado.

Fonte: Autor, 2024.

3.5.4 Análise no plano tempo-frequência

Sinais cujos conteúdos de frequência variam no tempo não conseguem ser bem representados pelos métodos tradicionais de transformação para o domínio da frequência, em que se assume uma condição estacionária do processo. Para visualização dessa variação, dispõe-se de ferramentas que integram uma análise de frequência ao longo do tempo, com uma resolução constante ou não.

3.5.4.1 Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT)

A partir da segmentação do sinal em múltiplas janelas $w(t)$, a transformada de Fourier de tempo curto (STFT) parte do princípio da aplicação da transformada de Fourier dos segmentos defasados em um tempo τ. Para tanto, cada segmento discretizado é considerado estacionário em sua extensão.

$$\mathrm{STFT}\{y(t)\} = Y(f,\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)w(t-\tau)e^{-j2\pi ft}dt \tag{10}$$

Resulta, da Eq. (10), um espectrograma em que visualizam-se as variáveis magnitude, tempo e frequência. Da mesma forma, a STFT é computada a partir da função `endaq.calc.fft.rolling_fft()`, com intervalos de tempo de 1 segundo e a aplicação de uma função janela Hann com *overlap* de 50%.

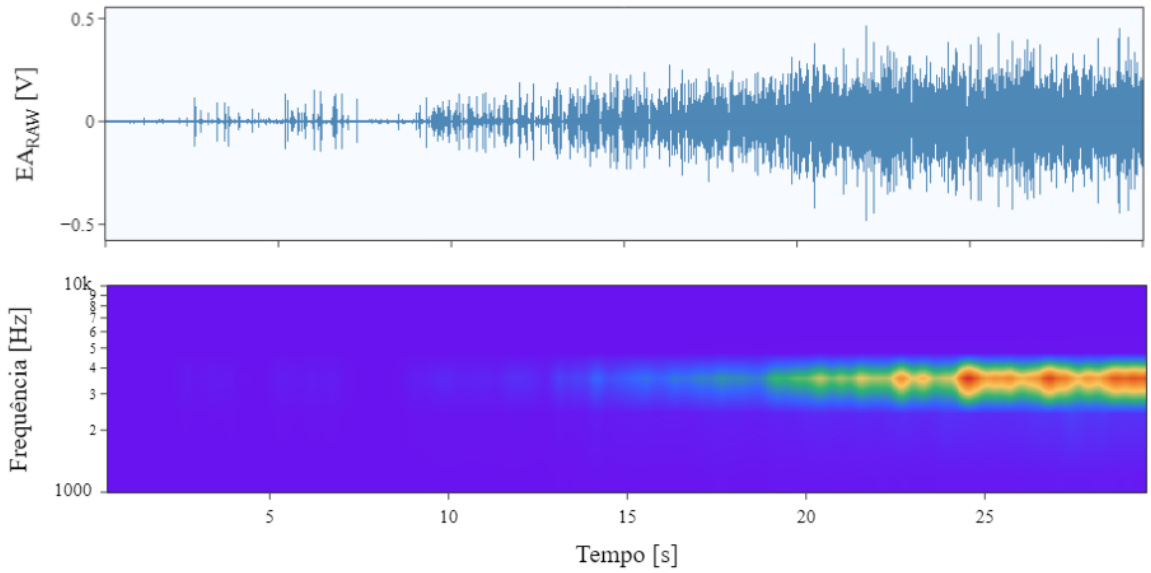


Figura 36 – STFT extraída do início do processo de corte por fio diamantado.

Fonte: Autor, 2024.

3.5.4.2 Decomposição wavelet

A limitação da STFT de distorção da frequência no domínio do tempo, em razão da resolução de frequência constante, pode ser contornada com o uso da ferramenta da decomposição *wavelet*, derivada da transformada *wavelet* discreta (DWT). Essencialmente, a transformada *wavelet* parte do princípio da transformada de Fourier, porém, com janela ajustável (dilatação e translação), por meio de funções de escalonamento, conforme a definição dada na Eq. (11).

$$\mathscr{W}\{y(t)\} = W(a,b,\psi_{a,b}) = |a|^{-1/2}\int_{-\infty}^{\infty} y(t)\psi(\frac{t-b}{a})dt \tag{11}$$

Da definição, $\psi_{a,b}$ é a função base *wavelet* utilizada para a comparação com segmentos do sinal $y(t)$, que deve ser ortonormal e obedecer às condições de um espaço de Hilbert (BURRUS; GOPINATH; GUO, 1998). Apesar de não se obter um resultado diretamente no domínio da frequência, as variáveis a e b estão associadas com a sua definição. a representa o fator de dilatação para o tamanho da janela de tempo, que determina as diferentes resoluções de frequência, enquanto b é a translação da origem de $\psi_{a,b}$. Huang *et al.* (1998) apresenta uma interpretação intuitiva da Eq. (11): $\mathscr{W}\{y(t)\}$ é a relação do sinal $y(t)$ com uma função base $\psi_{a,b}$ em uma escala a em um tempo $t = b$.

Uma vez que o sinal é amostrado e representado digitalmente, a DWT não admite o uso de fatores a e b continuamente escaláveis ou que podem se transladar da mesma forma. Para isso, *wavelets* discretas $\psi_{j,k}$ utilizam fatores escaláveis e transladáveis discretos, da forma:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2}\psi(\frac{t - 2^j \cdot k}{2^j}). \tag{12}$$

Nesse caso, k e j são números inteiros que escalonam e transladam a função *wavelet* base, gerando uma família de funções discretas de ordem múltiplas de 2^n.

Diversas funções base ψ foram desenvolvidas para a associação com sinais em uma transformada *wavelet*, em que a mais simples consiste na *wavelet* Haar, representada por uma onda retangular com propriedades semelhante à função *step*. Para a detecção de sinais abruptos e fenômenos *burst*, a família de funções ortonormais *wavelet* Daubechies destaca-se como a mais adequada, sendo, por isso, utilizada no trabalho.

A decomposição de um sinal em n níveis, pela transformada *wavelet*, conforme Eq. (13), pode ser escrita em termos de uma combinação linear de uma função passa-baixa de escalonamento $\varphi(t)$ deslocada ao longo do tempo, com n funções base $\psi(t)$ ajustadas e deslocadas, funcionando semelhante a um fitro passa-banda.

$$y(t) = \underbrace{\sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{n,k}\varphi_{n,k}(t)}_{\text{Coef. de aproximação}} + \underbrace{\sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{n,k}\psi_{n,k}(t) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{n-1,k}\psi_{n-1,k}(t) + \cdots + \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_1\psi_{1,k}(t)}_{n \text{ Coeficientes de detalhe}} \tag{13}$$

O termo $a_{n,k}$, associado à função $\varphi(t)$, é definido com o coeficiente de aproximação, que permite extrair informações mais gerais e tendências do sinal, principalmente nas baixas frequências. Os termos $d_{n,k}$ são referidos como os coeficientes de detalhes, que são capazes de representar eventos abruptos e variações no conteúdo de alta frequência do sinal.

A implementação da DWT e extração de coeficientes de aproximação e de detalhe se dá por meio da função `wavedec()` da biblioteca `PyWavelets`[7]. Foram utilizadas funções *wavelet* base do tipo Daubechies de 6ª ordem, ou `'db6'`, decompostas em 6 níveis. A função `wavedec()` retorna um coeficiente de aproximação $[A] = a_n$ e uma lista de n coeficientes de detalhe, conforme a definição $[D] = (d_n, d_{n-1}, ..., d_1)$. Fig. 37 mostra a implementação dos coeficientes extraídos DWT de um sinal bruto do processo. Observa-se claramente o funcionamento do motor de passo nos coeficientes associados às baixas frequências, evidente nos coeficientes d_4 e d_5.

[7] Ver documentação em https://pywavelets.readthedocs.io/en/latest/ref/dwt-discrete-wavelet-transform.html

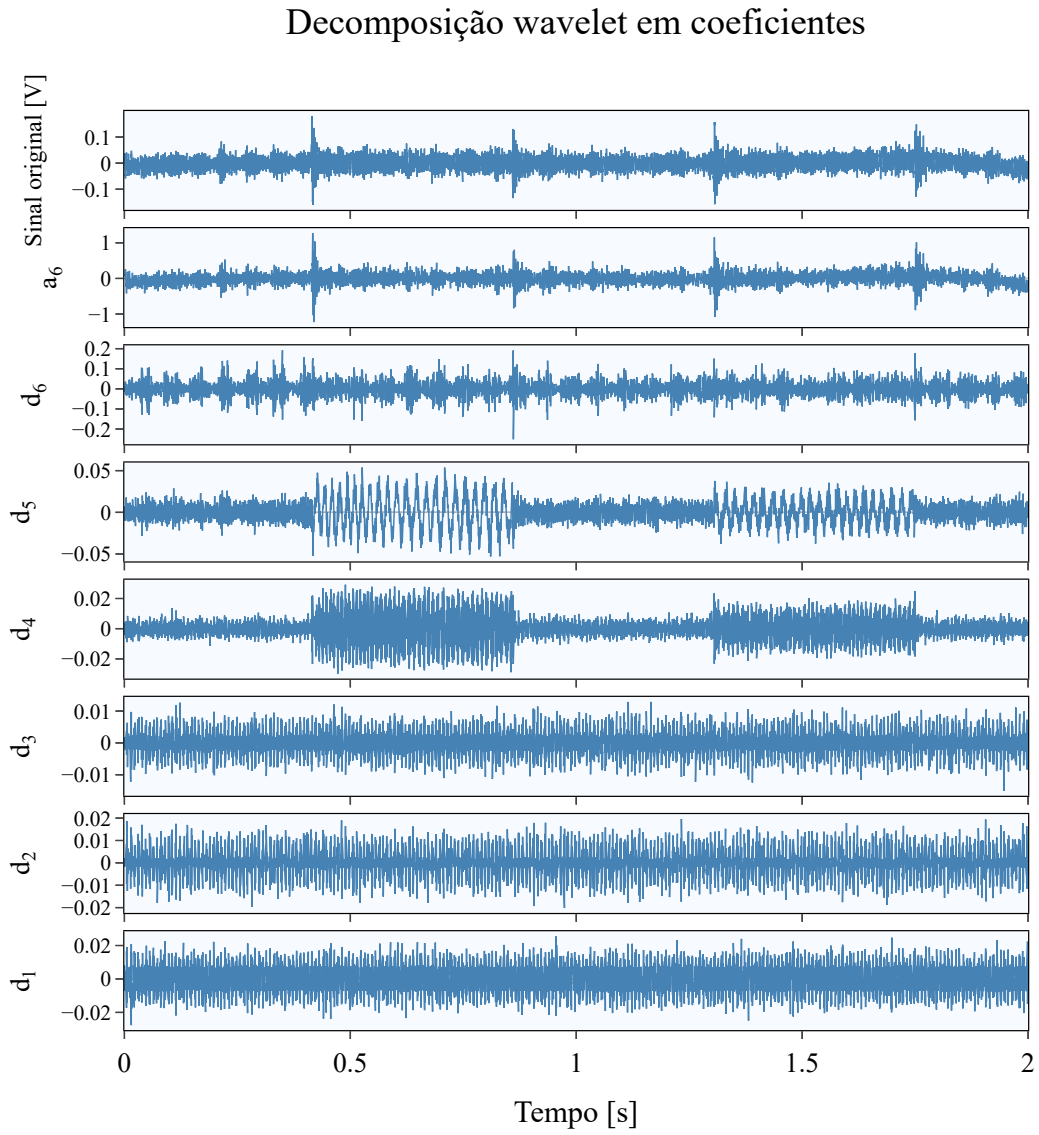


Figura 37 – Decomposição *wavelet* de um sinal bruto EA do processo.

Fonte: Autor, 2024.

3.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios expermentais são divididos em três abordagens, considerando diferentes métodos de caracterização e extração de informações: (1) caracterização cinemática e de posicionamento de sensores, variando condições de corte em diferentes configurações de montagem de sensores EA; (2) detecção de contato ferramenta-peça e de transição do fio; (3) acompanhamento de progressão do desgaste de ferramenta. Para a organização dos ensaios, listam-se em seguida, os parâmetros utilizados para cada abordagem.

3.6.1 Caracterização cinemática do processo e posicionamento de sensores

Considerando as diferentes configurações de posicionamento dos sensores S1 e S2 relativos à máquina-ferramenta, a caracterização e comparação entre as configurações de montagem foram realizadas primeiramente. Para isso, deslocando os sensores entre as posições A, B e C, empregaram-se diferentes velocidades de corte v_s e velocidades de avanço v_f, conforme mostra a metade superior da Tab. 8. Os valores dos parâmetros cinemáticos de usinagem foram escolhidos de acordo com condições utilizadas na indústria de processamento de silício. Desta forma, a partir da comparação dos ensaios , o sinal com a maior potência durante o corte efetivo foi determinado como o mais representativo dos fenômenos de EA em relação ao processo de usinagem.

Tabela 8 – Planejamento experimental para caracterização cinemática.

S1					**S2**				
Pos.	Sinal	f_s [kHz]	v_s [m/s]	v_f [mm/min]	Pos.	Sinal	f_s [kHz]	v_s [m/s]	v_f [mm/-min]
A	EA_{RAW}	200	15	0,8 2	C	EA_{RAW}	200	15	0,8 2
			25	0,8 2				25	0,8 2
B	EA_{RAW}	200	15	0,8 2					
			25	0,8 2					
A*	EA_{RAW}	200	15	0,5 1 2					
			17,5	0,5 1 2					
			20	0,5 1 2					
			22,5	0,5 1 2					
			25	0,5 1 2					

*Configuração S1/A foi determinada como mais representativa para aquisição do sinal de EA.

Fonte: Autor, 2024.

Seguido da determinação da configuração específica mais efetiva para a detecção de eventos (configuração S1/A), realizou-se uma caracterização cinemática mais detalhada, variando entre 5 níveis de v_s e 3 níveis de v_f, conforme a parte inferior da Tab. 8. Investigou-

se o efeito da variação de parâmetros cinemáticos na resposta em frequência do processo, procurando identificar variações ou mudanças de comportamento para cada condição.

3.6.2 Detecção/Acompanhamento de contato ferramenta-peça

A detecção de contato em ferramentas rígidas, como o caso de rebolos no processo retificação, é de característica imediata e direta, sendo facilmente identificada no domínio do tempo. No entanto, particularmente para o processo de corte por fio diamantado, a rigidez mínima da ferramenta de corte por fio diamantado resulta em grande flexibilidade, que traz algumas implicações na detecção de contato e comportamento da ferramenta na ação do corte.

Na medida em que se inicia à remoção de material, o comprimento livre do fio é submetido a uma força contrária ao avanço, resultando em uma deflexão do fio gradativa até a sua estabilização em um nível de deflexão máximo $\delta_{\text{máx.}}$. Conforme o esquema da Fig. 38, antes do contato, na Fase I, a ausência de qualquer tipo de resistência resulta em um grande nível de vibração no comprimento livre do fio. Na sequência, conforme a aproximação do fio em relação à peça, os primeiros gumes abrasivos entram em contato com a peça em razão do movimento de vibração do fio, dando início à Fase II. Ainda na Fase II, observa-se um processo de transição entre os primeiros contatos, surgimento da força de oposição ao movimento de avanço que resulta na deflexão. Esta deflexão aumenta gradualmente até a deflexão máxima e estabilização. A estabilização na deflexão máxima marca o fim da fase de transição e início da Fase III, em que ocorre a remoção de material de forma estável sem perturbações marcantes ou visíveis no domínio do tempo.

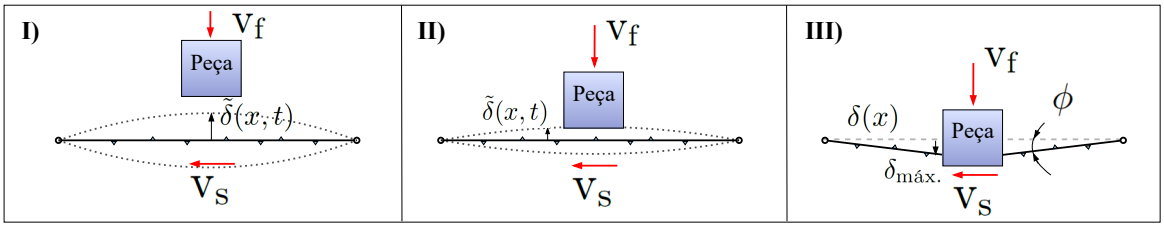


Figura 38 – Esquematização de contato entre ferramenta-peça, transição e deflexão do fio.

Fonte: Autor, 2024.

Para facilitar a identificação das diferentes etapas do processo de contato e estabilização do fio, sinais EA_{RMS} foram adquiridos. Um sinal EA_{RMS} em um instante de tempo t depende diretamente da constante de tempo de integração ΔT e pode ser escrito na forma contínua ou em forma de representação digital, dado por:

$$\text{EA}_{\text{RMS}}(t) = \sqrt{\frac{1}{\Delta T}\int_{t-\Delta T}^{t} \text{EA}_{\text{RAW}}{}^2(t)dt} \approx \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} \text{EA}_{\text{RAW}}{}^2(t-i)} \qquad (14)$$

onde ΔT é a constante de tempo de integração escolhida e N é o número discreto de amostras de cada janela de tempo em análise, em que $N = f_s \cdot \Delta T$. Sinais $\mathrm{EA_{RMS}}$ geram sempre valores positivos, permitindo a visualização da tendência e de valor energético do sinal, mascarando, entretanto, eventos singulares obtidos em um sinal bruto.

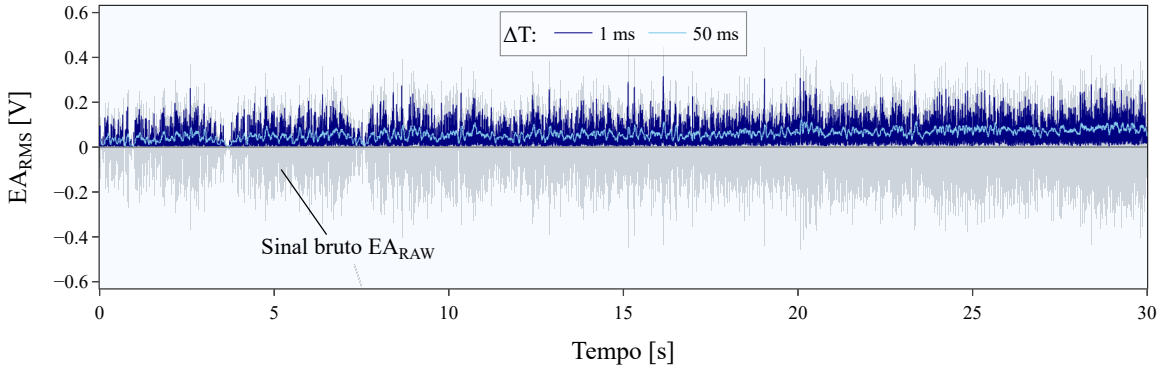


Figura 39 – Sinal $\mathrm{EA_{RMS}}$ típico.

Fonte: Autor, 2024.

A introdução de uma constante de tempo de integração em um sinal RMS provoca um atraso no sinal. Esta defasagem do sinal $\mathrm{EA_{RMS}}$ é semelhante à lógica da definição de um *threshold* LD, podendo ser utilizada para implementação *on-line* de limites e detecção de eventos.

Para os ensaios de contato, iniciam-se as medições antes do contato da ferramenta com a peça, a fim de identificar o contato dos primeiros grãos abrasivos e investigar a Fase II, de transição. Para isso, como indicado na Tab. 9, foram variadas as constantes de tempo de integração ΔT entre 1 a 200 ms, para 2 níveis de avanço diferentes. Também foram experimentados diferentes parâmetros de $T_{\mathrm{R,w}}$, de 0,01 s a 1 s, para a delimitação do limite LD para detecção de contato.

Tabela 9 – Planejamento experimental para detecção de contato.

Sensor	Pos.	Sinal	f_s [kHz]	Tempo [s]	$\mathrm{v_s}$ [m/s]	$\mathrm{v_f}$ [mm/min]	ΔT [ms]
S1	A	$\mathrm{EA_{RMS}}$	20	100	20	0,8	1
							10
							50
							100
							200
						2,5	1
							10
							50
							100
							200

Fonte: Autor, 2024.

3.6.3 Acompanhamento de desgaste de grãos abrasivos da ferramenta

Considerando ferramentas de geometria não definida, o fenômeno de desgaste pode ser dividido quanto à escala em que se manifesta. O desgaste macrospócio está associado à falhas em grande escala (perda de perfil de corte de abrasivos, desgaste radial, etc.) enquanto o desgaste microscópico pode ser atribuído às perturbações relacionadas a grãos individuais e sua fixação com a camada ligante. De forma geral, considerando, as duas escalas, o desgaste de grãos abrasivos implica em um aumento da força de usinagem e na geração de calor devido ao atrito (KNOBLAUCH, R., 2019).

No contexto do processo de corte por fio diamantado, o desgaste de ferramenta está associado, predominantemente, aos fenômenos de arredondamento e plataformização dos grãos, levando à perda da capacidade de corte abrasivo e ao descolamento e fratura de grãos para condições de corte mais intensas. Foi estudado por Ronsoni (2024), a partir de métodos diretos, o acompanhamento de desgaste da ferramenta para diferentes tempos de corte, identificando uma redução de aproximadamente 5% do diâmetro do fio para cortes de maior duração. Esta alteração do diâmetro ocorre em razão do arredondamento dos grãos resultando numa redução da altura de protusão.

De forma análoga, buscou-se, no presente trabalho, investigar o fenômeno de desgaste no fio, por meio de métodos indiretos, identificando alterações das características do sinal de EA, nos domínios do tempo e da frequência considerando diferentes tempos de corte da amostra de carbeto de silício, cuja dureza contribui para o desgaste acelerado. Conforme mostrado na Tab. 11, primeiramente foram extraídos sinais de cortes de duração progressiva de 10, 20 e 40 minutos em sua totalidade, procurando obter um sinal completo e relacionar os sinais EA na medida que o processo de desgaste evolui. Para cada um dos ensaios de tempo de corte foram utilizados fios novos.

Tabela 10 – Planejamento experimental para acompanhamento de desgaste.

Sensor	Pos.	Sinal	f_s [kHz]	v_s [m/s]	v_f [mm/min]	Tempo de corte [min]
S1	A	EA_{RAW}	20	25	0,8	10
						20
						40

Fonte: Autor, 2024.

Adicionalmente, propõe-se uma caracterização baseada em condição instantânea de ferramenta, sem a necessidade de acompanhar os cortes na sua totalidade. Para essa abordagem, são determinadas três condições de ferramenta fundamentadas nas três etapas identificadas curva típica de desgaste de ferramentas (ver Fig. 40). As condições propostas são baseadas, portanto, nos tempos de corte de cada operação: 1) fio novo; 2) fio usado; e 3) fio desgastado.

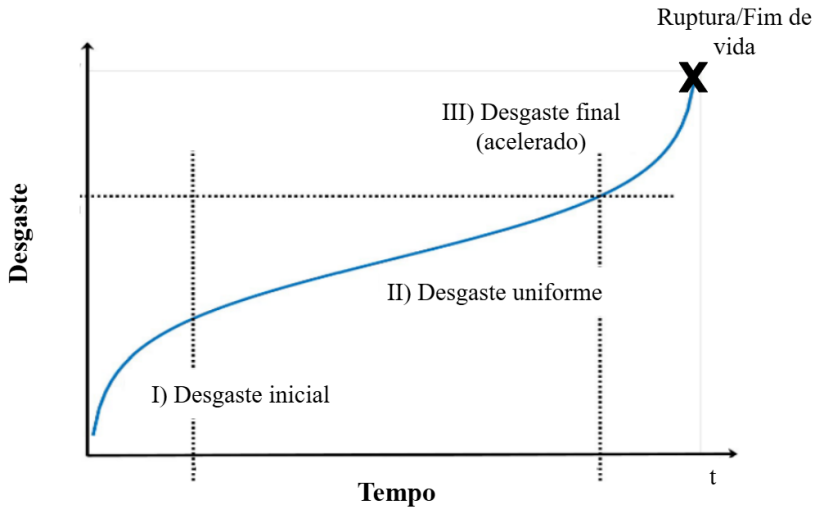


Figura 40 – Curva típica de desgaste de ferramentas.

Fonte: Adaptado de E Taewan Lee, Fan e Sencer (2020).

Dessa forma, para cada condição, captura-se um sinal EA instantâneo em uma curta janela de tempo para o tempo de corte que determina aquela condição, a uma taxa de aquisição $f_s = 200$ kHz. Seguindo a lógica da curva da Fig. 40, o fio novo corresponderia à fase I de desgaste inicial, em um tempo de 5 minutos. O fio usado representa a fase de desgaste uniforme, em um tempo relativamente maior que a primeira etapa, de 15 minutos. Por fim, considerando que a fase de desgaste uniforme ocupa a maior parte da vida da ferramenta, a fase final de desgaste é tomada em um tempo de 50 minutos de corte, o que é esperado para o fim da vida da ferramenta de corte de fio diamantado para o corte de carbeto de silício.

Tabela 11 – Planejamento experimental para caracterização de desgaste baseado em condição de ferramenta.

Sensor	Pos.	Sinal	f_s [kHz]	v_s [m/s]	v_f [mm/min]	Condição	Tempo de corte [min]
S1	A	EA_{RAW}	200	25	0,8	Novo	5
						Usado	15
						Desgastado	50

Fonte: Autor, 2024.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, apresentam-se os resultados referentes aos objetivos e às diferentes abordagens propostas pelo trabalho, procurando discutir os fenômenos físicos envolvidos no processo e como são refletidos nos resultados. Inicialmente, a Seção 4.1 apresenta uma comparação entre a configuração dos sensores. A Seção 4.2 traz resultados comparativos para a seleção do filtro, a partir da aquisição de sinais da máquina operando em vazio e do corte efetivo do processo, procurando identificar a faixa de frequência do processo e suprimir ruídos de componentes da máquina-ferramenta. Na sequência, na Seção 4.3, apresenta-se a influência dos parâmetros cinemáticos de corte v_s e v_f nos sinais EA e na extração de características. Na Seção 4.4, realizam-se análises associadas ao sinais para os ensaios de detecção de contato e fase transição. Por fim, na Seção 4.5 são mostrados resultados de acompanhamento de desgaste e influência dos tempos de corte nos sinais EA.

4.1 POSICIONAMENTO DE SENSORES EA

As diferentes configurações de montagem e distribuição dos sensores, para aquisição de sinais EA, estão sujeitas à diferentes sensibilidades de detecção de fenômenos acústicos relacionados ao corte e à remoção de material. Desta forma, a escolha da configuração mais adequada para os ensaios foi realizada com base em uma comparação da potência do sinal, em V^2, das diferentes configurações propostas, como exposto na Fig. 41. Ao mesmo tempo, foram variados os parâmetros cinemáticos a fim de determinar qual configuração é mais suscetível para detecção dessas alterações.

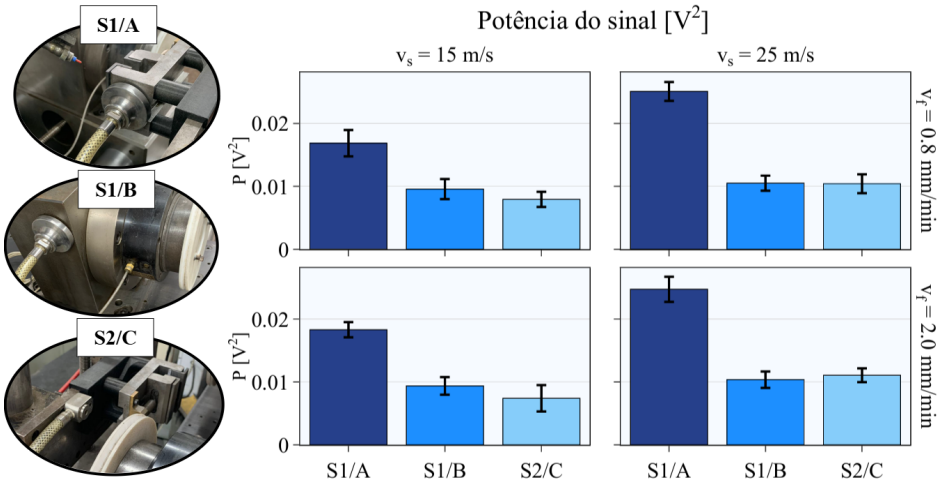


Figura 41 – Potência do sinal para diferentes configurações de montagem de sensores.

Fonte: Autor, 2024.

É possível observar, a partir da Fig. 41, que a configuração S1/A adquire um sinal contendo um nível de energia significativamente maior em comparação às demais. Além

disso, verifica-se um aumento da potência do sinal para maiores velocidades de corte para todas as configurações, com sensibilidade ligeiramente maior para a condição S1/A. Presume-se que o fator de maior proximidade à peça e região de corte, da configuração S1/A, contribua para a aquisição de um sinal EA energicamente mais intenso. Em razão das posições B e C não estarem diretamente associadas à interação peça-ferramenta, ou seja, mais distantes da fonte de geração de onda de EA, detecta-se um nível de potência menor. Respostas em frequência da configurações de posicionamento de sensores são exibidas no Apêndice A.

Considerando os níveis de potência do sinal, considerou-se sinais provenientes de S1/A mais representativos do processo de remoção, sendo utilizado no restante do trabalho para aquisição de sinais e ensaios.

4.2 SELEÇÃO DO FILTRO

Para minimizar a influência dos ruídos gerados pela máquina-ferramenta na aquisição do sinal de EA, foram aplicados diferentes filtros passa-banda, variando valores de LC e HC para dois tipos de sinal: 1) sinal de um processo de corte em condições usuais (config. S1/A); 2) sinal bruto da máquina-ferramenta operando em vazio (sem corte) nas mesmas condições. Desta forma, pode-se relacionar diretamente fenômenos associados ao processo e ruídos da máquina a partir da comparação das respostas na frequência, mostrado na Fig. 42, uma vez que a análise no domínio tempo não permite uma análise característica da natureza dos sinais.

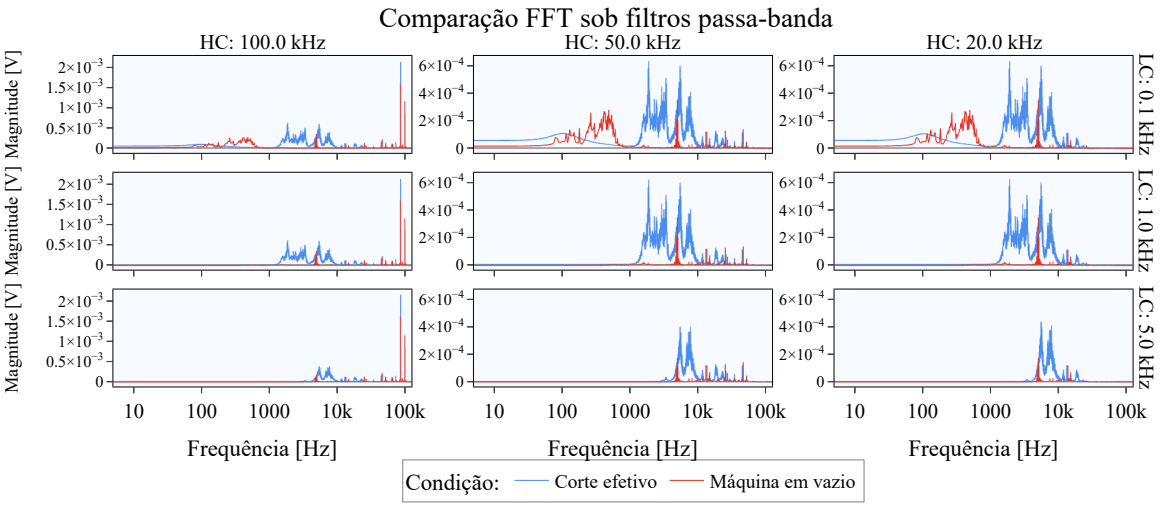


Figura 42 – Comparação de filtros na resposta em frequência de sinais de corte e da máquina.

Fonte: Autor, 2024.

Considerando as diferentes bandas características de frequência envolvidas nos processos, podem ser identificadas, de forma evidente, a predominância da interação

de elementos de máquina nas baixas frequências, para valores menores que 1 kHz, e a remoção de material associada às faixas mais elevadas em um intervalo entre 1-10 kHz. Apesar do espectro da máquina-ferramenta se distribuir majoritariamente sobre uma faixa de frequência inferior, observa-se uma componente representativa em torno de 5 kHz. Componentes de frequência situados em faixas elevadas, em 10-100 kHz, estão presentes em ambas as condições de operação da máquina não permitindo uma associação direta entre os fenômenos. A combinação LC = 1 kHz e HC = 20 kHz mostra-se como a mais representativa do sinal de corte, sendo utilizada no decorrer do trabalho quando não especificada. No Apêndice B, o efeito do filtro selecionado em ambos os domínios pode ser visualizado com maior precisão.

4.3 CARACTERIZAÇÃO CINEMÁTICA

A caracterização cinemática do processo foi realizada a partir da aquisição de sinais EA conforme a variação individual dos parâmetros de velocidade de corte v_s e velocidade de avanço v_f. Foram extraídos sinais do tipo EA_{RAW} para cada combinação de v_s e v_f. Assim, ferramentas de análise no domínio do tempo e da frequência foram aplicadas de modo a extrair informações mais sensíveis à variação dos parâmetros cinemáticos de corte.

4.3.1 Extração de características no domínio do tempo

Apesar da visualização dos sinais no domínio do tempo não permitir uma distinção clara entre as condições de corte em um primeiro momento, a extração da potência serve de indicativo de energia acústica de um sinal.

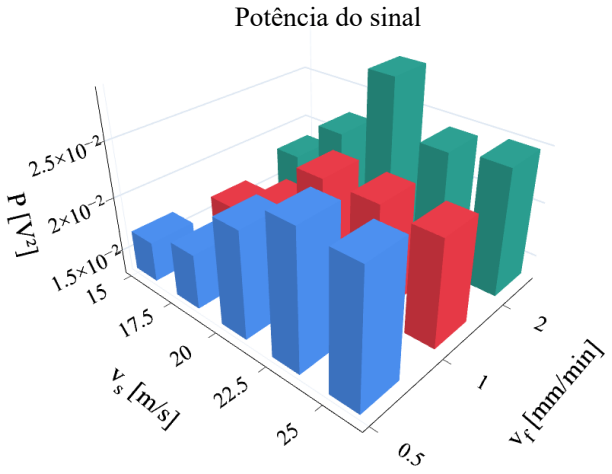


Figura 43 – Potência de sinais para diferentes combinações de v_s e v_f.

Fonte: Autor, 2024.

A extração da potência para diferentes condições cinemáticas, ilustrado na Fig. 43, indica um aumento significativo de potência com o aumento de v_s para todos os níveis de avanço.

Segundo o gráfico da potência, para diferentes condições cinemáticas, ilustrado na Fig. 43, um aumento de v_s corresponde a um aumento da potência para todos os níveis de avanço. Devido ao mecanismo de remoção de material, uma combinação de maior v_s e menor v_f resulta em menores espessuras de cavaco não deformado, sendo o recíproco, da mesma forma, verdadeiro. Nota-se, entretanto pouca correlação entre o parâmetro de potência e v_f, além de um leve aumento, o que, de certa forma, impede de relacionar a potência com mecanismos de formação de cavaco.

4.3.2 Extração de características no domínio da frequência

A avaliação das componentes de frequência para a caracterização cinemática, conforme a variação de parâmetros de usinagem, é apresentada, na forma de espectro, na Fig. 44.

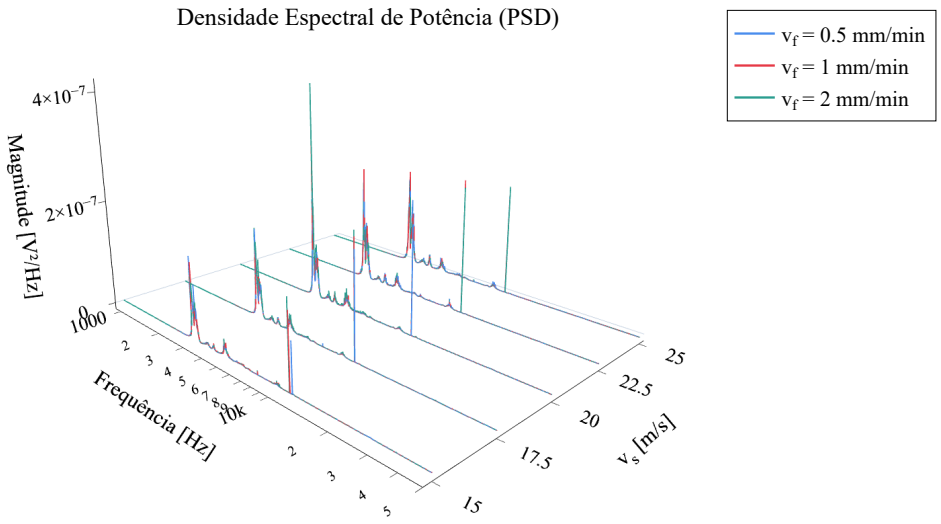


Figura 44 – Espectro de potência para diferentes condiçõe cinemáticas de corte.

Fonte: Autor, 2024.

Pela análise do espectro de potência, pode-se notar que não há uma distinção clara entre diferentes condições de corte na faixa de frequência visualizada. Observam-se apenas pequenas translações e variações de magnitude da componente dos picos em torno de 3 kHz e 12 kHz, o que dificulta a extração de frequências características relacionadas à cinemática do processo.

Faixas de frequência mais elevadas (10-50 kHz) não apresentaram componentes de magnitudes consideráveis, sendo identificadas apenas com uma escala log-z, vide Fig. 45. Da mesma forma, a semelhança de magnitude e forma dos espectros dos sinais torna difícil a extração de informações acerca de frequências associadas à parâmetros cinemáticos de usinagem do processo.

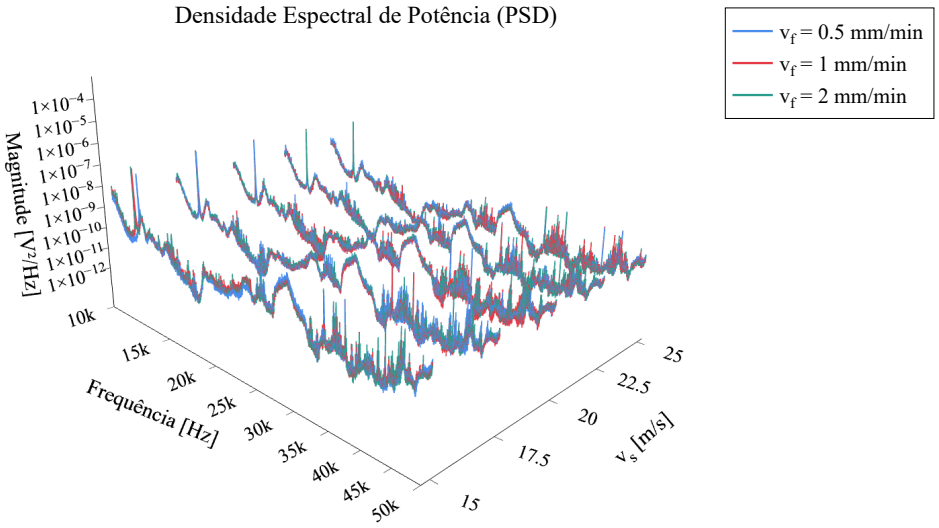


Figura 45 – Espectro de potência para diferentes condições cinemáticas de corte (escala log-z).

Fonte: Autor, 2024.

4.3.3 Extração de características de coeficientes *wavelet*

A aplicaçao da DWT em cada sinal adquirido para diferentes condições de corte permite a decomposição no plano tempo-frequência. Da DWT, são extraídos os coeficientes de aproximação a_n e de detalhe d_n, em que cada um destes coeficientes está associado a uma faixa de frequência conforme a função base de representação. Para cada coeficiente, também está associada uma magnitude em função do tempo, onde maiores magnitudes correspondem a uma maior predominância da banda de frequência analisada no sinal original.

Os gráficos da Fig. 46 representam os coeficientes da decomposição *wavelet* de 6^a ordem em uma condição de corte específica, em comparação com o sinal original. A partir da avaliação dos coeficientes, nota-se uma maior magnitude de d_6 e d_5, relacionados às frequências mais baixas. Presume-se que as bandas de frequência mais baixas estão associadas à máquina, mesmo com a aplicação de um filtro passa-banda, uma vez que o processo de corte e operação da máquina-ferramenta compartilham componentes em uma

faixa média de frequências. Os coeficientes associados às frequências mais altas apresentam pouca magnitude apesar de pouca variação na janela do processo analisada.

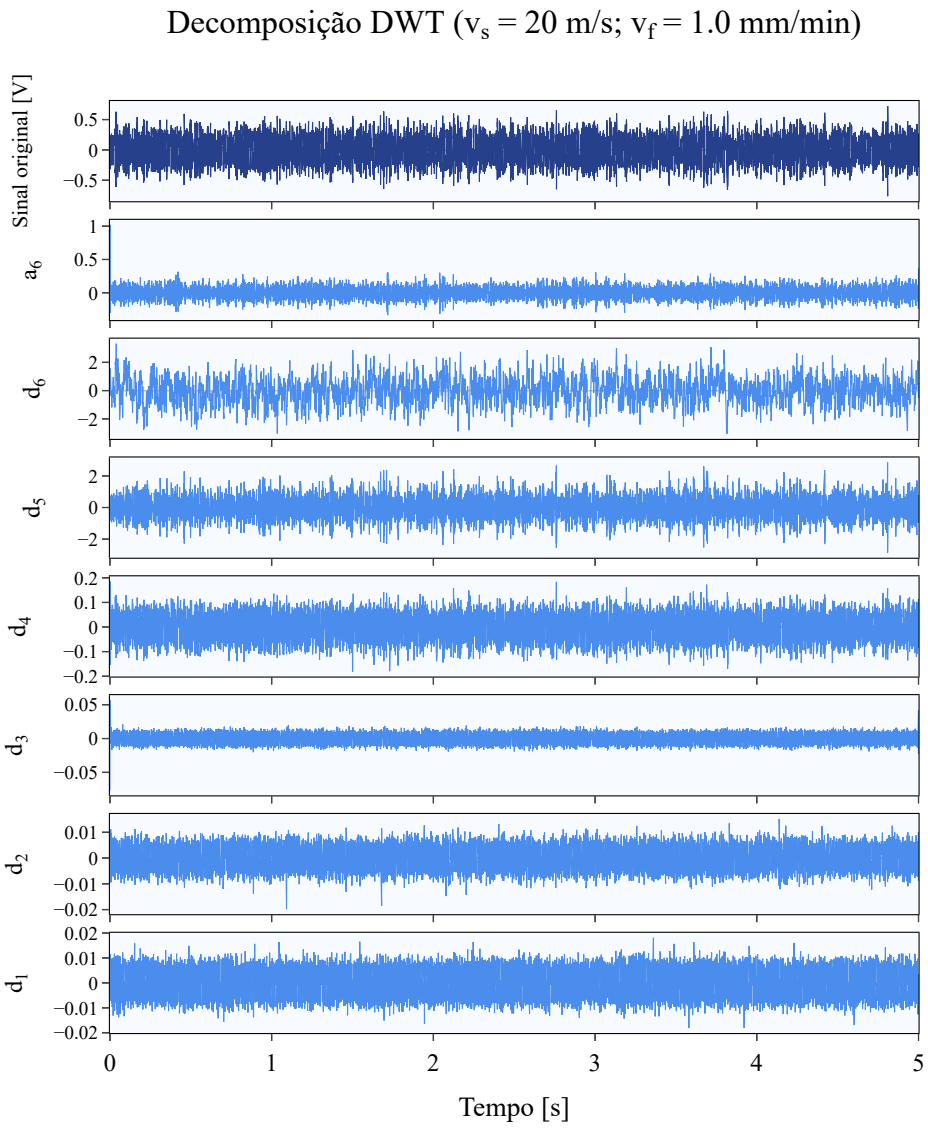


Figura 46 – DWT do sinal EA à condições de v_s = 20 m/s e v_f = 1 mm/min.

Fonte: Autor, 2024.

Para a caracterização dos coeficientes DWT no tempo são extraídos os valores de potência do sinal na Tab. 12 para cada combinação de v_s e v_f dos ensaios realizados.

Da Tab. 12 observam-se algumas tendências interessantes. O coeficiente d_6, associado às baixas frequências mostra-se mais sensível à alteração da velocidade de corte, com um evidente aumento para maiores v_s. Considerando os modos de remoção de material e formação de cavaco, o coeficiente de detalhe d_3 exibe o menor valor de potência para a condição de maior espessura de cavaco não deformado (v_s = 15 m/s e v_f = 2,0 mm/min), em contraste com o maior valor para a condição de corte em que espera-se menor espessura de cavaco não deformado (v_s = 25 m/s e v_f = 0,5 mm/min). Em contraponto, o coeficiente

d_2 contém o maior valor de potência para o cenário de maior espessura de cavaco não deformado.

Tabela 12 – Potência (V^2) de coeficientes de decomposição de 6^a ordem de *wavelet* db6

v_s [m/s]	v_f [mm/min.]	$a_6(\cdot 10^{-3})$	$d_6(\cdot 10^{-1})$	$d_5(\cdot 10^{-1})$	$d_4(\cdot 10^{-3})$	$d_3(\cdot 10^{-5})$	$d_2(\cdot 10^{-6})$	$d_1(\cdot 10^{-6})$
15	0,5	10,492	4,929	2,852	1,050	1,899	5,739	3,434
	1,0	8,230	5,067	2,685	1,031	1,903	5,955	3,545
	2,0*	8,499	5,846	2,851	1,057	**1,857**	7,756	3,814
17,5	0,5	8,401	5,446	3,010	1,123	1,985	6,077	3,504
	1,0	8,855	5,797	2,992	1,166	1,928	5,612	3,444
	2,0	11,145	6,799	3,645	1,379	2,089	6,465	3,541
20	0,5	9,824	7,024	3,662	1,375	2,051	6,005	3,649
	1,0	9,262	6,810	3,953	1,375	2,031	5,904	3,626
	2,0	11,889	8,842	4,734	1,700	2,199	6,269	3,737
22,5	0,5	11,032	7,571	4,232	1,523	2,198	5,571	3,743
	1,0	11,135	7,416	3,630	1,409	2,101	5,159	3,651
	2,0	10,814	7,363	3,948	1,450	2,106	5,114	3,705
25,0	0,5**	10,813	7,623	4,119	1,539	**2,273**	5,348	3,571
	1,0	8,613	6,927	3,741	1,389	2,052	4,671	3,487
	2,0	9,833	7,711	3,963	1,478	2,034	4,568	3,469

*Maior espessura de cavaco não deformado

**Menor espessura de cavaco não deformado

Fonte: Autor, 2024.

Estendendo a análise dos coeficientes de aproximação e de detalhe, pode-se visualizar a faixa de frequência associada a cada coeficiente pela aplicação da FFT, em que $\mathscr{F}\{a_n(t)\} = A_n(f)$, $\mathscr{F}\{d_n(t)\} = D_n(f)$. A resposta em frequência dos coeficientes permite a identificação dos componentes de frequência em cada nível de decomposição da transformada, como mostrado na Fig. 47. Cada coeficiente é caracterizado a uma frequência de amostragem f_s diferente, seguindo uma razão de ordem 2^n conforme o nível.

Para facilitar a visualização e comparação entre as condições cinemáticas, no Apêndice C são apresentados os coeficientes DWT e respectivas respostas em frequências para todos os ensaios realizados.

Além disso, como parte de uma caracterização cinemática mais efetiva, filtros digitais passa-alta com valores de LC = 50 kHz são empregados para a visualização das componentes de alta frequência do sinal no Apêndice D, a fim de avaliar a influência das condições de usinagem nesta faixa de frequência.

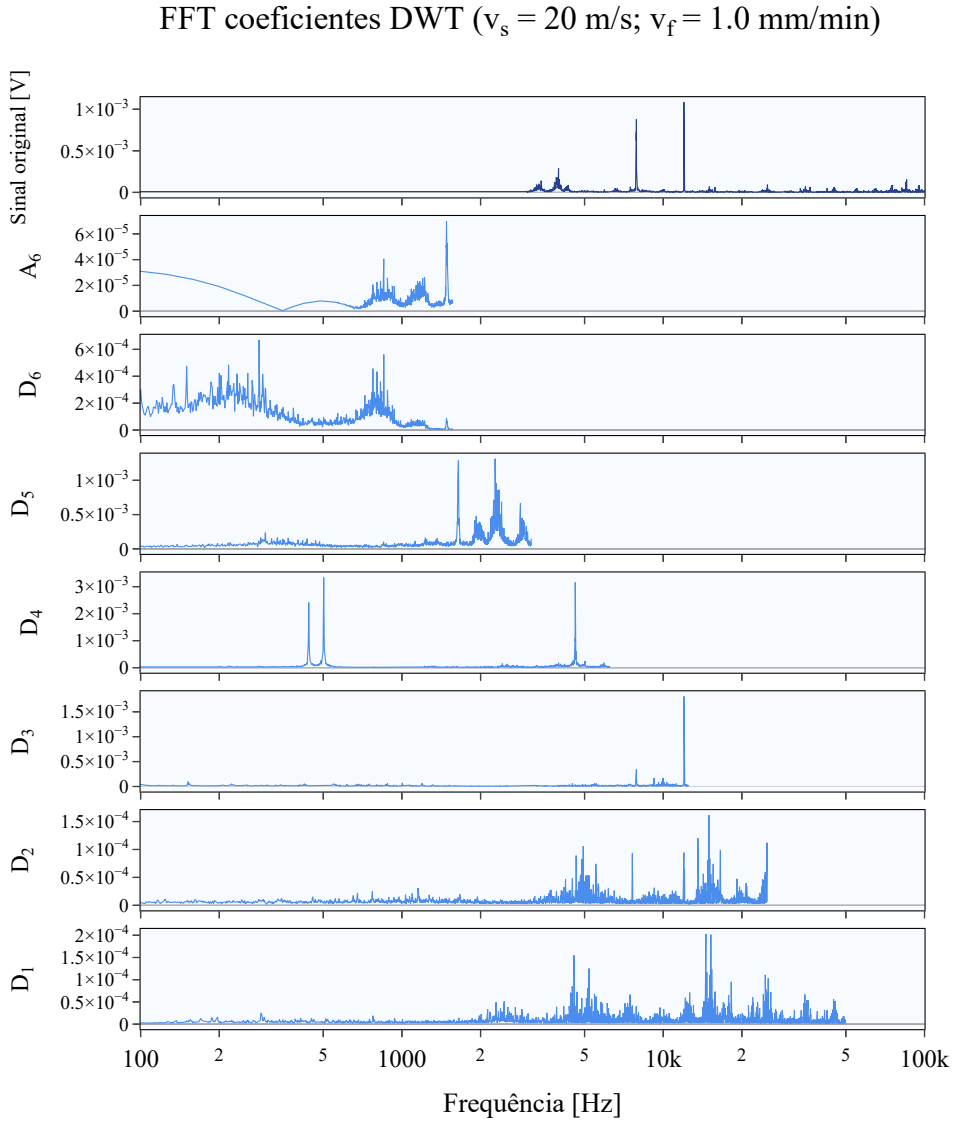


Figura 47 – Resposta em frequência de coeficientes DWT.

Fonte: Autor, 2024.

4.4 DETECÇÃO DE CONTATO

A detecção de contato entre a ferramenta de fio diamantado e peça foi realizada a partir de ensaios abrangendo as Fases I, II e III, conforme esquematizado na Fig. 38. Anterior a qualquer tipo de contato, a grande flexibilidade do fio favorece condições de vibração em uma fase inicial, tornando o contato um fenômenos não instantâneo, mas transitório. Conforme o avanço, é possível detectar os primeiros contatos entre grãos abrasivos e peças, iniciando a fase de transição que resulta na deflexão do fio até uma posterior estabilização em um valor máximo. A Fig. 48 mostra imagens capturadas durante o processo evidenciando as 3 fases identificadas no contato. Nota-se um comportamento vibratório de maior intensidade nas Fases I e II, enquanto a Fase III é marcada pela estabilização do fio em uma posição defletida.

a) b) c)

Figura 48 – Etapas de contato. a) Fase I: vibração do comprimento livre do fio; b) Fase II: deflexão do fio e transição; c) Fase III: estabilização do fio na deflexão máxima.

Fonte: Autor, 2024.

Para a visualização da perturbação inicial, referente à Fase I, e identificação de contato dos primeiros grãos abrasivos com a peça, assim como para a decomposição do sinal na frequência, foram analisados sinais $\mathrm{EA_{RAW}}$ de contato. Por outro lado, a análise do período de transição, da Fase II até a estabilização, foi facilitada pela aquisição de sinais $\mathrm{EA_{RMS}}$, variando o parâmetro ΔT.

4.4.1 Fase I: Detecção de contato abrasivo inicial por sinais $\mathrm{EA_{RAW}}$

Com a finalidade de identificar a primeira interação entre ferramenta e peça no contato, iniciou-se a aquisição do sinal $\mathrm{EA_{RAW}}$ com o fio em uma distância suficientemente longe da peça. Conforme o movimento de avanço, as primeiras perturbações, comparadas ao sinal inicial, foram associadas às interações dos gumes abrasivos com a peça. Na Fig. 49 observam-se as primeiras interações no tempo próximo de 1 segundo.

Verifica-se a partir da análise do trecho com maior ampliação da Fig. 49 um comportamento semelhante a uma resposta a um impulso no domínio do tempo. Dessa analogia, estima-se que o contato de grãos abrasivos está associado a uma liberação instantânea de uma grande quantidade de energia, tal como um sinal do tipo *burst*, seguido de uma atenuação no meio em que se propaga.

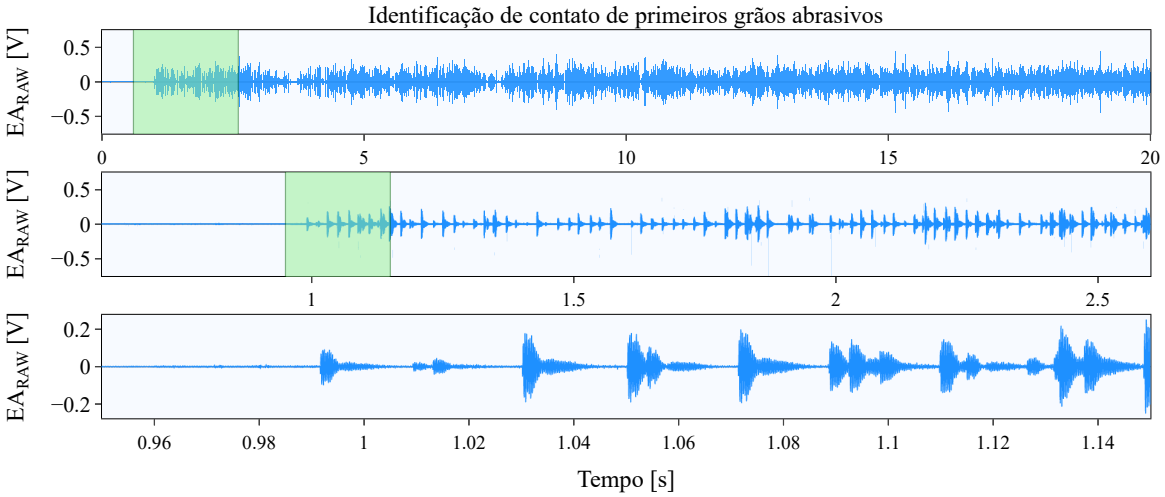


Figura 49 – Detecção de contato de primeiros gumes abrasivos.

Fonte: Autor, 2024.

Inicialmente, a ocorrência dos pequenos impulsos no sinal pode ser identificada de forma singular. Entretanto, à medida que a ferramenta avança, o número de ocorrências aumenta e os contatos não podem ser mais distinguidos entre si, tornando-se semelhante a um sinal contínuo.

A análise do contato inicial pode ser levada para o plano tempo-frequência a fim da identificação das componentes de frequência relacionadas à penetração dos gumes abrasivos na peça. A Fig. 50 mostra os resultados da aplicação da STFT nesta janela de tempo inicial, de 0 a 5 segundos, onde identificam-se os primeiros contatos.

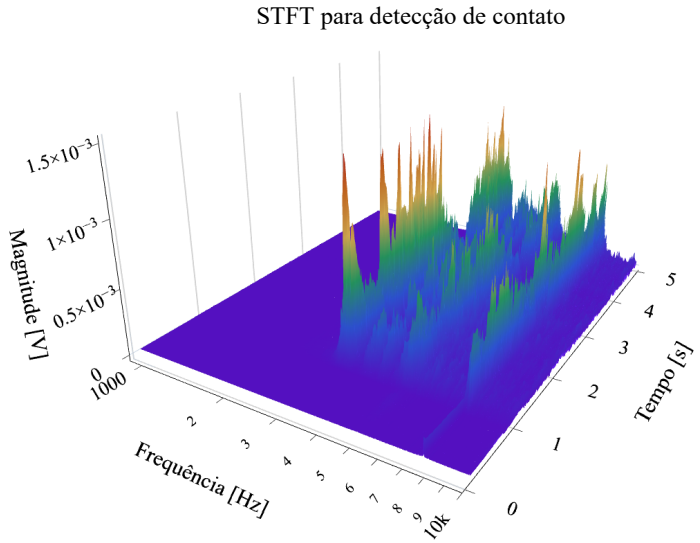


Figura 50 – Espectrograma para detecção de contato inicial.

Fonte: Autor, 2024.

A partir da visualização espectrograma nota-se uma região no eixo da frequência influenciada diretamente pelas perturbações provocadas pelo contato. O intervalo entre 3 e 6 kHz, em um primeiro momento, não possui qualquer componente relevante. A partir do instante $t = 1$ segundo, entretanto, observam-se flutuações e variações de grande intensidade nesta faixa. Por outro lado, supõe-se que a componente de frequência localizada próximo a 8,5 kHz esteja relacionada à operação da máquina, uma vez que desde o instante inicial tenha uma magnitude de ordem considerável.

Da mesma forma, os coeficientes DWT do sinal $\mathrm{EA_{RAW}}$ são extraídos para dois níveis de avanço diferentes, conforme Fig. 51. Observou-se, considerando detecção de contato, uma maior magnitude dos componentes relacionados às altas frequências, especialmente d_3 e d_2.

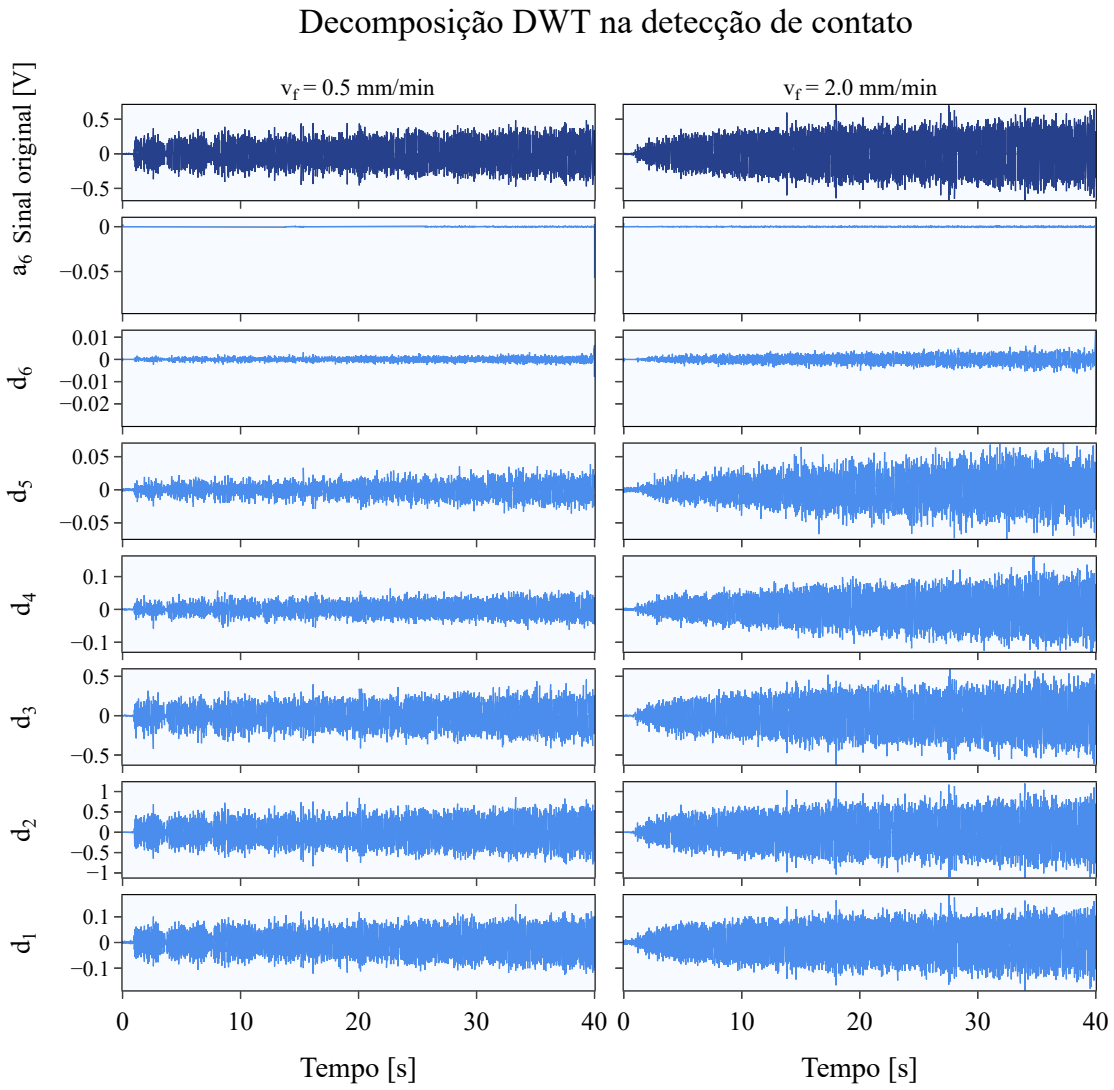


Figura 51 – Decomposição *wavelet* de 6^a ordem db6 para detecção de contato.

Fonte: Autor, 2024.

4.4.2 Fase II: Detecção de contato e transição por sinais EA_{RMS}

Após o contato inicial do fio, dá-se início à Fase II, em que a resistência em oposição ao avanço da ferramenta resulta em uma deflexão. Para a visualização representativa dessa etapa transitória foram adquiridos sinais EA_{RMS}, inciando os ensaios, da mesma forma, com o fio a uma distância que garantisse a não interferência entre ferramenta e peça.

A característica do sinal EA_{RMS} de representação de energia acumulada ao longo do sinal, considerando a constante de tempo de integração ΔT escolhida, facilita a visualização e acompanhamento da etapa de transição do contato. A Fig. 52 ilustra o acompanhamento de contato e transição para um sinal EA_{RMS} sob diferentes valores de ΔT. A vantagem do sinal EA_{RMS} para a fase de transição surge na identificação evidente da tendência e deriva do sinal no domínio do tempo.

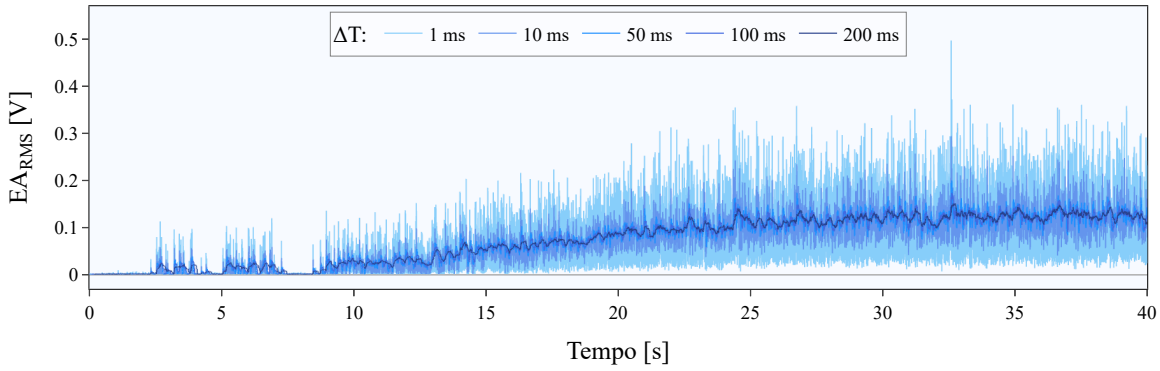


Figura 52 – Comparação de ΔT para aquisição de sinais EA_{RMS} para detecção de contato.

Fonte: Autor, 2024.

Para a avaliação da fase de transição são comparados, para dois níveis de v_f, os sinais EA_{RMS} empregando diferentes valores de ΔT, como apresentado na Fig. 53. Os sinais de diferentes ΔT são apresentados com um *offset* para a melhor visualização. Maiores valores de ΔT correspondem a um maior *offset* vertical.

Considerando o nível crescente de avanço, percebe-se uma redução do tempo de duração da fase de transição, evidenciado pela Fig. 53. Para o valor $\Delta T = 200$ ms fica clara a correlação entre v_f e a fase de transição. Para uma menor taxa de avanço, a transição é lenta e gradual, enquanto para maiores taxas, observa-se uma estabilização rápida.

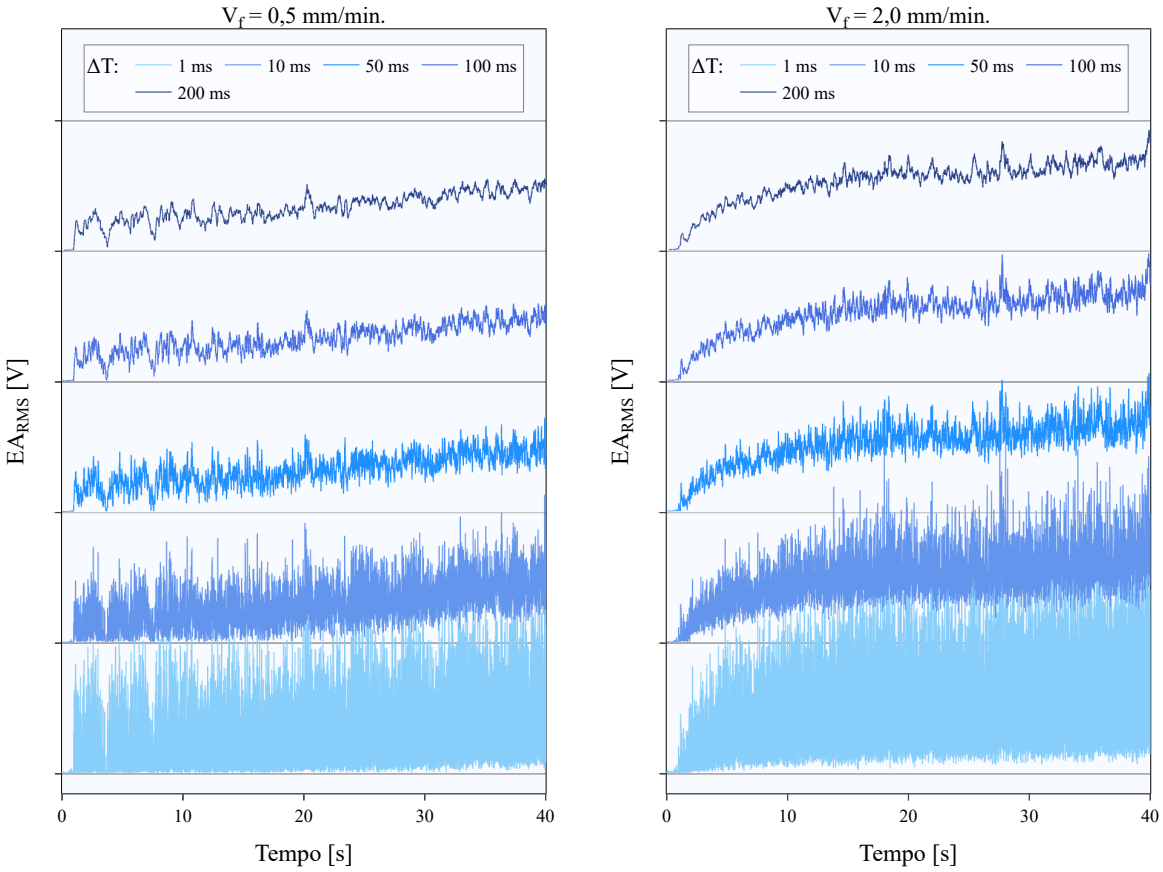


Figura 53 – Comparação de ΔT em sinais EA_{RMS} para dois níveis de v_f.

Fonte: Autor, 2024.

4.4.3 Limites estáticos e dinâmicos para detecção de contato

Considerando que o contato de gumes abrasivos do fio com a peça implica em uma variação brusca do sinal detectado, limites estáticos (LE) e limites dinâmicos (LD) (*Static and Dynamic Thresholds*) foram aplicados para identificação de pontos de superação desse limite e associação com o contato. A faixa LE é tomada como um valor constante e não variável ao longo do tempo baseada no valor RMS do sinal total, compreendida entre LEI e LES. Por outro lado, a faixa LD, limitada por LDI e LDS, utiliza janelas temporais móveis para a determinação de cada limite em qualquer instante de tempo. A aplicação de LD se torna particularmente útil para a detecção de alguma ocorrência ou variação brusca no sinal, uma vez que os valores LDI e LDS são sempre calculados como valores relativos à janela de tempo anterior.

Comparam-se as duas abordagens de aplicação LE e LD na Fig. 54. Foram implementados os limites em um sinal EA_{RAW} para detecção de contato, variando entre 5 tamanhos da janela de tempo móvel $T_{R,w}$, em segundos, para cálculo de LDI e LDS. Em seguida, foi determinado o número de pontos que extrapolam o limite dinâmico $N_{>|DT|}$, baseado no sinal original.

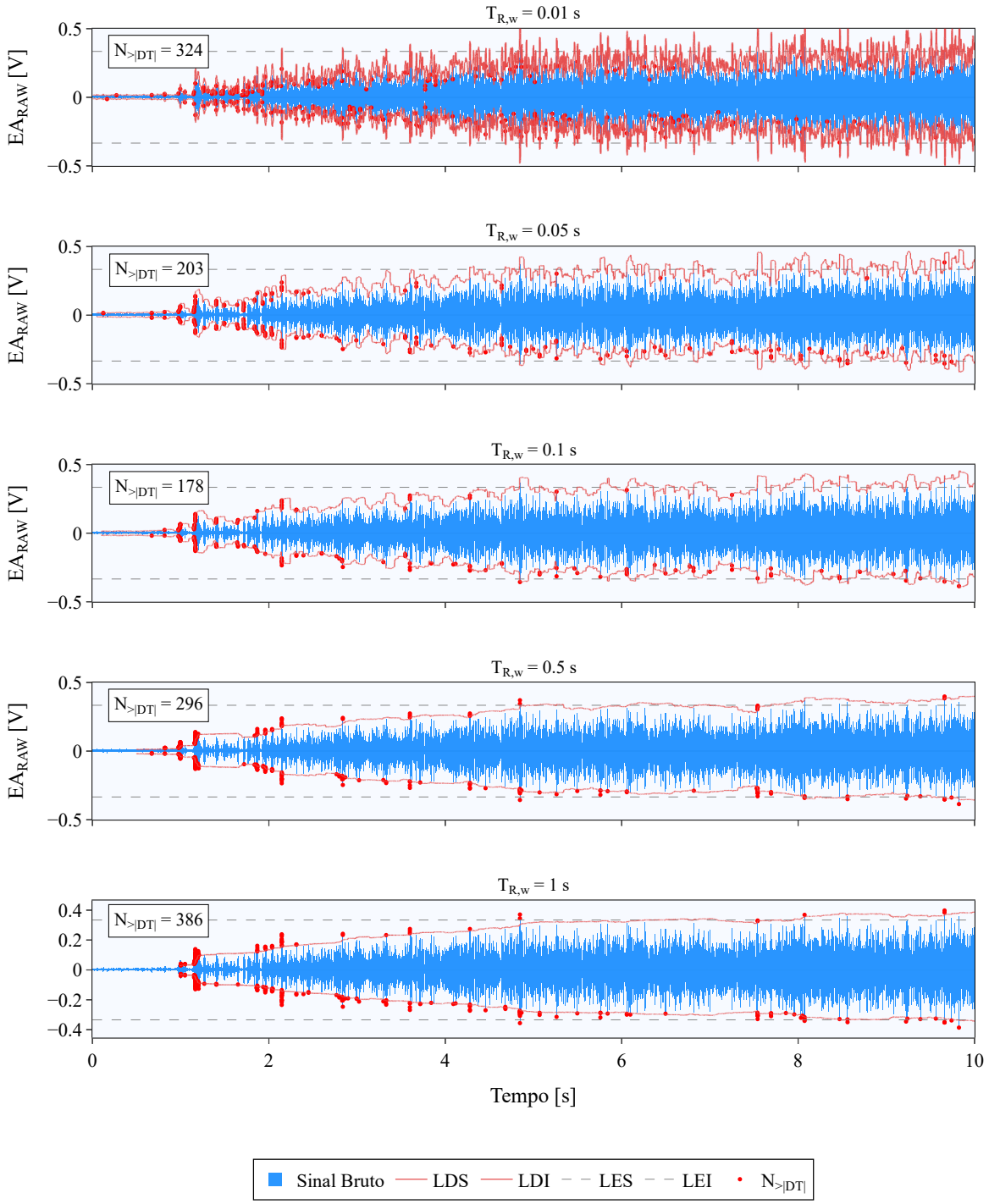


Figura 54 – Comparação de $T_{\mathrm{R,w}}$ para determinação de LD na detecção de contato.

Fonte: Autor, 2024.

Nota-se, pela Fig. 54, que maiores valores de $T_{\mathrm{R,w}}$ mostram-se mais adequados para a detecção de variações brusca, apresentando uma maior densidade de número de pontos fora do limite LD na região de contato. Dessa forma, o uso de uma faixa LD mostra-se eficiente para capturar variações relativas do sinal, ainda com a vantagem de possibilitar a implementação *on-line*, ao contrário do LE.

4.5 ACOMPANHAMENTO DE DESGASTE

Conforme os mecanismos de desgaste de ferramenta abrasiva presentes na dinâmica do processo, procurou-se extrair informações relacionadas ao arredondamento de grãos e redução de altura de protusão ao longo do tempo a partir de sinais $\mathrm{EA_{RAW}}$ e $\mathrm{EA_{RMS}}$. Fenômenos de progressão do desgaste no fio diamantado, estudados por Ronsoni (2024), foram outrora caracterizados por meio de métodos diretos para tempos de corte crescentes. De forma semelhante, o presente trabalho dispôs-se da utilização da mesma lógica de emprego de tempos de cortes sucessivamente maiores, extraindo informações, porém, provenientes de métodos indiretos, como sinais EA.

4.5.1 Análise de evolução progressiva do desgaste

Considerando os ensaios longos para acompanhamento progressivo do desgaste em durações crescentes, sinais $\mathrm{EA_{RMS}}$ a uma frequência de amostragem $f_s = 20$ kHz e $\Delta T = 150$ ms foram adquiridos em sua totalidade, exigindo uma grande capacidade de processamento e memória para alocação dos dados. A visualização dos sinais $\mathrm{EA_{RMS}}$ auxilia a verificação de tendências no domínio tempo, como ilustrado na Fig. 55.

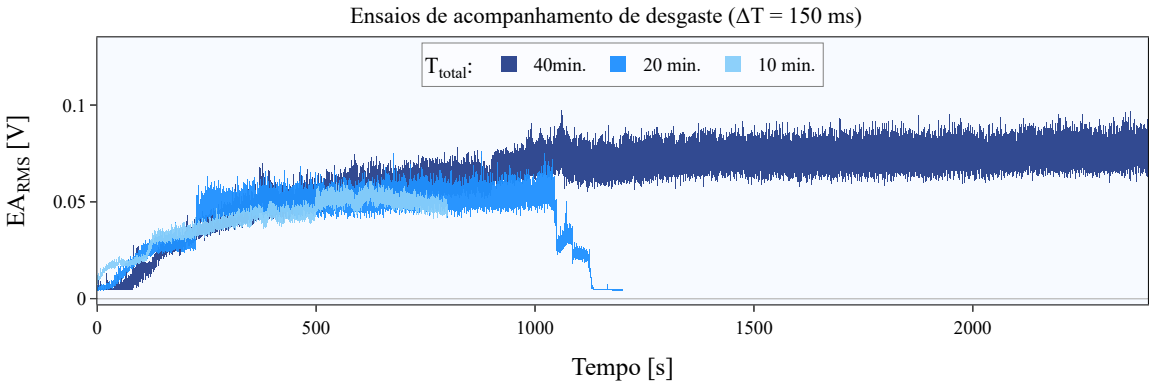


Figura 55 – Sinais $\mathrm{EA_{RMS}}$ para acompanhamento de desgaste.

Fonte: Autor, 2024.

Observa-se, a partir dos sinais inteiramente obtidos em sua duração, um comportamento de deriva ao longo do tempo, além de pequenas perturbações no decorrer dos cortes. Levando em conta o objetivo do estudo, em todos os tempos de corte empregados, verifica-se, notavelmente, um aumento gradual do nível de energia no sinal, sendo evidenciado no ensaio de maior duração ($T_{\mathrm{total}} = 40$ minutos). De forma a normalizar os tempos de corte, Fig. 56 oferece uma visualização de valores RMS em pequenas janelas de tempo (5 segundos) ao longo do sinal. O tempo normalizado corresponde à fração relativa de corte decorrido no ensaio realizado, em que foram utilizadas condições cinemáticas de $\mathrm{v_s} = 25$ m/s e $\mathrm{v_f} = 0{,}8$ mm/min.

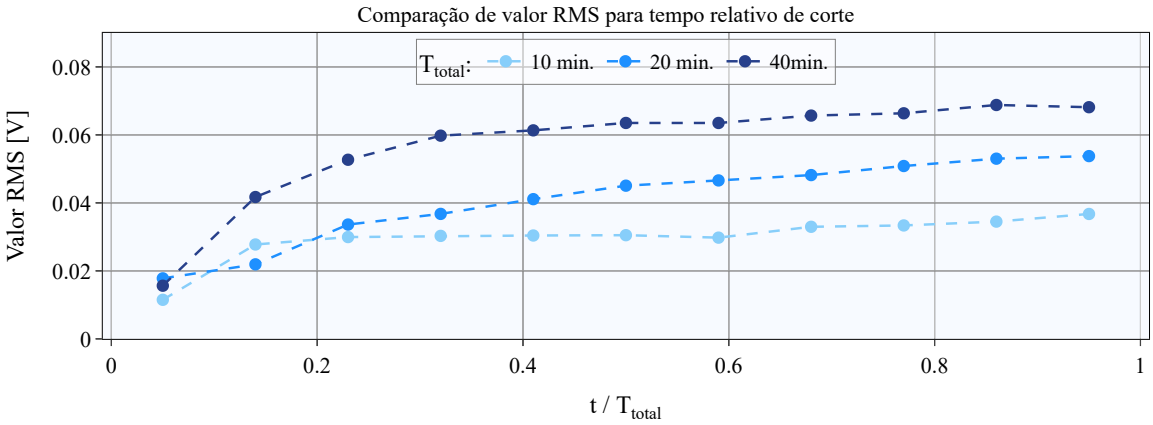


Figura 56 – Valores RMS para tempo de corte relativo para ensaios de duração sucessivamente maior.

Fonte: Autor, 2024.

Pela análise dos valores RMS em função do tempo normalizado, nota-se um comportamento semelhante de crescimento com o tempo relativo para todas as durações. Surpreendentemente, os valores de tempo normalizado se relacionam com seus múltiplos em função da duração total do ensaio. Para exemplificar, o valor RMS no instante $0{,}5T_{\text{total}}$ no ensaio de 40 minutos, se aproxima ao valor encontrado em $0{,}95T_{\text{total}}$ no ensaio de 20 minutos, uma vez que representam tempos correspondentes, e assim por diante. Esta relação sugere a existência um mecanismo de progressão de desgaste semelhante para os fios analisados.

A tendência verificada condiz com resultados de: D. Dornfeld e Cai (1984) e König, Altintas e Memis (1995), em que o carregamento de rebolos e nível de energia foram acompanhados em ensaios de longa duração, observando o mesmo comportamento; e Mahata, Shakya e Babu (2021), onde foi visualizado um aumento na energia das componentes de frequência nos espectros de magnitude.

Conforme a física e dinâmica do processo, o mecanismo de desgaste leva ao arredondamento e plataformização de grãos abrasivos do fio. Como resultado, há uma redução da altura de protusão ao mesmo tempo que a área de contato dos grãos aumenta. O aumento da área de contato em abrasivos desgastados indica um aumento do contato friccional com a superfície da peça, levando a sinais EA de maior intensidade. Dessa forma, o aumento de taxa de energia do sinal sugere uma resposta do sistema em relação ao aumento de energia necessária para a remoção de material e formação de cavaco.

A análise de acompanhamento de desgaste progressivo pode ser estendida para o domínio da frequência, mais especificamente no plano tempo-frequência, conforme Fig. 57.

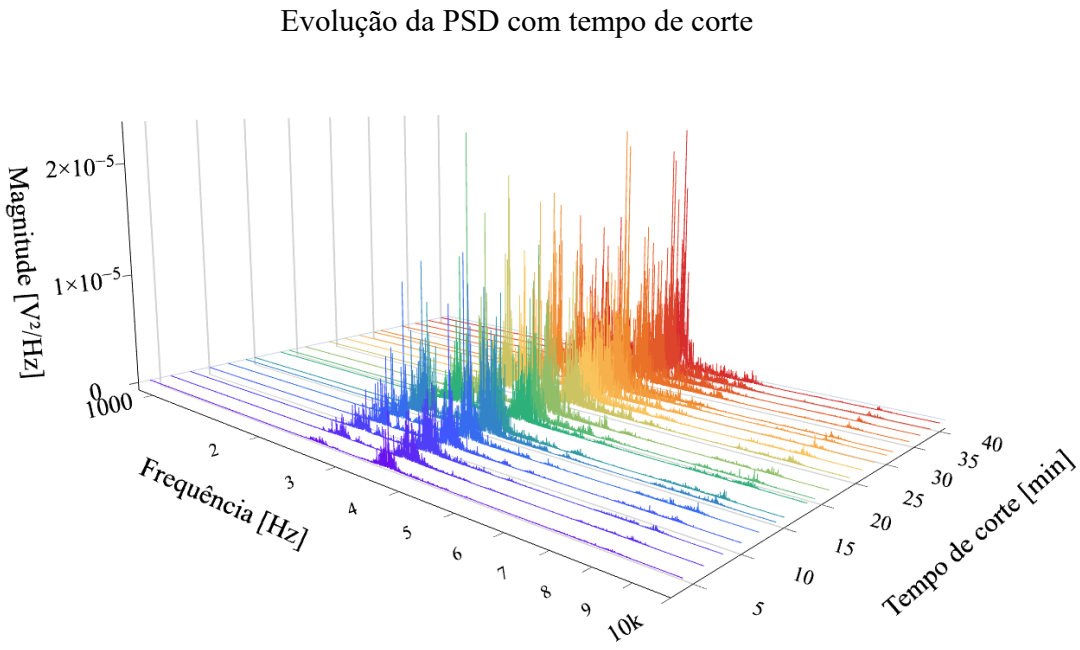


Figura 57 – Espectros de potência ao longo do tempo para acompanhamento do desgaste.

Fonte: Autor, 2024.

Tomando pequenas janelas de tempo, foram computados espectros de potência em intervalos de tempo igualmente espaçados no ensaio de maior duração para avaliação das componentes de frequência ao longo do tempo. Com relação às componentes de frequência, os espectros apresentam formas similares, diferindo nas magnitudes dessas componentes. Ao longo do tempo de corte, nota-se uma tendência de aumento da intensidade espectral e um espectro progressivamente mais amplo, identificando maiores componentes de frequência não visíveis nos primeiros instantes do corte.

4.5.2 Análise instantânea do desgaste para diferentes condições de ferramenta

Paralelo aos ensaios de acompanhamento progressivo do desgaste, um corte de longa duração (60 minutos) foi realizado para obtenção de sinais instantâneos de EA_{RAW} em determinados instantes de tempo. O sinal completo, para a visualização das janelas é disposta na Fig. 58. O emprego de uma análise instantânea em pequenas janelas de tempo nos instantes 5, 15 e 50 minutos do corte permite a utilização de uma taxa de amostragem maior para caracterização das componentes de frequência com base na condição da ferramenta. Os instantes em que os sinais são adquiridos são determinados com base na curva de desgaste abrasivo e resultados anteriores de caracterização de desgaste por métodos diretos, investigada por Ronsoni (2024). Desta forma, os instantes da janela são

classificados quanto à condição: fio novo (5 min.), fio usado (15 min.) e fio desgastado (50 min.).

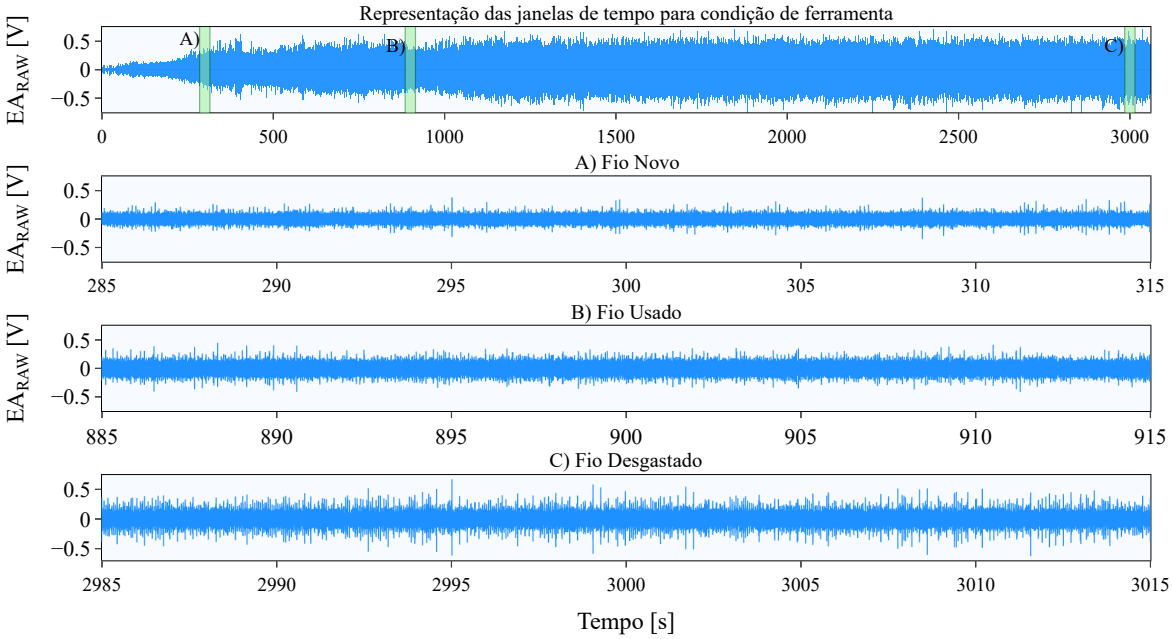


Figura 58 – Sinal bruto de longa duração.

Fonte: Autor, 2024.

Para a melhor caracterização das condições, sinais isolados ou instantâneos $\mathrm{EA_{RAW}}$ das condições de ferramenta determinadas pelos instantes de tempo foram obtidos, como mostrado na Fig. 59, em que o eixo do tempo está relacionada à duração da janela. Para estes sinais foram utilizados $f_s = 200$ kHz.

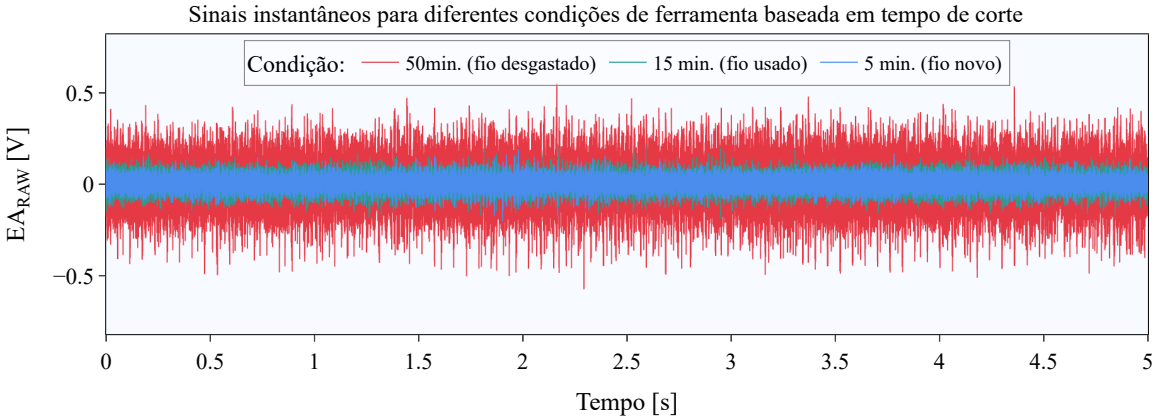


Figura 59 – Comparação de sinais brutos de diferentes condições de ferramenta.

Fonte: Autor, 2024.

Embora a condição de fio usado implicar em uma ligeira diferença de um fio novo com relação ao sinal EA, a condição de ferramenta desgastada se distingue pela magnitude, alta variância e grande quantidade de energia contida no sinal em relação aos demais. Além

disso, a partir dos sinais brutos, pode-se realizar uma análise dos espectros, como ilustrado na Fig. 60, mostrando a banda de frequência mais relevante para extração de informações.

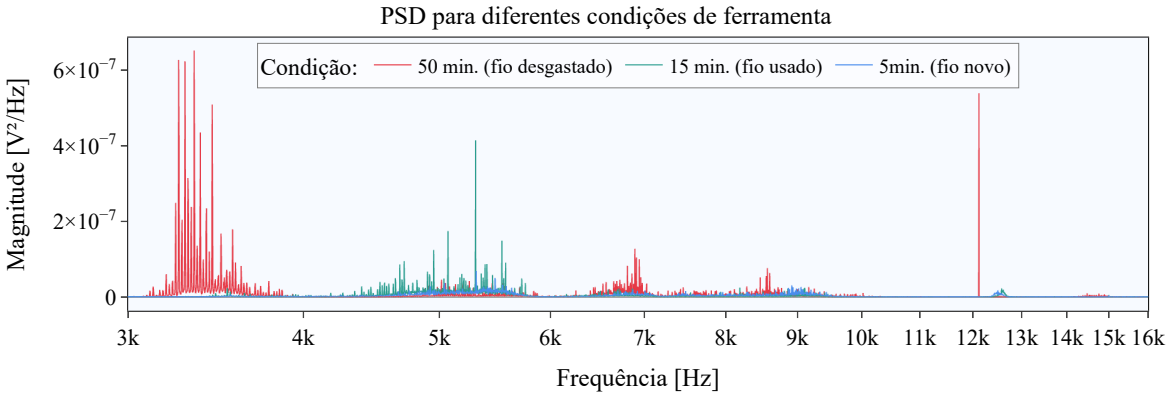


Figura 60 – Espectro de potência para diferentes condições de ferramenta.

Fonte: Autor, 2024.

Componentes de frequência do espectro de potência se mostram deslocados e amplificados nas diferentes condições. Mais uma vez se evidencia a diferença de intensidade espectral entre as diferentes condições da ferramenta, em que a ferramenta desgastada exibe maiores magnitudes, principalmente na faixa 3-4 kHz. Observa-se, de modo geral, um comportamento de deslocamento das componentes espectrais das altas para as baixas frequências conforme a evolução do desgaste.

Expandindo a análise para o plano tempo-frequência, coeficientes DWT são extraídos das três condições, sendo visualizados na Fig. 61 e Fig. 62. Além disso, parâmetros estatísticos descritivos de potência de cada coeficiente são apresentados da mesma forma na Tab. 13.

Tabela 13 – Potência (V^2) de coeficientes de decomposição de 6^a ordem de *wavelet* db6 para condição de ferramenta.

Condição de ferramenta	$a_6(\cdot 10^{-3})$	$d_6(\cdot 10^{-1})$	$d_5(\cdot 10^{-1})$	$d_4(\cdot 10^{-4})$	$d_3(\cdot 10^{-5})$	$d_2(\cdot 10^{-6})$	$d_1(\cdot 10^{-6})$
Novo	0,393	0,151	0,055	4,725	1,641	3,641	2,442
Usado	0,580	0,184	0,085	4,581	1,333	1,047	1,095
Desgastado	3,214	1,736	1,253	9,347	2,315	1,829	1,121

Fonte: Autor, 2024.

A partir dos resultados da decomposição, o coeficiente de aproximação e coeficientes de detalhe associados às baixas frequências têm sua magnitude aumentada conforme a progressão do desgaste. Além disso, percebe-se o fenômeno de deslocamento das frequências mais altas para mais baixas para condições de ferramenta mais desgastada conforme resultados de d_2 e d_1. Esses coeficientes, relacionados às faixas de frequência mais alta, seguem uma tendência de redução de magnitude, ao contrário dos demais.

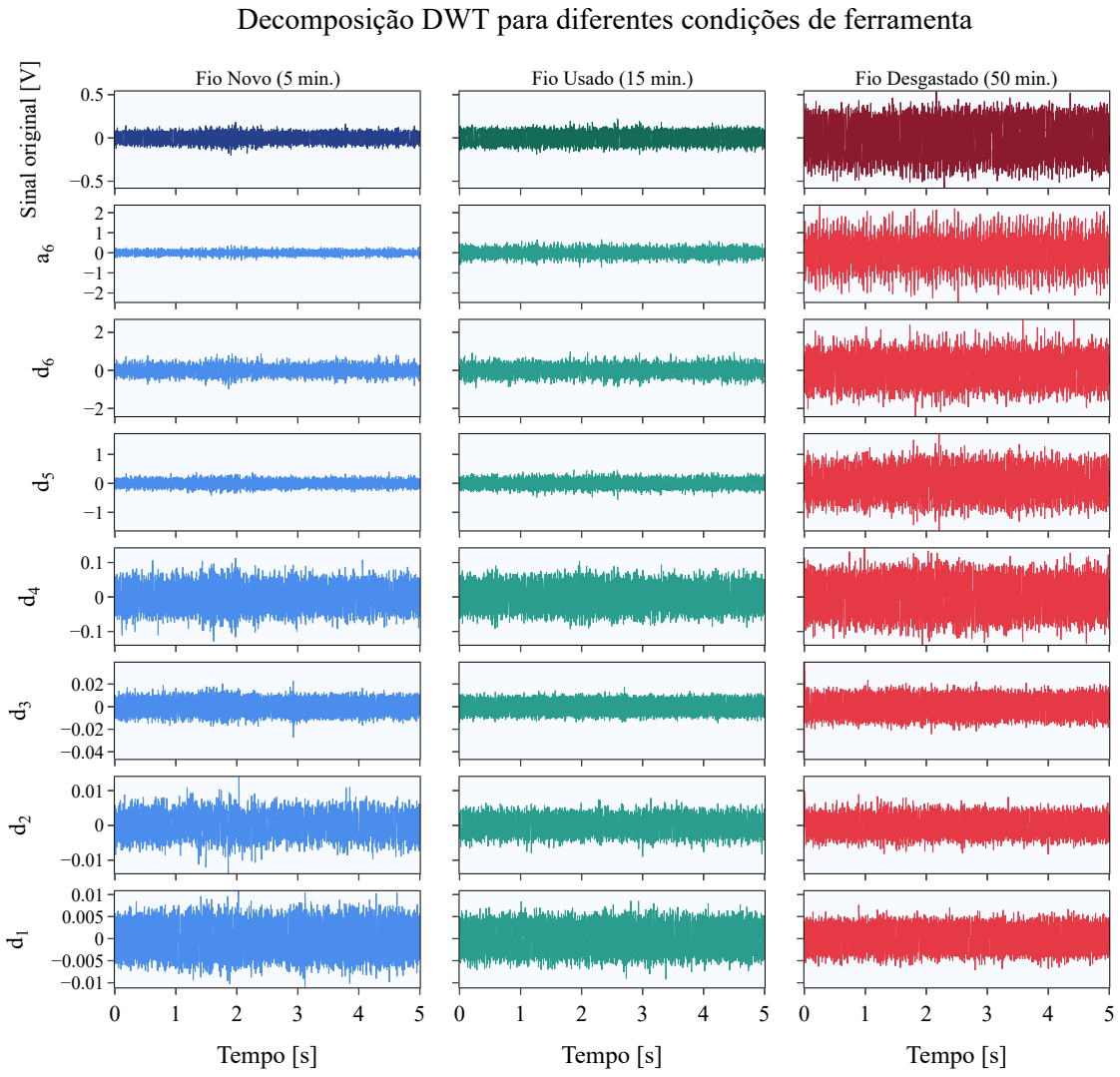


Figura 61 – Decomposição *wavelet* de 6^a ordem db6 para cada condição de ferramenta.

Fonte: Autor, 2024.

Da Fig. 62 observa-se uma evidente diferença entre os espectros tanto quanto em forma, magnitude e as próprias componentes de frequência envolvidas. De modo geral, as baixas frequências são mais predominantes para a condição desgastada. Da mesma forma, a avaliação da faixa de frequência mais alta se dá pela aplicação de filtros digitais no pós-processamento, apresentados em resultados do Apêndice E.

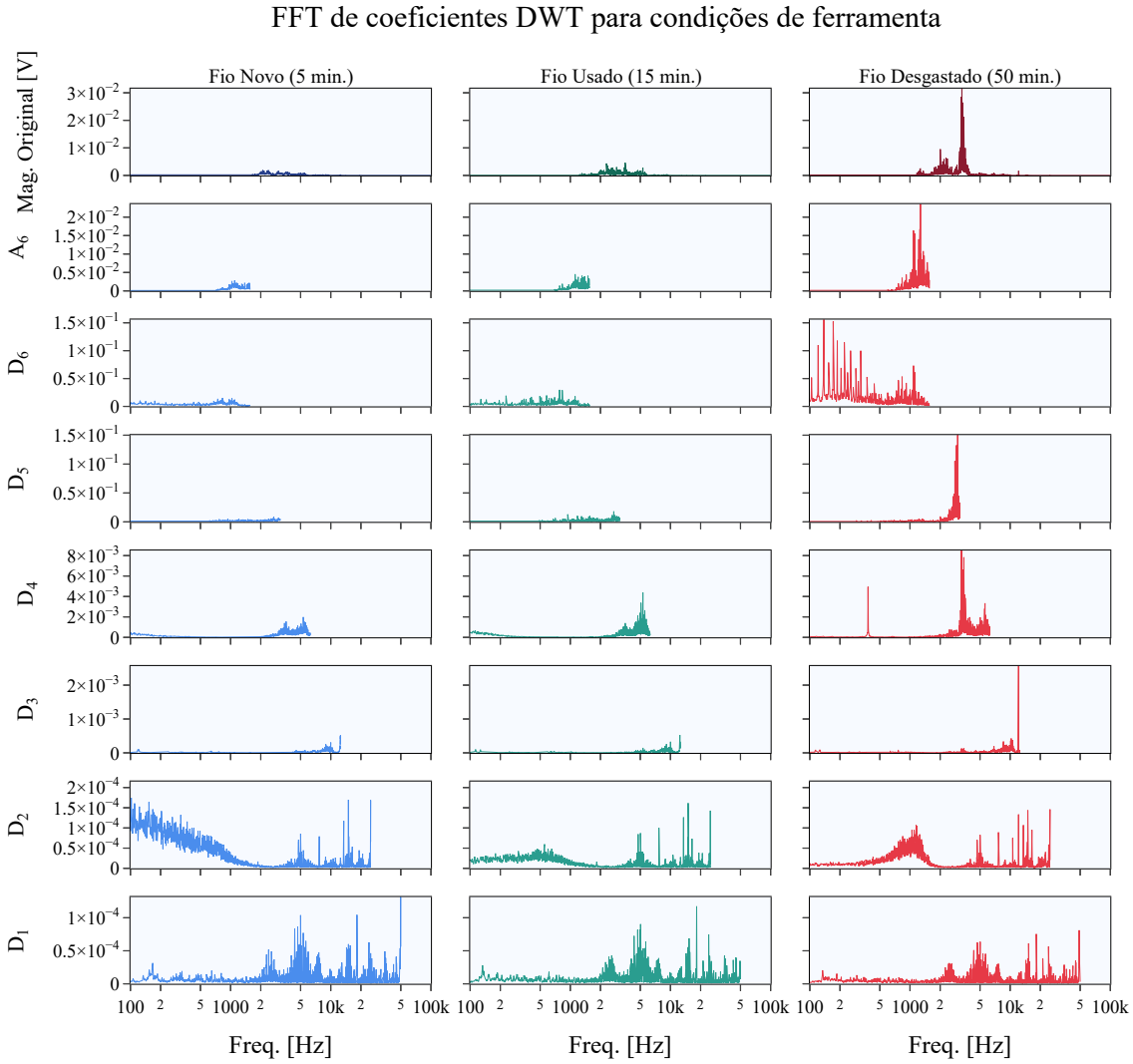


Figura 62 – Resposta em frequência de coeficientes DWT baseado na condição de ferramenta.

Fonte: Autor, 2024.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De maneira geral, o trabalho proposto permitiu a caracterização por métodos indiretos do processo de corte por fio diamantado contínuo a partir da técnica de EA. Uma diversidade de ferramentas e técnicas foram aplicadas em sinais $\mathrm{EA_{RAW}}$ e $\mathrm{EA_{RMS}}$ para extração de características sobre a dinâmica do processo e interação ferramenta-peça, que foram divididas em: 1) caracterização cinemática; 2) detecção de contato e transição; 3) acompanhamento de desgaste de ferramenta. Para cada abordagem, as análises referentes tanto ao domínio do tempo, frequência e plano tempo-frequência demonstraram-se eficientes para a extração de informações conforme as particularidades de cada fenômeno.

Além disso, o trabalho preenche a lacuna existente na área de usinagem por fio diamantado, cobrindo aspectos associados ao monitoramento e aquisição de sinais do processo de corte, até então inéditos. No contexto deste estudo pioneiro e exploratório foram determinadas faixas de frequências características do processo de remoção de material e posições ótimas para a fixação de sensores EA. Paralelo ao estudo do processo, a integração da linguagem de programação Python na aquisição de sinais e estruturação de uma base de dados forneceu uma abordagem sistemática para a análise e tratamento de dados.

Por fim, os principais resultados do trabalho podem ser sintetizados em:

a) Posicionamento de sensores EA mais próximos à região de corte são capturam sinais mais representativos do processo de corte. O sensor de base magnética (configuração S1/A) se mostrou mais adequado;

b) Considerando a faixa de frequência analisada (0-100 kHz), a banda 1-10 kHz revelou-se mais correspondente com o processo de corte, enquanto ruídos da máquina-ferramenta foram identificados predominantemente em uma faixa de 0-1 kHz;

c) Sinais EA em maiores velocidades de corte $\mathrm{v_s}$ contém maior nível de energia, o que se traduz em uma potência ou variância maior, enquanto a velocidade de avanço $\mathrm{v_f}$ demonstra pouca influência, apesar de variar;

d) Espectro de potência apresentou pouca variação para diferentes condições cinemáticas de corte em relação às componentes de frequência;

e) Extração de coeficientes *wavelet* mostrou-se eficiente para a extração da energia de diferentes bandas de frequência;

f) A detecção de contato e identificação da fase de transição foram facilitadas pela aquisição de sinais $\mathrm{EA_{RMS}}$ com maiores valores de constante de tempo de integração ΔT. A velocidade de avanço $\mathrm{v_f}$ teve influência na fase de transição, reduzindo o tempo de duração para maiores valores de $\mathrm{v_f}$;

g) A utilização de um limite dinâmico LD mostrou-se mais eficiente para a detecção de eventos de variações bruscas no sinal. Maiores janela de tempo $T_{\mathrm{R,w}}$ tornam-

se úteis para a detecção de contato, apresentando uma grande densidade de pontos $N_{>|\mathrm{DT}|}$;

h) A progressão do desgaste de ferramenta pode ser identificada em sinais $\mathrm{EA}_{\mathrm{RAW}}$ pelo aumento da variância ou potência do sinal e por uma deriva crescente em sinais $\mathrm{EA}_{\mathrm{RMS}}$;

i) Conforme a evolução do desgaste, observou-se um deslocamento de magnitude de componentes de frequências mais altas para as mais baixas, verificado pelos espectros e extração de coeficientes *wavelet*.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando o caráter exploratório do trabalho, o tema de monitoramento do processo de corte por fio diamantado pode ser mais bem aprofundado por meio dos seguintes objetos de estudo e tópicos:

a) Utilizar uma placa de aquisição com uma capacidade de frequência de amostragem f_s maior ($f_s \approx 2$ MHz) para caracterização do processo em uma faixa de frequência maior e mais apropriada para sensores EA;

b) Empregar um sensor EA do tipo fluídico com vazão de fluido de corte em regime laminar para caracterização do processo, minimizando a influência de ruídos da máquina-ferramenta;

c) Implementar acelerômetros triaxiais na máquina-ferramenta para avaliação do comportamento na frequência e separação de componentes de frequência da operação da máquina e do processo de corte propriamente dito;

d) Realizar ensaios de corte em amostras adaptadas para fixação de sensores EA na própria peça, maximizando a sensibilidade para detecção de eventos acústicos do processo;

e) Investigar o fenômeno de contato e deflexão da ferramenta, mensurando variáveis de tensão e deslocamento do fio a partir da combinação de métodos diretos e indiretos de monitoramento de condição;

f) Investigar a evolução do desgaste associando a redução da altura de protusão dos gumes abrasivos com os sinais EA detectados e realizando um acompanhamento por captura de imagem e microscopia;

g) Ampliar a base de dados para integração de dados obtidos com um sistema de monitoramento *on-line* do processo;

h) Simular sinais de EA baseado em interações grãos abrasivos-peça associados a sinais tipo *burst*, conforme modelos existentes de ferramenta e da cinemática do processo por fio diamantado;

i) Sincronizar uma câmera de alta velocidade com a aquisição de sinais EA para correlacionar o contato de grãos abrasivo, formação de cavaco e modo de remoção com o sinal.

REFERÊNCIAS

AMARAL, Agnes Bess Alcantara; MENDONCA, Antonio Luiz Zambelli Loyola Gonzaga; RESENDE, Andrea Araujo Martins; REGO, Erik Eduardo. Solar energy and distributed generation: 2015, a year of inflection in brazil? **IEEE Latin America Transactions**, IEEE, v. 14, n. 8, p. 3731–3737, 2016.

ANTWI, Elijah Kwabena; LIU, Kui; WANG, Hao. A review on ductile mode cutting of brittle materials. **Frontiers of Mechanical Engineering**, Springer, v. 13, p. 251–263, 2018.

BAGAVATHIAPPAN, Subramaniam; LAHIRI, Barid Baran; SARAVANAN, T; PHILIP, John; JAYAKUMAR, Tammana. Infrared thermography for condition monitoring–A review. **Infrared Physics & Technology**, Elsevier, v. 60, p. 35–55, 2013.

BARCELOS, M. C. S. **Projeto e desenvolvimento de uma fonte de soldagem com controle de corrente para união e tratamento térmico de fios diamantados**. 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BELLEN, Bruno van. **Modelagem e simulação do processo de corte por fio diamantado de silício cristalino**. 2024. Relatório PIBIC – Universidade Federal de Santa Catarina.

BERNREUTER. **Polysilicon Price Trend**. [*S.l.*: *s.n.*], 2024. Accessed: 2024-07-08. Disponível em: https://www.bernreuter.com/polysilicon/price-trend.

BI, Guo; LIU, Shan; SU, Shibo; WANG, Zhongxue. Diamond grinding wheel condition monitoring based on acoustic emission signals. **Sensors**, MDPI, v. 21, n. 4, p. 1054, 2021.

BIFANO, TG; YI, Y. Acoustic emission as an indicator of material-removal regime in glass micro-machining. **Precision engineering**, Elsevier, v. 14, n. 4, p. 219–228, 1992.

BIFANO, Thomas G; DOW, Thomas A; SCATTERGOOD, Ronald O. Ductile-regime grinding: A new technology for machining brittle materials. **Journal of Engineering for Industry**, American Society of Mechanical Engineers, v. 113, n. 2, p. 184–189, 1991.

BLACKLEY, WS; SCATTERGOOD, Ronald O. Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials. **Precision engineering**, Elsevier, v. 13, n. 2, p. 95–103, 1991.

BOARON, A. **Desenvolvimento e validação de um método dinâmico, baseado em emissão acústica, para a caracterização em processo de rebolos convencionais**. 2015. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BOARON, A. **Determinação do posicionamento relativo entre rebolo e peça com o auxílio de emissão acústica**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BURRUS, C Sidney; GOPINATH, Ramesh A; GUO, Haitao. Wavelets and wavelet transforms. **rice university, houston edition**, v. 98, 1998.

CAMPOS, Vicente Falconi. **TQC-Controle da Qualidade Total no estilo japonês**. [*S.l.*]: Falconi Editora, 2014.

CARAGUAY, S. **Influência da concentração de grãos abrasivos de óxido de alumínio microcristalinos sobre o desgaste de rebolos**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CHENG, Can; LI, Jianyong; LIU, Yueming; NIE, Meng; WANG, Wenxi. An online belt wear monitoring method for abrasive belt grinding under varying grinding parameters. **Journal of Manufacturing Processes**, Elsevier, v. 50, p. 80–89, 2020.

CÓRDULA, Pedro. **Modelagem numérica e investigação experimental da usinagem de silício policristalino com fio diamantado eletrodepositado**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

COSTA, Erick Cardoso. **Corte de silício monocristalino com fio diamantado contínuo**. 2019. Dissertação (Mestrado) – UFSC, Florianópolis.

COSTA, Erick Cardoso; BELLEN, Bruno van; WERNER, Marcos Odivan; SOUSA, Pedro Córdula de; XAVIER, Fabio Antonio. Optimizing the diamond wire sawing of polycrystalline silicon: An experimental approach. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 185, p. 108938, 2025. ISSN 1369-8001.

COSTA, Erick Cardoso; XAVIER, Fabio Antonio; KNOBLAUCH, Ricardo; BINDER, Cristiano; WEINGAERTNER, Walter Lindolfo. Effect of cutting parameters on surface integrity of monocrystalline silicon sawn with an endless diamond wire saw. **Solar Energy**, Elsevier, v. 207, p. 640–650, 2020.

DOMNICH, Vladislav; GOGOTSI, Yury. Phase transformations in silicon under contact loading. **Reviews on Advanced Materials Science(Russia)**, v. 3, n. 1, p. 1–36, 2002.

DORNFELD, D. Application of acoustic emission techniques in manufacturing. **Ndt & E International**, Elsevier, v. 25, n. 6, p. 259–269, 1992.

DORNFELD, D.; CAI, He Gao. An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission. **Journal of Engineering for Industry**, v. 106, n. 1, p. 28–33, fev. 1984. ISSN 0022-0817. eprint: https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article-pdf/106/1/28/6505513/28_1.pdf.

DORNFELD, DA; KANNATEY-ASIBU, E. Acoustic emission during orthogonal metal cutting. **International Journal of Mechanical Sciences**, Elsevier, v. 22, n. 5, p. 285–296, 1980.

DORNFELD, David; LEE, Dae-Eun. **Sensors for precision manufacturing**. [*S.l.*]: Springer, 2008.

EPE. **Balanço Energético Nacional**. [*S.l.*: *s.n.*], 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_EN.pdf.

EWINS, David J. **Modal testing: theory, practice and application**. [*S.l.*]: John Wiley & Sons, 2009.

FU, Ran; JAMES, Ted L; WOODHOUSE, Michael. Economic measurements of polysilicon for the photovoltaic industry: market competition and manufacturing competitiveness. **IEEE Journal of Photovoltaics**, IEEE, v. 5, n. 2, p. 515–524, 2015.

GUIMARÃES, Marco Paulo *et al.* **Aplicação de técnicas de diagnóstico de movimento e de vibrações em um torno de ultraprecisão**. [*S.l.*]: Florianópolis, SC, 2004.

HARRIS, Charles R. *et al.* Array programming with NumPy. **Nature**, Springer Science e Business Media LLC, v. 585, n. 7825, p. 357–362, set. 2020.

HASSUI, Amauri; DINIZ, Anselmo Eduardo; OLIVEIRA, João Fernando Gomes de; FELIPE, J; GOMES, João Jorge de Faria. Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission. **Wear**, Elsevier, v. 217, n. 1, p. 7–14, 1998.

HELLIER, Charles. **Handbook of Nondestructive Evaluation**. 2nd. New York: McGraw-Hill, 2013.

HUANG, Norden E; SHEN, Zheng; LONG, Steven R; WU, Manli C; SHIH, Hsing H; ZHENG, Quanan; YEN, Nai-Chyuan; TUNG, Chi Chao; LIU, Henry H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences**, The Royal Society, v. 454, n. 1971, p. 903–995, 1998.

IDA, Nathan; MEYENDORF, Norbert. **Handbook of advanced nondestructive evaluation**. [*S.l.*]: Springer International Publishing Cham, Switzerland, 2019. v. 10.

INASAKI, Ichiro. Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes. **Ultrasonics**, Elsevier, v. 36, n. 1-5, p. 273–281, 1998.

KARDEC, Allan; NASCIF, Júlio. **Manutenção-função estratégica**. [*S.l.*]: Qualitymark Editora Ltda, 2009.

KING, RF; TABOR, David. The strength properties and frictional behaviour of brittle solids. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, The Royal Society London, v. 223, n. 1153, p. 225–238, 1954.

KISTLER INSTRUMENT CORPORATION. **Acoustic emission sensor: Type 8152C**. [*S.l.*], 2007.

KLOCKE, Fritz; KUCHLE, Aaron. **Manufacturing processes**. [*S.l.*]: Springer, 2009. v. 2.

KNOBLAUCH, R. **Continuous sawing of monocrystalline silicon with welded diamond wires**. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

KNOBLAUCH, Ricardo; BOING, Denis; WEINGAERTNER, Walter Lindolfo; WEGENER, Konrad; KUSTER, Fredy; XAVIER, Fabio Antonio. Investigation of the

progressive wear of individual diamond grains in wire used to cut monocrystalline silicon. **Wear**, Elsevier, v. 414, p. 50–58, 2018.

KNOBLAUCH, Ricardo; SILVEIRA, Claudio Abilio da;
CAMPOS, João Eduardo Souza de; WEINGAERTNER, Walter Lindolfo;
XAVIER, Fabio Antonio; WEGENER, Konrad. Test rig for welding diamond wires into a loop. *In*: PROC. Fifth Intl. Conf. Adv. Civil Struct. Mech. Eng.-CSM. [*S.l.*: *s.n.*], 2017. P. 37–41.

KNOBLAUCH, Ricardo *et al.* **Endless diamond wire saw for monocrystalline silicon cutting**. [*S.l.*]: Universitätsbibliothek Ilmenau, 2017.

KONIG, W. AE in Grinding and Dressing-Accuracy and Process Reliability. **SME Technical Paper**, mr90–526, 1990.

KÖNIG, W; ALTINTAS, Y; MEMIS, F. Direct adaptive control of plunge grinding process using acoustic emission (AE) sensor. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Elsevier, v. 35, n. 10, p. 1445–1457, 1995.

KÖNIG, Wilfried. **Fertigungsverfahren 2: Schleifen, Honen, Läppen**. [*S.l.*]: Springer-Verlag, 2006.

KUMAR, Arkadeep; MELKOTE, Shreyes N. Diamond wire sawing of solar silicon wafers: a sustainable manufacturing alternative to loose abrasive slurry sawing. **Procedia Manufacturing**, Elsevier, v. 21, p. 549–566, 2018.

KUNTOĞLU, Mustafa *et al.* A review of indirect tool condition monitoring systems and decision-making methods in turning: Critical analysis and trends. **Sensors**, MDPI, v. 21, n. 1, p. 108, 2020.

KWAK, Jae-Seob; HA, Man-Kyung. Detection of dressing time using the grinding force signal based on the discrete wavelet decomposition. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 23, p. 87–92, 2004.

KWAK, Jin Il; NAM, Sun-Hwa; KIM, Lia; AN, Youn-Joo. Potential environmental risk of solar cells: Current knowledge and future challenges. **Journal of Hazardous Materials**, Elsevier, v. 392, p. 122297, 2020.

LAWN, Brian; WILSHAW, Rodney. Indentation fracture: principles and applications. **Journal of materials science**, Springer, v. 10, p. 1049–1081, 1975.

LEE, E Taewan; FAN, Zhaoyan; SENCER, Burak. Real-time grinding wheel condition monitoring using linear imaging sensor. **Procedia Manufacturing**, Elsevier, v. 49, p. 139–143, 2020.

LIANG, Steven Y; HECKER, Rogelio L; LANDERS, Robert G. Machining process monitoring and control: the state-of-the-art. **J. Manuf. Sci. Eng.**, v. 126, n. 2, p. 297–310, 2004.

LIANG, SY; DORNFELD, DA. Tool wear detection using time series analysis of acoustic emission, 1989.

LIAO, T Warren. Feature extraction and selection from acoustic emission signals with an application in grinding wheel condition monitoring. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, Elsevier, v. 23, n. 1, p. 74–84, 2010.

LIAO, T Warren; TING, Chi-Fen; QU, Jun; BLAU, Peter Julian. A wavelet-based methodology for grinding wheel condition monitoring. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Elsevier, v. 47, n. 3-4, p. 580–592, 2007.

LINKE, B. Dressing process model for vitrified bonded grinding wheels. **CIRP annals**, Elsevier, v. 57, n. 1, p. 345–348, 2008.

MAHATA, Supriyo; SHAKYA, Piyush; BABU, N Ramesh. A robust condition monitoring methodology for grinding wheel wear identification using Hilbert Huang transform. **Precision Engineering**, Elsevier, v. 70, p. 77–91, 2021.

MARINESCU, Ioan D; HITCHINER, Mike P; UHLMANN, Eckart; ROWE, W Brian; INASAKI, Ichiro. **Handbook of machining with grinding wheels**. [*S.l.*]: Crc Press, 2006.

MCKINNEY, Wes *et al.* Data structures for statistical computing in python. *In*: AUSTIN, TX. PROCEEDINGS of the 9th Python in Science Conference. [*S.l.*: *s.n.*], 2010. v. 445, p. 51–56.

MODESTO, F. A. **Usinagem a verde de cerâmica avançada**. 1997. F. 84. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

MOHANTY, Amiya Ranjan. **Machinery condition monitoring: Principles and practices**. [*S.l.*]: CRC Press, 2014.

MOKBEL, Amin A; MAKSOUD, TMA. Monitoring of the condition of diamond grinding wheels using acoustic emission technique. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 101, n. 1-3, p. 292–297, 2000.

NATIONAL INSTRUMENTS. **NI USB-621x User Manual**. [*S.l.*], 2012. Version 2009. Disponível em: https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usb-621x-oem-features/resource/372083c.pdf.

NEO, Wee Keong; KUMAR, A Senthil; RAHMAN, Mustafizur. A review on the current research trends in ductile regime machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 63, p. 465–480, 2012.

NOCETI FILHO, Sidnei. **Filtros seletores de sinais**. [*S.l.*]: Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

PACHECO, Rosalia; ORDÓÑEZ, Javier; MARTÍNEZ, Germán. Energy efficient design of building: A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 16, n. 6, p. 3559–3573, 2012.

PAN, CS; DORNFELD, DA. Modeling the diamond-turning process with acoustic emission for monitoring applications. **Proc. 14th NAMRC, SME**, p. 257–265, 1986.

PANDIYAN, Vigneashwara; TJAHJOWIDODO, Tegoeh. Use of Acoustic Emissions to detect change in contact mechanisms caused by tool wear in abrasive belt grinding process. **Wear**, Elsevier, v. 436, p. 203047, 2019.

RANDALL, Robert Bond. **Vibration-based condition monitoring: industrial, automotive and aerospace applications**. [*S.l.*]: John Wiley & Sons, 2021.

RAVINDRA, HV; SRINIVASA, YG; KRISHNAMURTHY, R. Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting. **Wear**, Elsevier, v. 212, n. 1, p. 78–84, 1997.

REGTIEN, Paul PL; DERTIEN, Edwin. **Sensors for mechatronics**. [*S.l.*]: Elsevier, 2018.

RINTA-RUNSALA, Esa. Drive System monitoring: Requirements and Suggestions. **VTT Case Study Report, Finland**, 2000.

RONSONI, Eduardo. **Análise da progressão de desgaste em fios diamantados através de visão computacional**. Florianópolis, 2024.

SENSIS IND. COM. EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS LTDA. **Manual de operação do sistema de monitoramento MSM**. São Carlos, 2002.

SHIN, Kihong; HAMMOND, Joseph. **Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers**. [*S.l.*]: John Wiley & Sons, 2008.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert *et al.* **Administração da produção**. [*S.l.*]: Atlas São Paulo, 2009. v. 2.

SMITH, Steven. **Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists**. [*S.l.*]: Newnes, 2003.

SOUZA, Ricardo Delgado de. **Development of a Diamond Wire Welding Device**. 2019. F. 148. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica.

SUBRAHMANYA, Niranjan; SHIN, Yung C. Automated sensor selection and fusion for monitoring and diagnostics of plunge grinding, 2008.

SUSIČ, Egon; GRABEC, Igor. Characterization of the grinding process by acoustic emission. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Elsevier, v. 40, n. 2, p. 225–238, 2000.

SWAIN, Michael V. Microfracture about scratches in brittle solids. **Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences**, The Royal Society London, v. 366, n. 1727, p. 575–597, 1979.

TEOMETE, Egemen. Investigation of long waviness induced by the wire saw process. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of**

Engineering Manufacture, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 225, n. 7, p. 1153–1162, 2011.

TETI, Roberto; JEMIELNIAK, Krzysztof; O'DONNELL, Garret; DORNFELD, David. Advanced monitoring of machining operations. **CIRP annals**, Elsevier, v. 59, n. 2, p. 717–739, 2010.

TÖNSHOFF, HK; FRIEMUTH, T; BECKER, Jc C. Process monitoring in grinding. **CIRP Annals**, Elsevier, v. 51, n. 2, p. 551–571, 2002.

VASILIEV, Mikhail; NUR-E.-ALAM, Mohammad; ALAMEH, Kamal. Recent developments in solar energy-harvesting technologies for building integration and distributed energy generation. **Energies**, MDPI, v. 12, n. 6, p. 1080, 2019.

WAKIRU, James M; PINTELON, Liliane; MUCHIRI, Peter N; CHEMWENO, Peter K. A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support. **Mechanical systems and signal processing**, Elsevier, v. 118, p. 108–132, 2019.

WALLBURG, Florian; KUNA, Meinhard; BUDNITZKI, Michael; SCHOENFELDER, Stephan. A material removal coefficient for diamond wire sawing of silicon. **Wear**, Elsevier, v. 504, p. 204400, 2022.

WEBSTER, J; DONG, WP; LINDSAY, R. Raw acoustic emission signal analysis of grinding process. **CIRP annals**, Elsevier, v. 45, n. 1, p. 335–340, 1996.

WEI, Songbin; KAO, Imin. Vibration analysis of wire and frequency response in the modern wiresaw manufacturing process. **Journal of Sound and vibration**, v. 231, n. 5, p. 1383–1395, 2000.

WICKRAMARACHI, Pierre. Effects of windowing on the spectral content of a signal. **Sound and vibration**, [Bay Village, Ohio, Acoustical Publications, inc.], v. 37, n. 1, p. 10–13, 2003.

WODITSCH, Peter; KOCH, Wolfgang. Solar grade silicon feedstock supply for PV industry. **Solar energy materials and solar cells**, Elsevier, v. 72, n. 1-4, p. 11–26, 2002.

WU, Hao. Wire sawing technology: A state-of-the-art review. **Precision engineering**, Elsevier, v. 43, p. 1–9, 2016.

YANG, Zhensheng; YU, Zhonghua. Grinding wheel wear monitoring based on wavelet analysis and support vector machine. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 62, p. 107–121, 2012.

YIN, Youkang; GAO, Yufei; WANG, Liyuan; ZHANG, Lei; PU, Tianzhao. Analysis of crack-free surface generation of photovoltaic polysilicon wafer cut by diamond wire saw. **Solar Energy**, Elsevier, v. 216, p. 245–258, 2021.

ZHANG, Naijun; LI, Honghao; GAO, Yufei. The state of the art of wire sawing-based hybrid cutting technology: a review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, p. 1–30, 2024.

ZHANG, Xiuqing; LI, Yanhong; ZHANG, Chao. Research progress on solar cell. **Mater China**, p. 436–441, 2014.

APÊNDICE A – RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE SENSORES

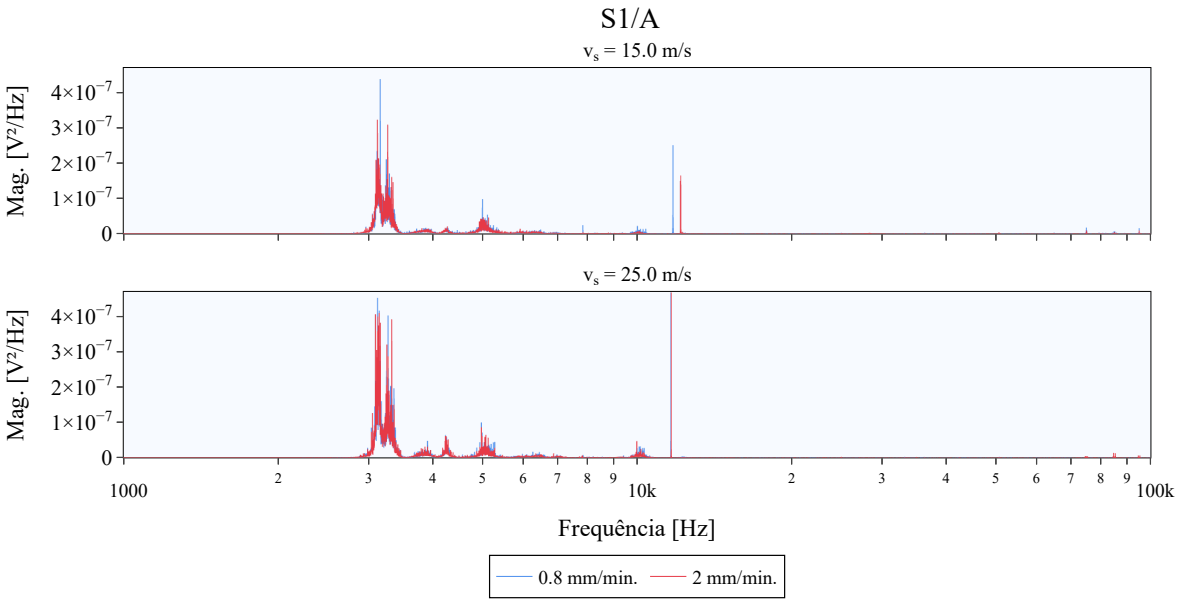


Figura 63 – Espectro de potência PSD de ensaios na configuração S1/A.

Fonte: Autor, 2024.

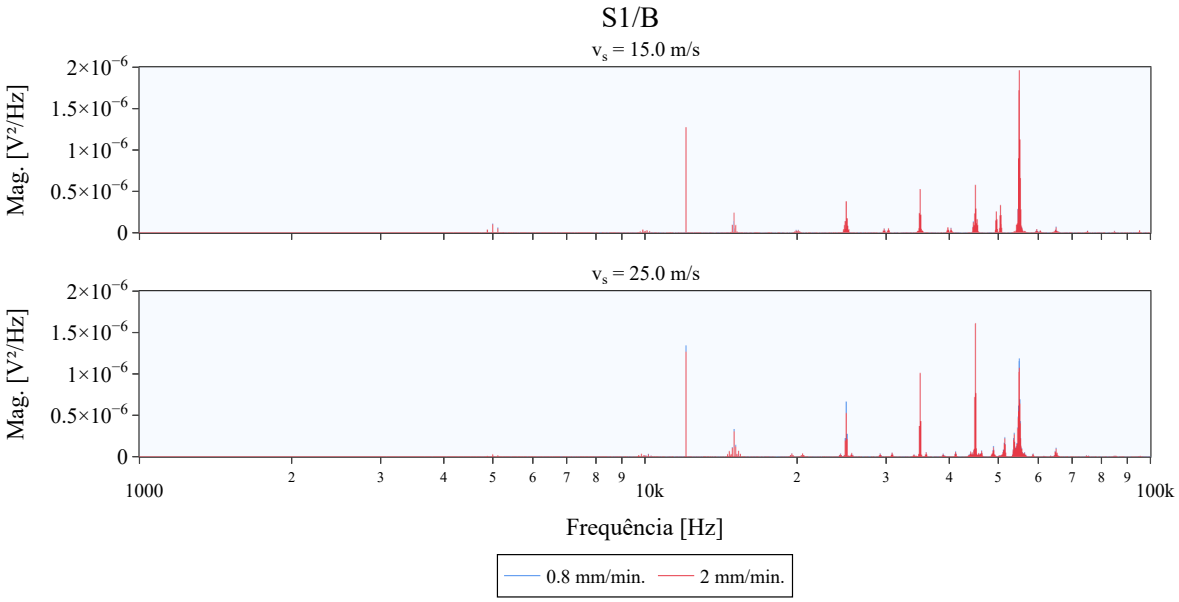


Figura 64 – Espectro de potência PSD de ensaios na configuração S1/B.

Fonte: Autor, 2024.

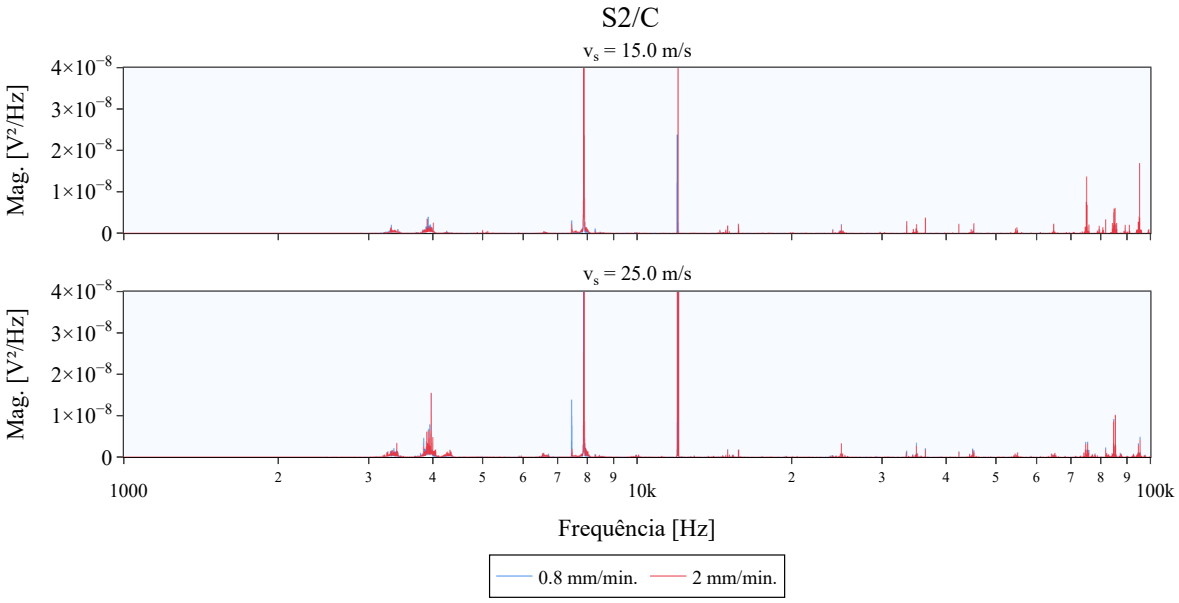


Figura 65 – Espectro de potência PSD de ensaios na configuração S2/C.

Fonte: Autor, 2024.

APÊNDICE B – APLICAÇÃO DE FILTROS DIGITAIS EM SINAIS BRUTOS

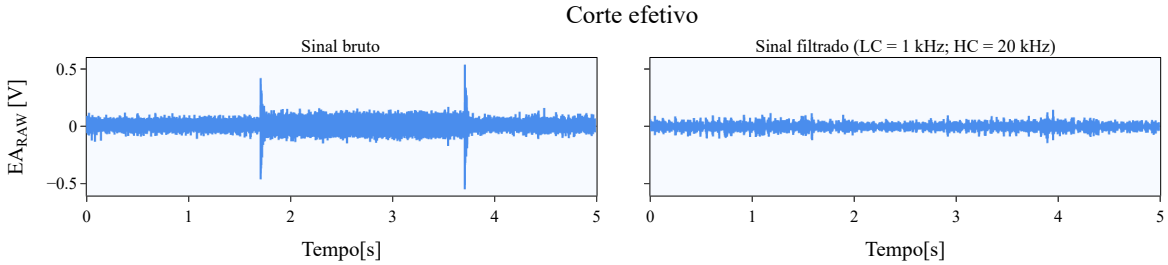


Figura 66 – Comparação de sinal bruto e filtrado na condição de corte efetivo no domínio do tempo.

Fonte: Autor, 2024.

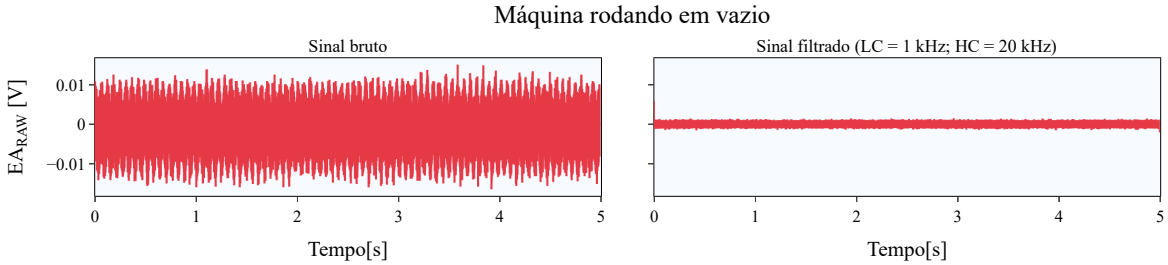


Figura 67 – Comparação de sinal bruto e filtrado na condição de máquina em vazio no domínio do tempo.

Fonte: Autor, 2024.

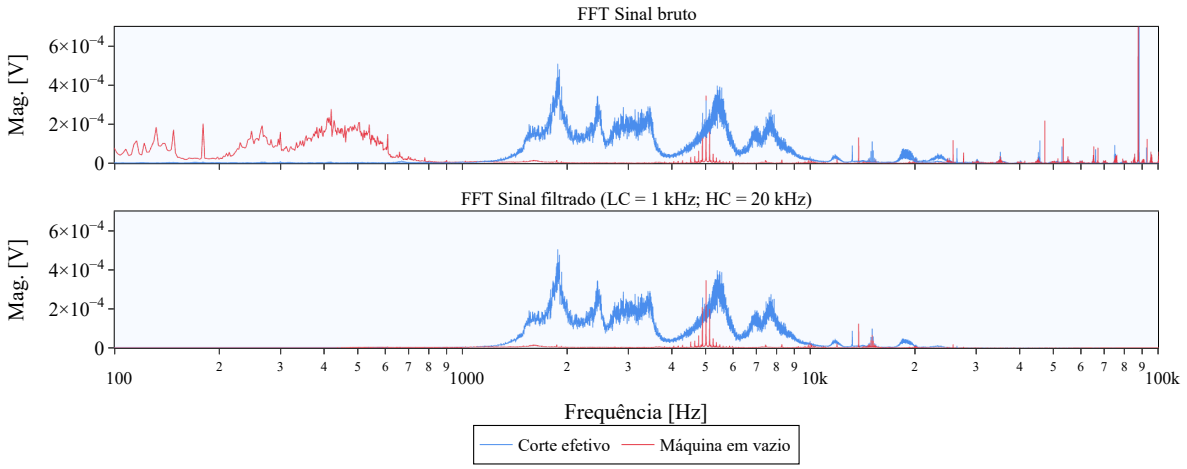


Figura 68 – Comparação de resposta em frequência de sinais brutos e filtrados para diferentes condições.

Fonte: Autor, 2024.

APÊNDICE C – DECOMPOSIÇÃO DO SINAL POR EXTRAÇÃO DE COEFICIENTES DWT NO TEMPO E NA FREQUÊNCIA

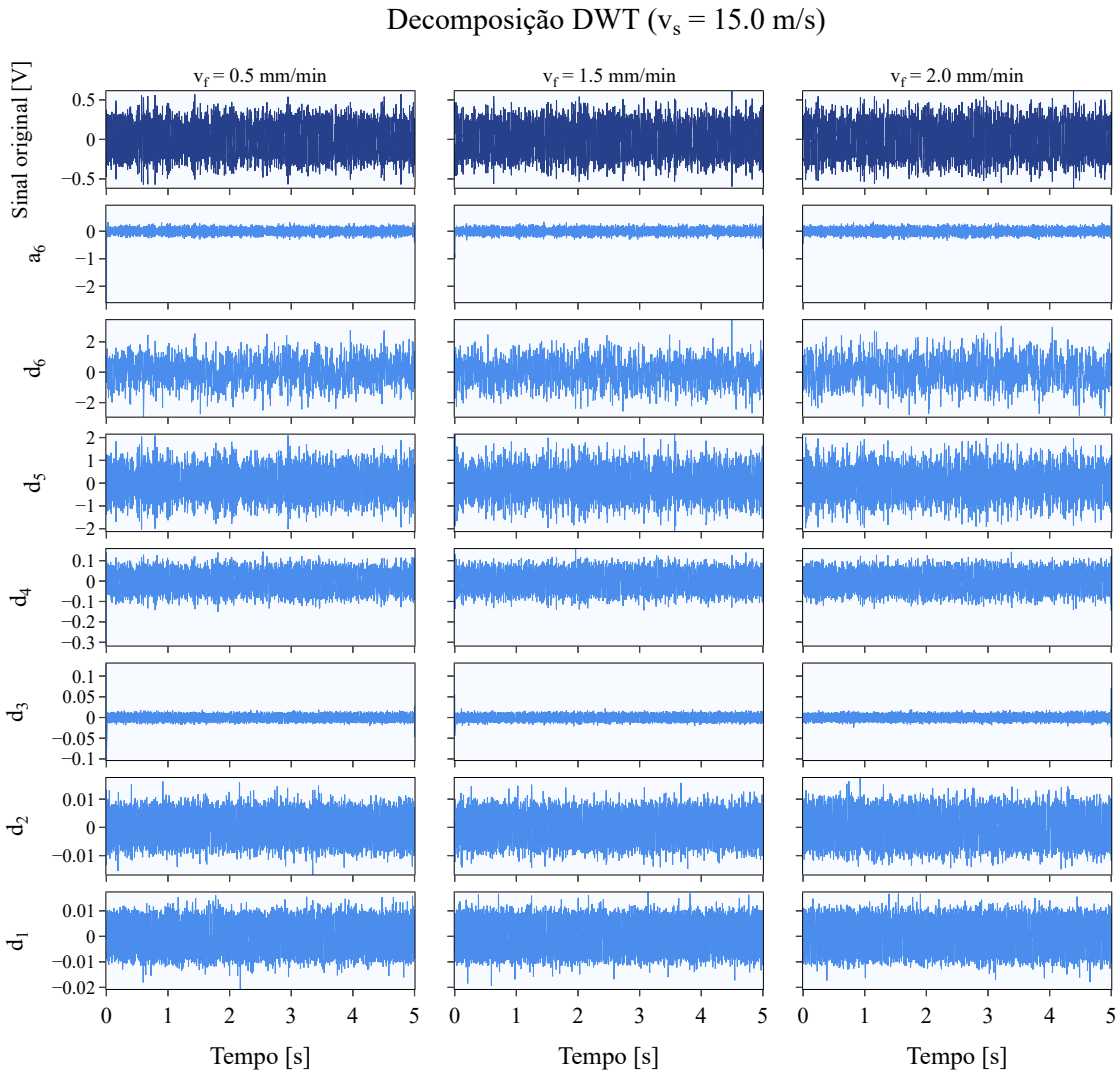


Figura 69 – Decomposição de 6^a ordem por DWT para $v_s = 15$ m/s e variando v_f.

Fonte: Autor, 2024.

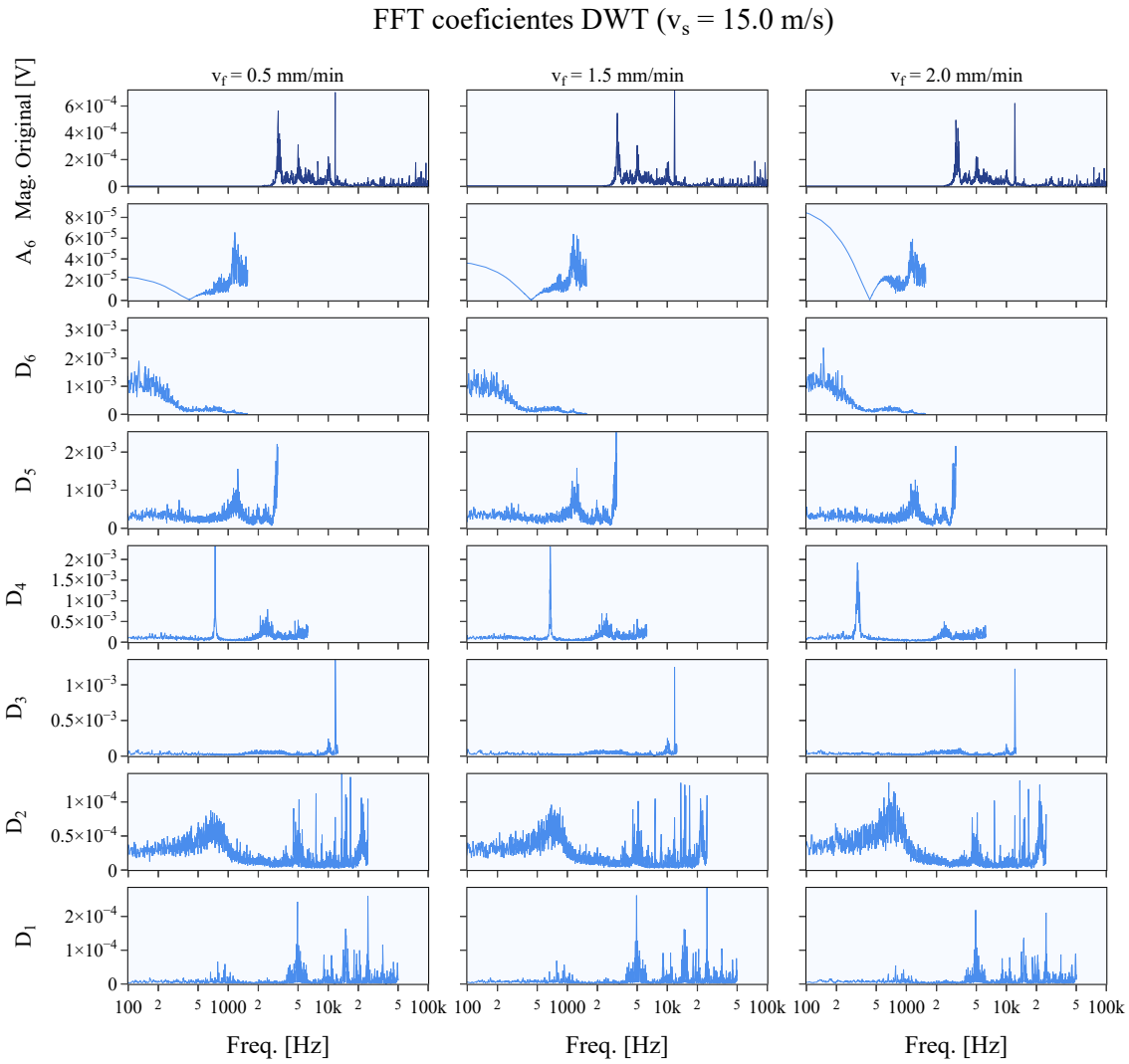


Figura 70 – Resposta em frequência de coeficientes DWT para v_s = 15 m/s e variando v_f.

Fonte: Autor, 2024.

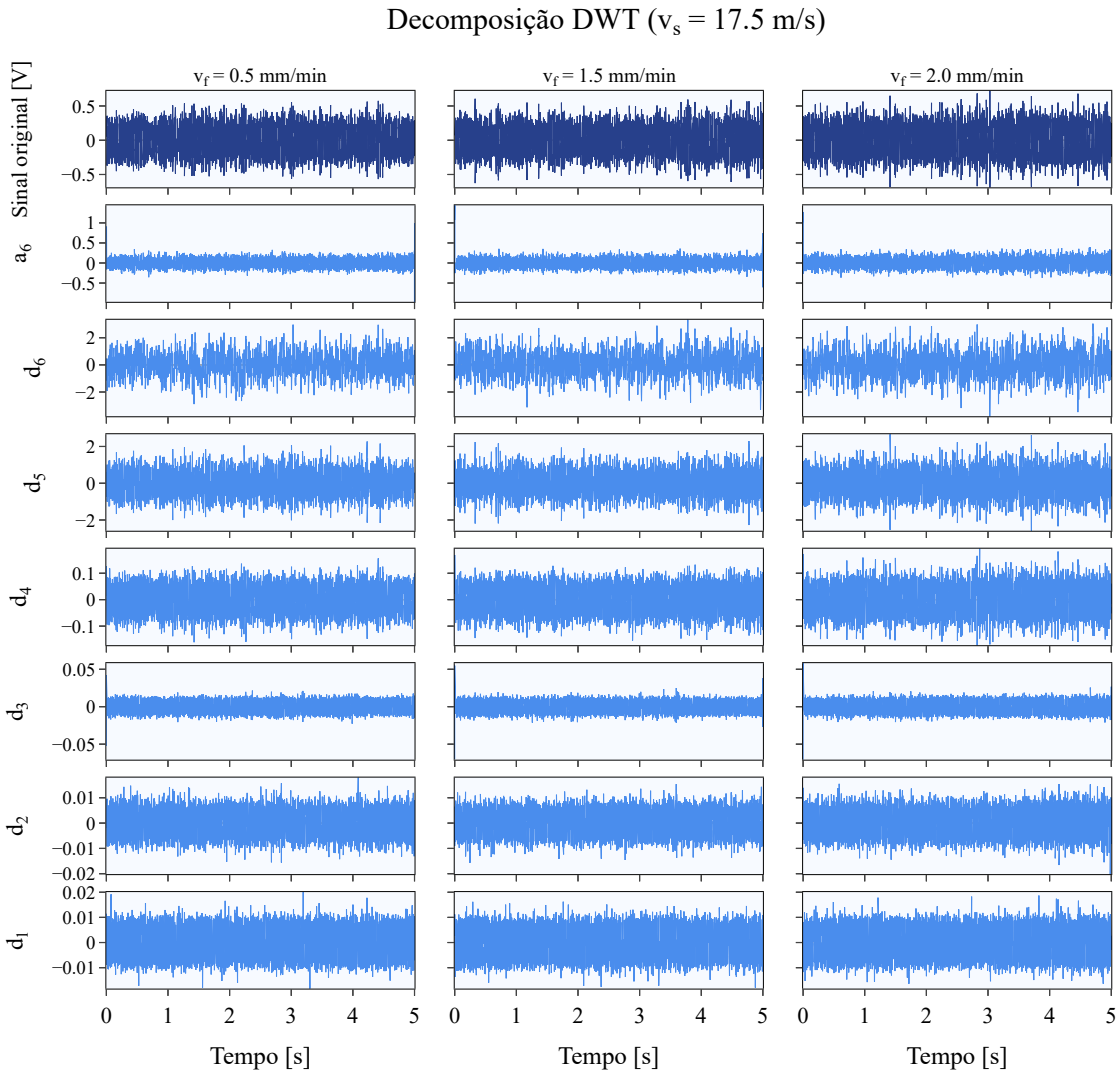


Figura 71 – Decomposição de 6^a ordem por DWT para v_s = 17,5 m/s e variando v_f.

Fonte: Autor, 2024.

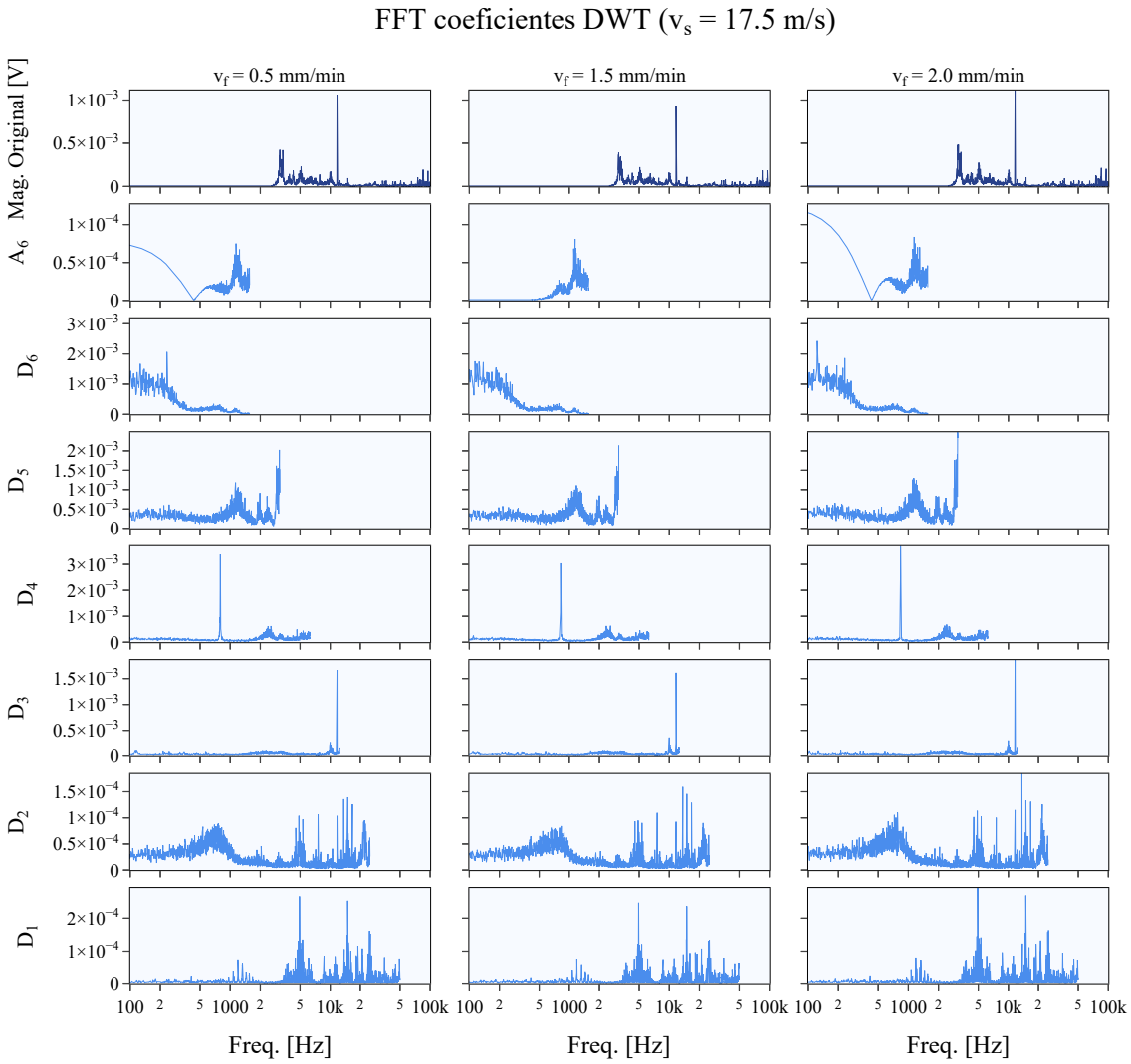


Figura 72 – Resposta em frequência de coeficientes DWT para v_s = 15 m/s e variando v_f.

Fonte: Autor, 2024.

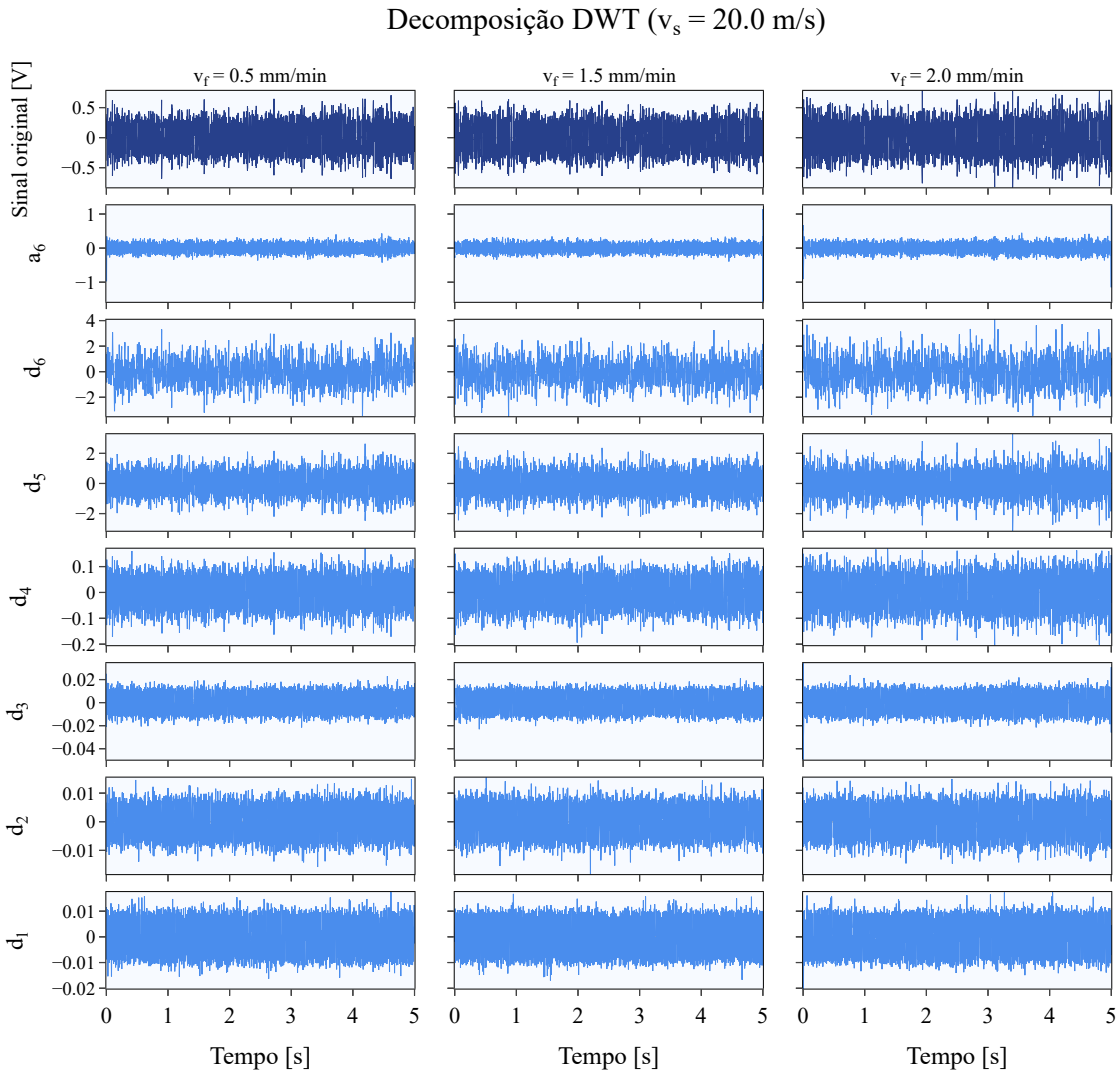


Figura 73 – Decomposição de 6^a ordem por DWT para v_s = 20 m/s e variando v_f.

Fonte: Autor, 2024.

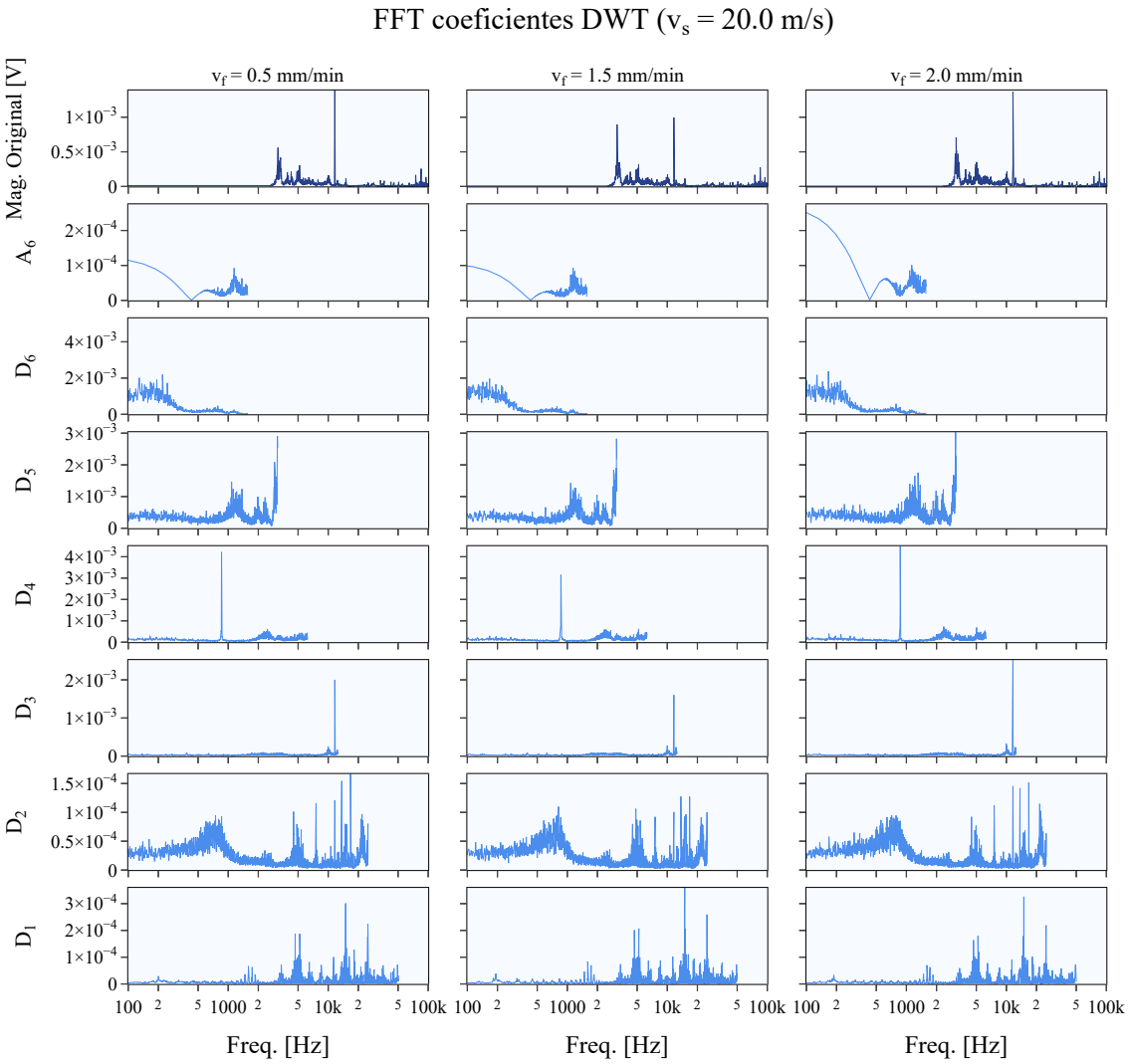


Figura 74 – Resposta em frequência de coeficientes DWT para v_s = 20 m/s e variando v_f.

Fonte: Autor, 2024.

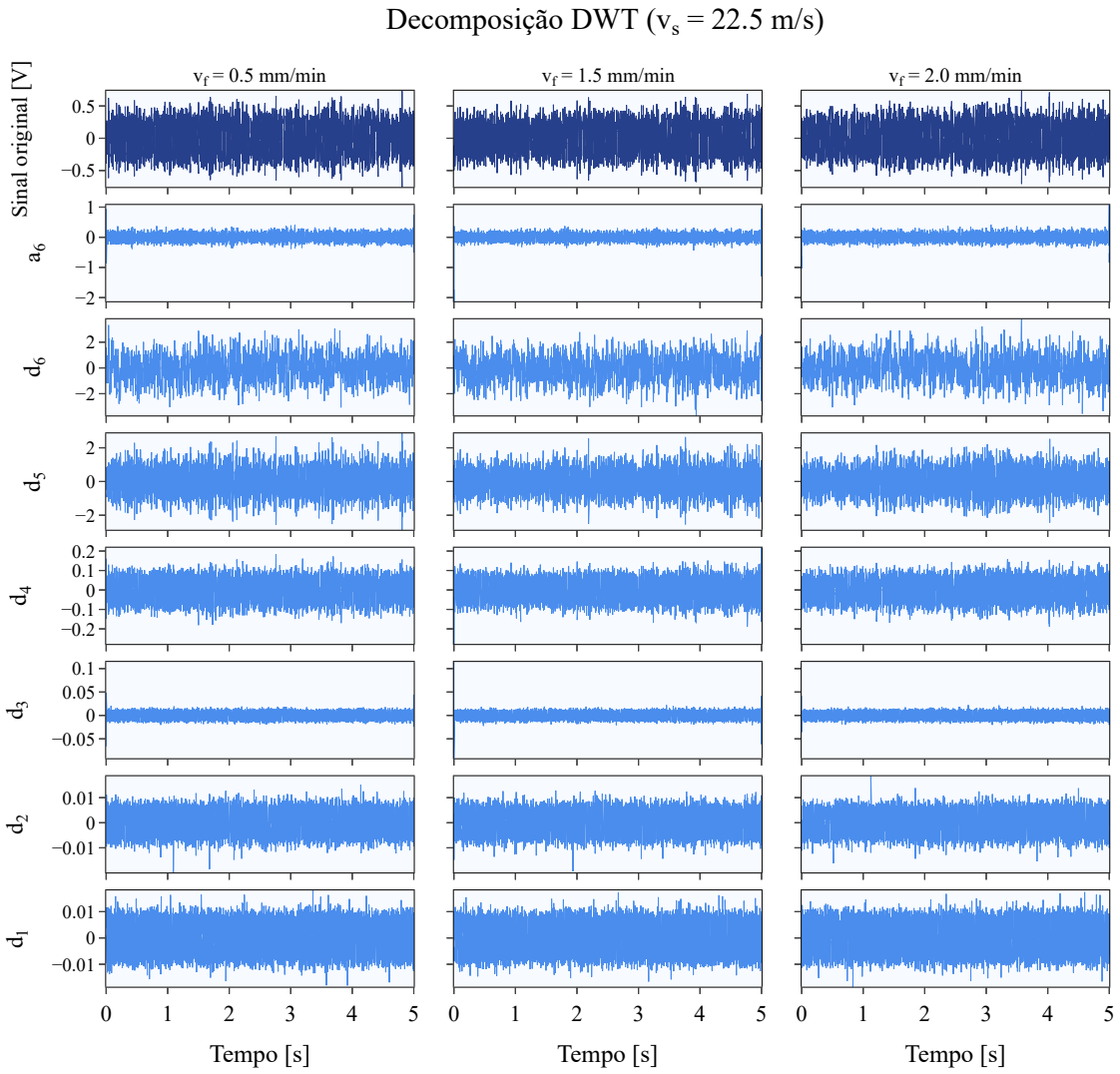


Figura 75 – Decomposição de 6^a ordem por DWT para v_s = 22,5 m/s e variando v_f.

Fonte: Autor, 2024.

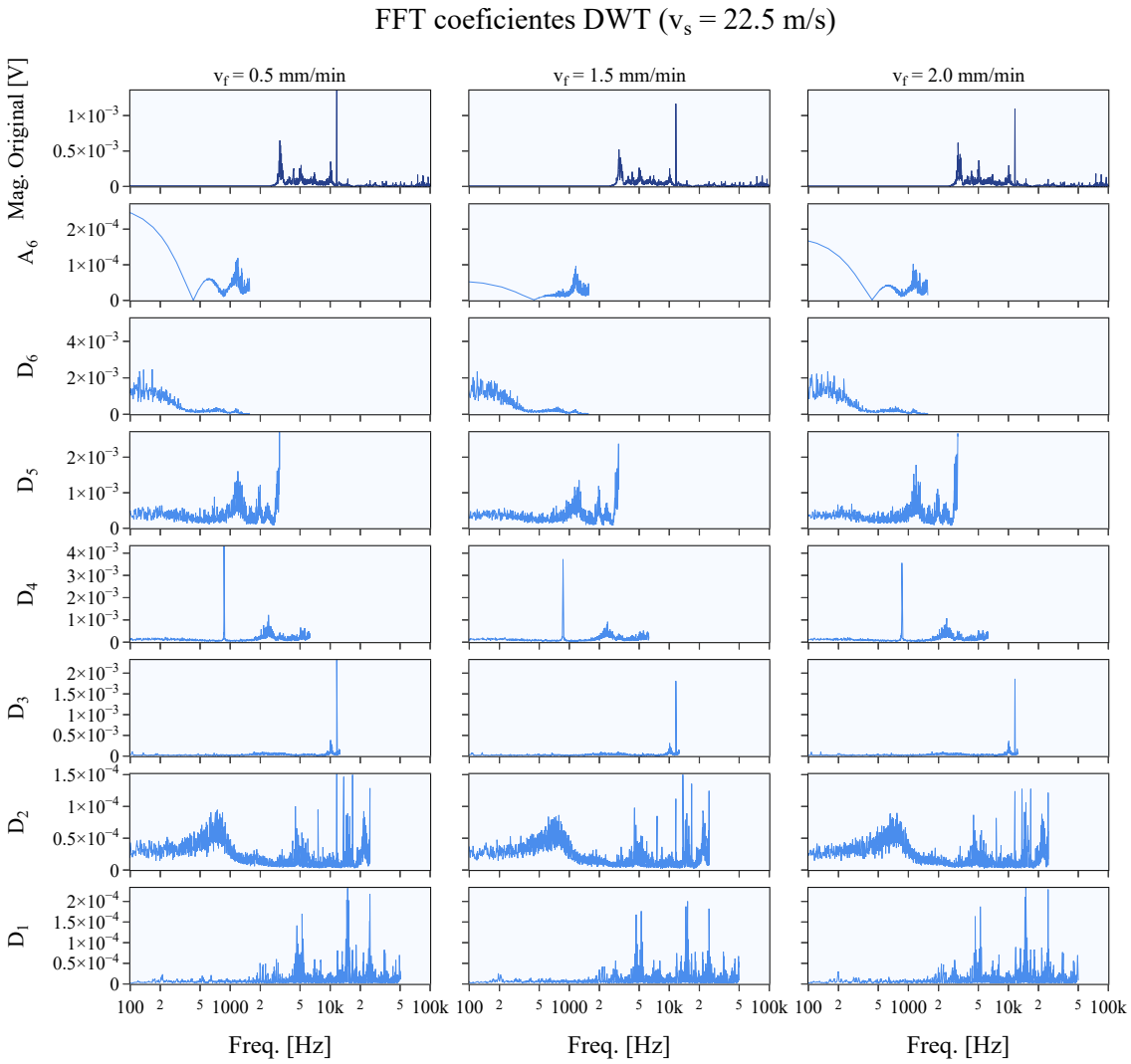


Figura 76 – Resposta em frequência de coeficientes DWT para v_s = 22,5 m/s e variando v_f.

Fonte: Autor, 2024.

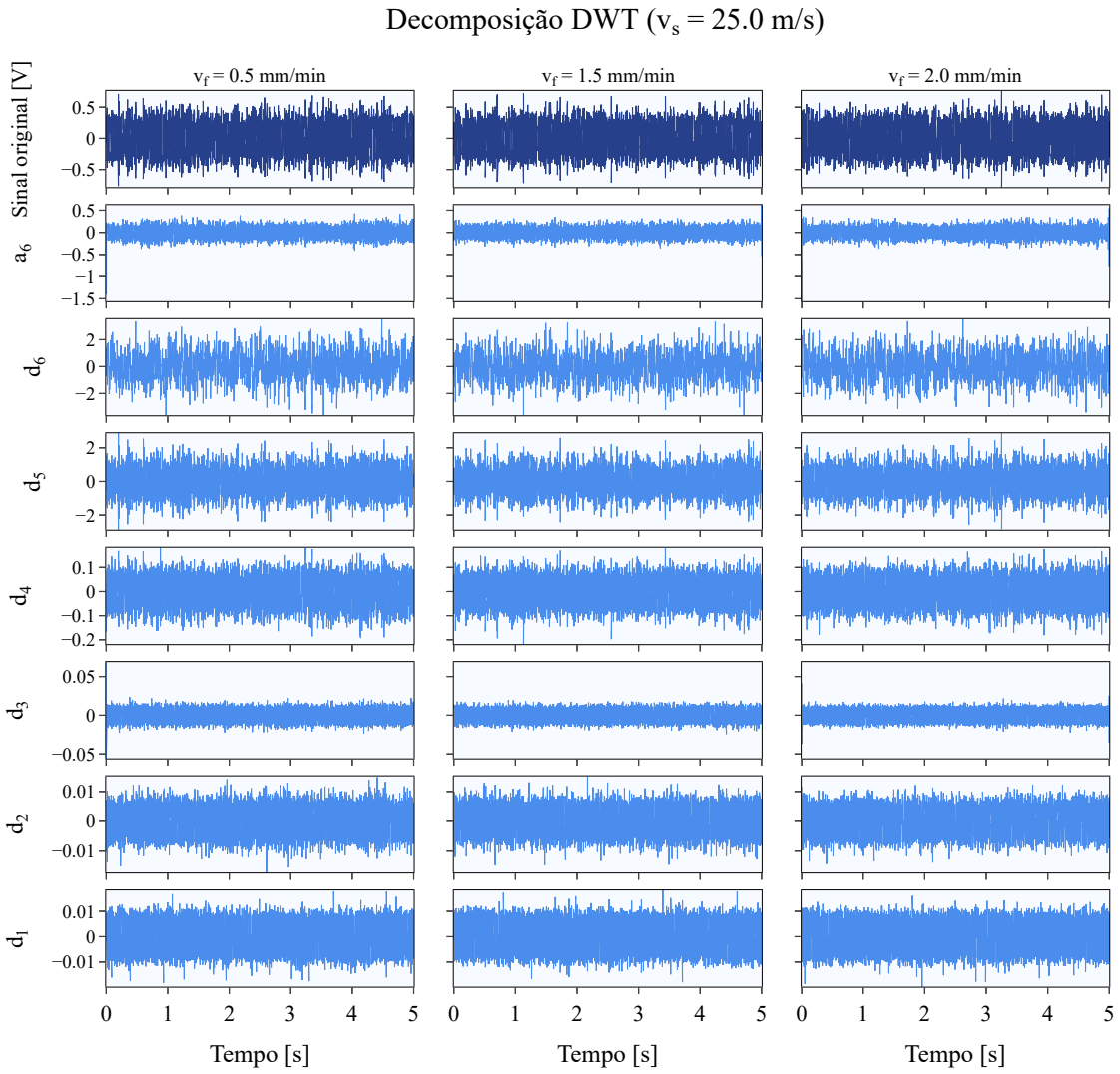


Figura 77 – Decomposição de 6^a ordem por DWT para $v_s = 25$ m/s e variando v_f.

Fonte: Autor, 2024.

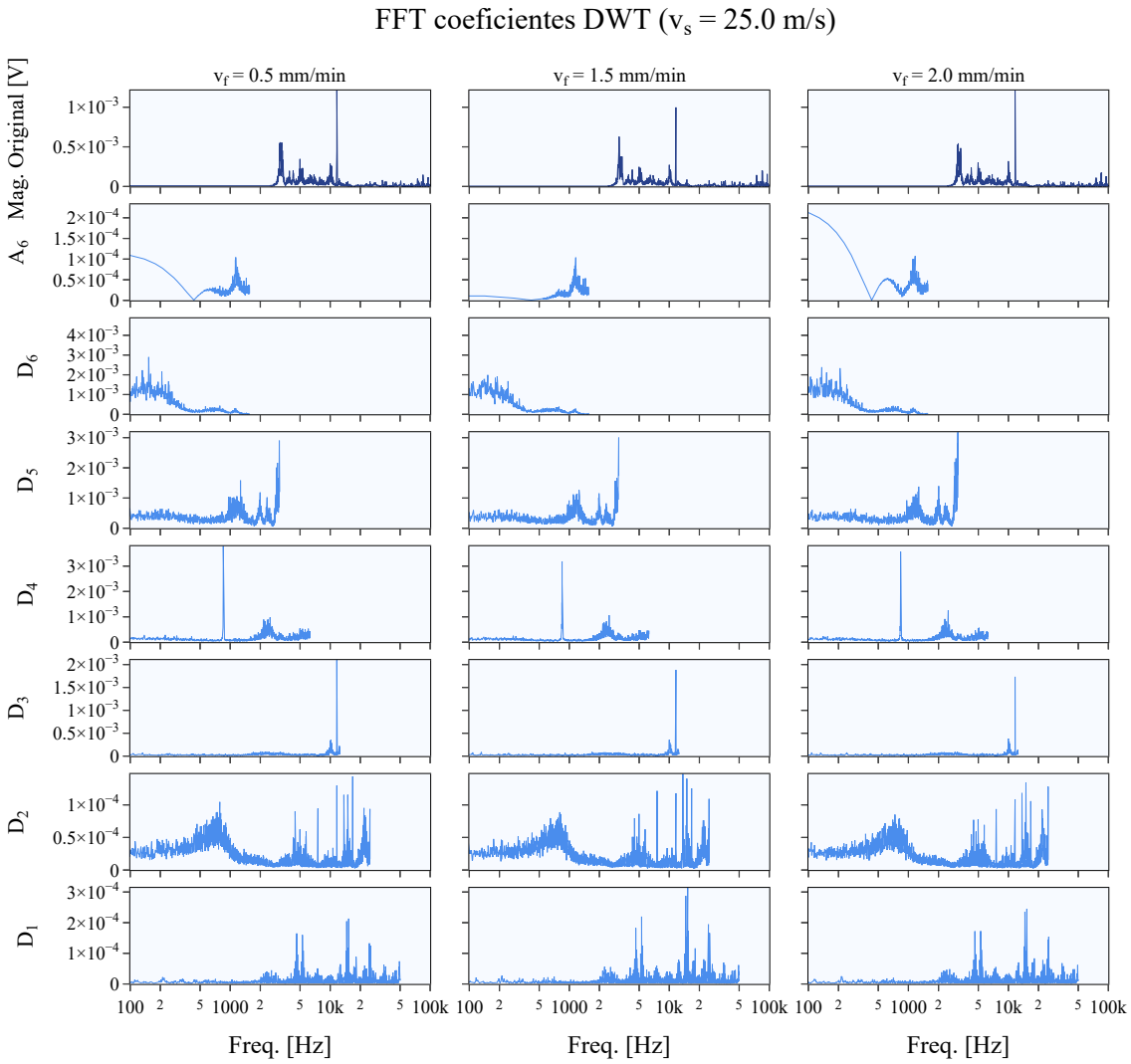


Figura 78 – Resposta em frequência de coeficientes DWT para v_s = 25 m/s e variando v_f.

Fonte: Autor, 2024.

APÊNDICE D – ANÁLISE DAS ALTAS FREQUÊNCIAS EM ESPECTROS DE POTÊNCIA DE DIFERENTES CONDIÇÕES CINEMÁTICAS POR MEIO DE FILTRO DIGITAL PASSA-ALTA

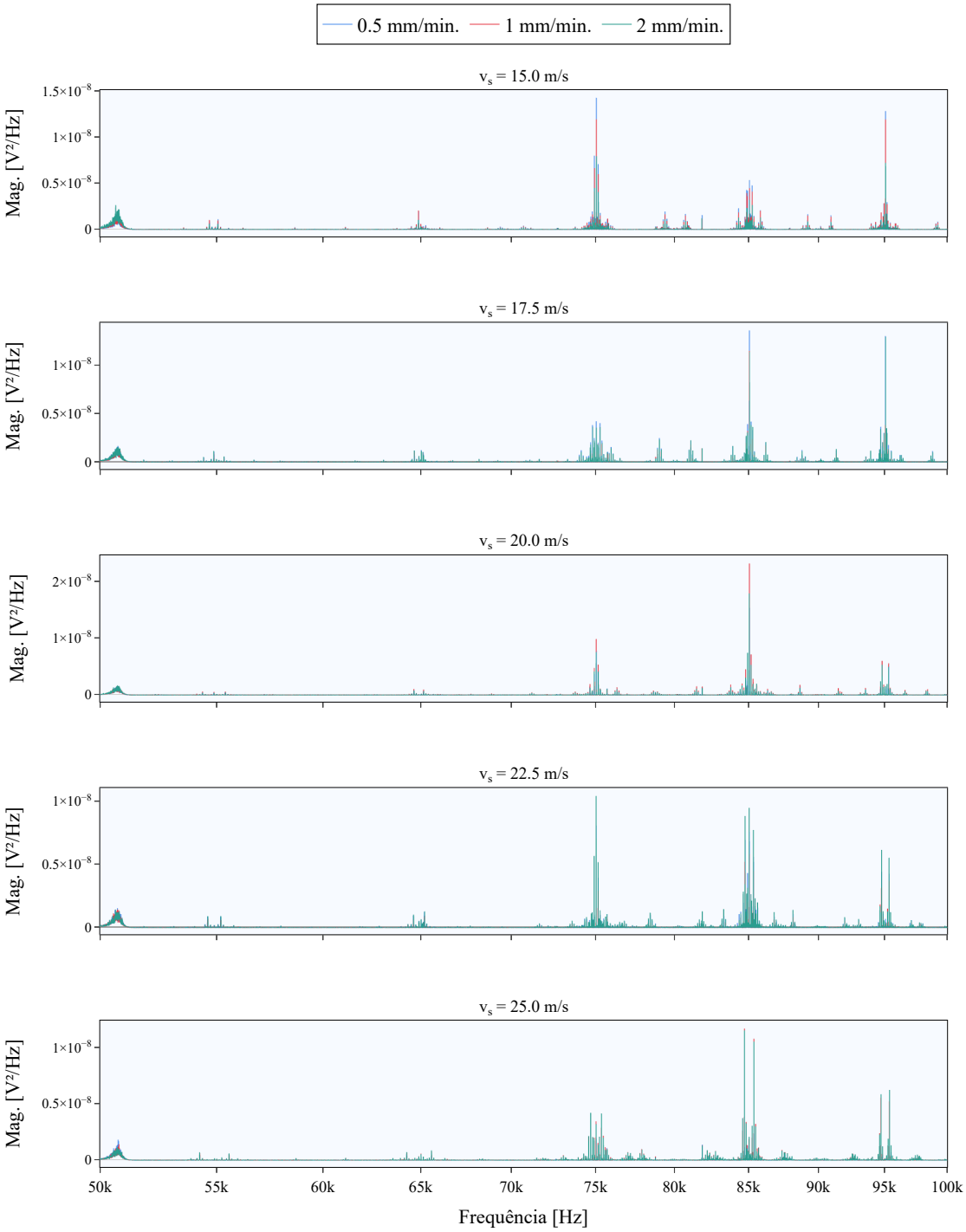


Figura 79 – Espectro de potência PSD para diferentes condições cinemáticas com filtro passa alta (LC = 50 kHz).

Fonte: Autor, 2024.

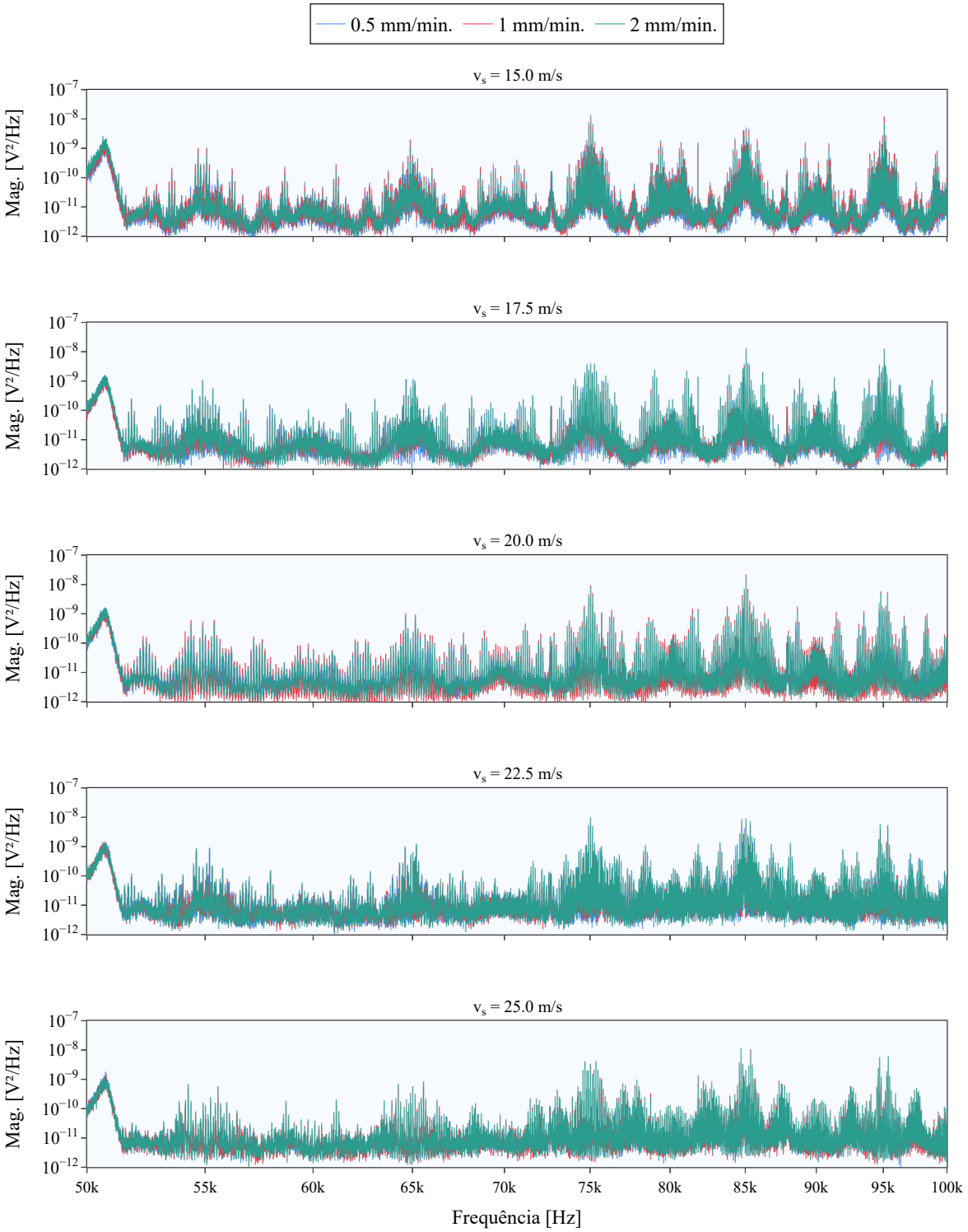


Figura 80 – Espectro de potência PSD para diferentes condições cinemáticas com filtro passa alta (LC = 50 kHz) (escala log-z).

Fonte: Autor, 2024.

APÊNDICE E – ANÁLISE DAS ALTAS FREQUÊNCIAS EM ESPECTROS DE POTÊNCIA DE DIFERENTES CONDIÇÕES DE FERRAMENTA COM FILTRO DIGITAL PASSA-ALTA

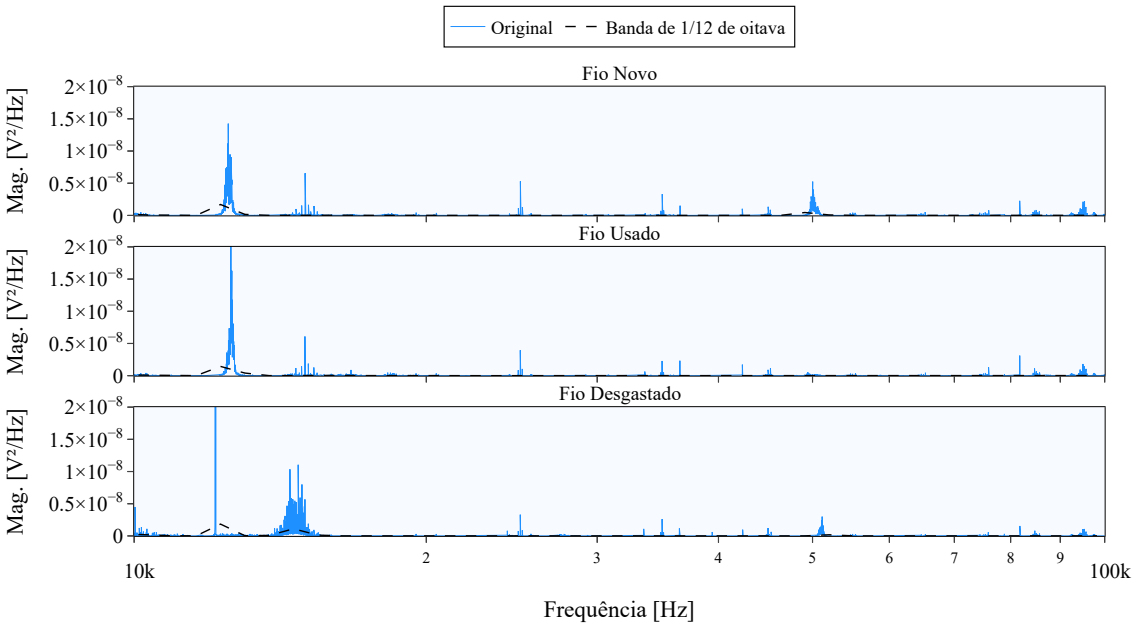


Figura 81 – Espectro de potência PSD para diferentes condições de ferramenta com filtro digital passa alta (LC = 10 kHz).

Fonte: Autor, 2024.

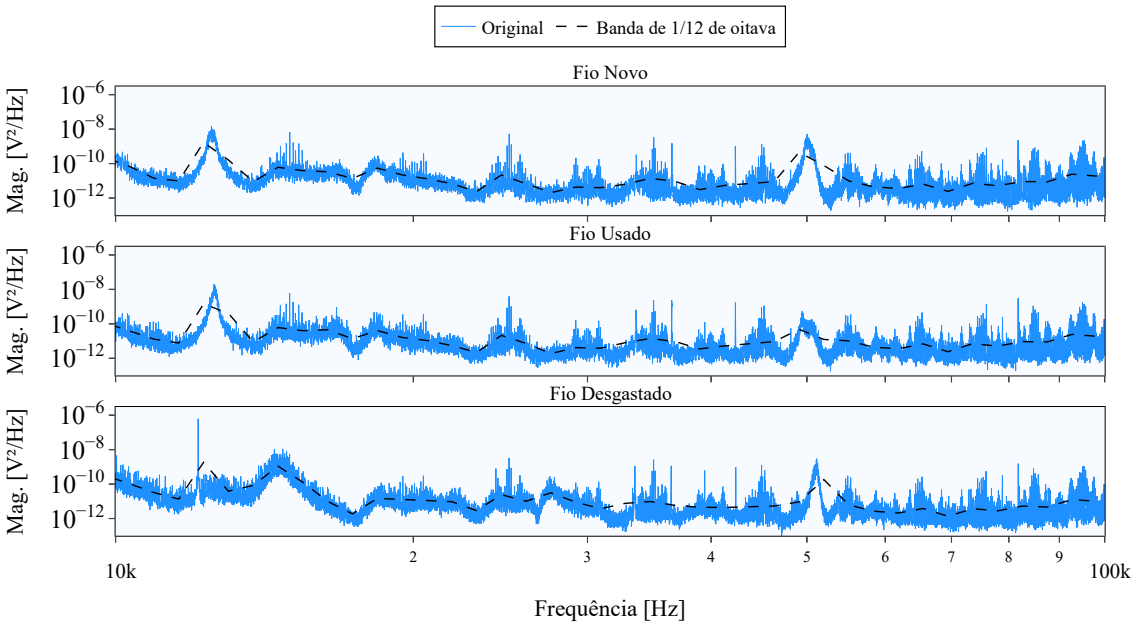


Figura 82 – Espectro de potência PSD para diferentes condições de ferramenta com filtro digital passa alta (LC = 10 kHz) (escala log-z).

Fonte: Autor, 2024.

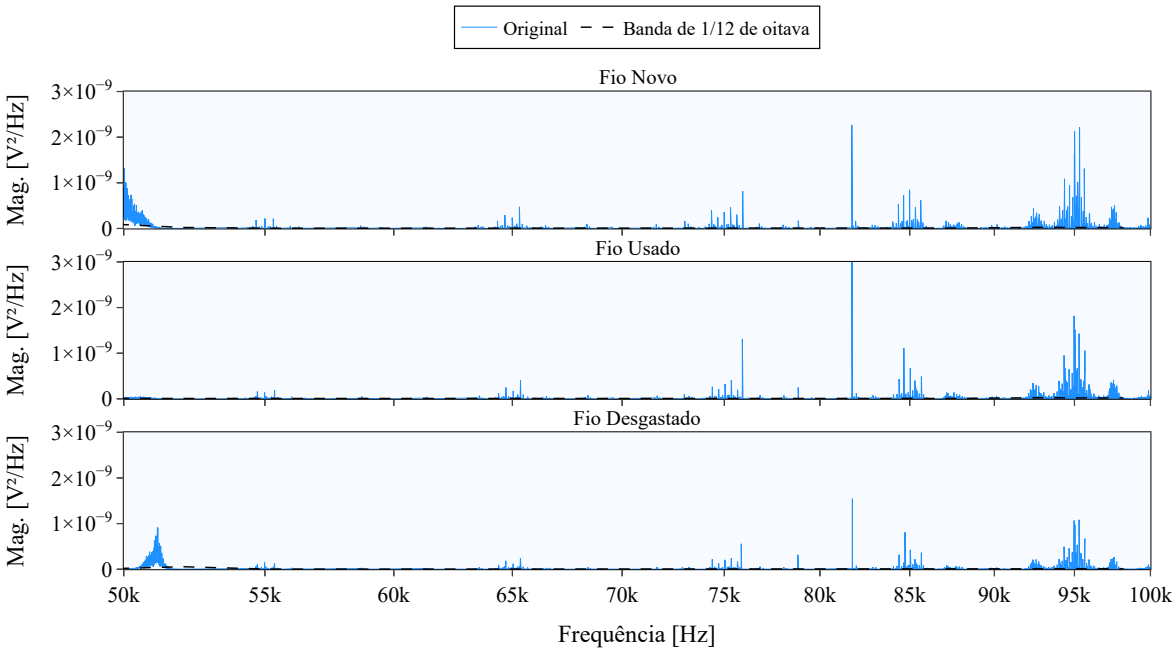


Figura 83 – Espectro de potência PSD para diferentes condições de ferramenta com filtro digital passa alta (LC = 50 kHz).

Fonte: Autor, 2024.

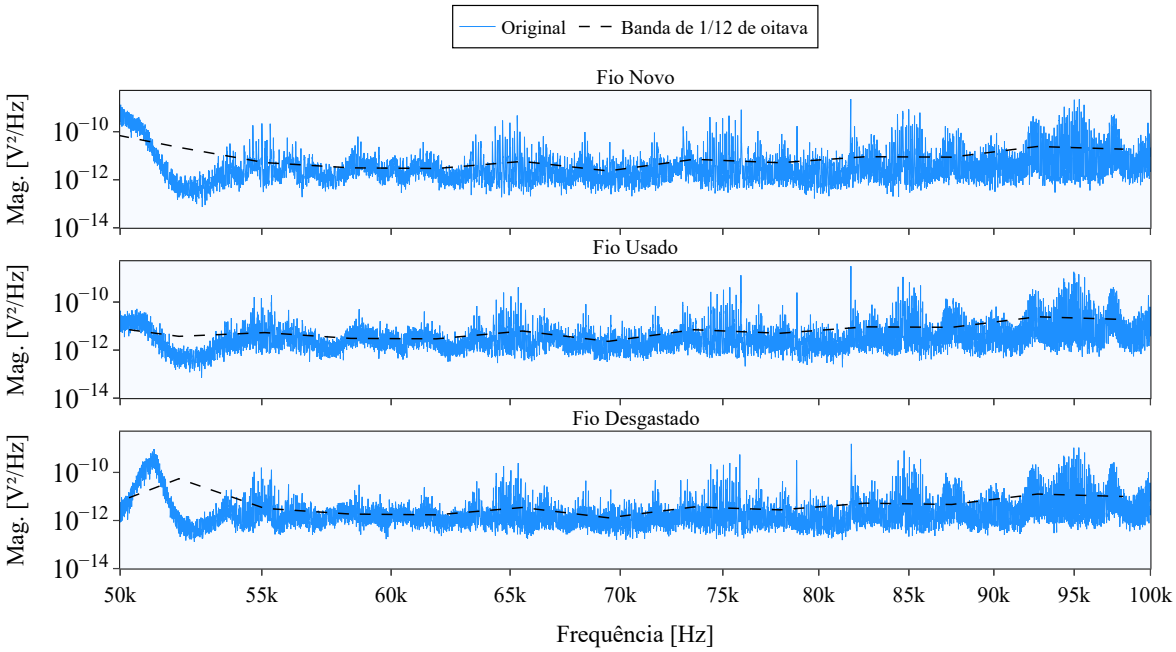


Figura 84 – Espectro de potência PSD para diferentes condições de ferramenta com filtro digital passa alta (LC = 50 kHz) (escala log-z).

Fonte: Autor, 2024.

ANEXO A – CÓDIGO PYTHON PARA AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS

```
import numpy as np
import scipy
import pandas as pd
import endaq
import time
import pickle
import nidaqmx
import nidaqmx.system
from nidaqmx.constants import AcquisitionType
from nidaqmx.constants import TerminalConfiguration
from nidaqmx.constants import READ_ALL_AVAILABLE
import os
import plotly.express as px
import plotly.graph_objects as po
import plotly.io as pio
endaq.plot.utilities.set_theme('endaq')


# Measurement configs setup and channel configuration
"""Define 'ch' variable according to NI-MAX
software designation and NI DAQ device"""

ch = 'AE01/ai6'


# Measurement general parameters
"""Insert cutting conditions applied
among general information"""

total_time = 40                  # Total measurement time [s]
timeout_time = total_time + 5    # Timeout time to not crash [s]
unit = 'V'                       # Unit based on transducer
sensor_type = 'S1'               # Type of AE sensor
fs = 20e3                        # Sampling Rate [Hz]
n_samples = int(fs*total_time)   # Number of samples
pos = 'A'                        # Positioning of the sensor
low_pass = 100e3                 # HC for analog filter [Hz]
high_pass = 500                  # LC for analog filter [Hz]
vs = 20                          # Cutting speed [m/s]
vf = 2                           # Feed rate [mm/min]
fluid = ''                       # Presence of fluid
desc = ''                        # Brief description


```

```
45
46  # File directory and data sheet organization
47  """Creation of both .csv and .pkl files for gathering
48  information about measurement for metadata formatting
49  based on file directory location. Columns names can be
50  changed according do metadata"""
51
52  column_labels = ['data',
53                   'unit',
54                   'sensType',
55                   'rate',
56                   'nsamples',
57                   'position',
58                   'vs',
59                   'vf',
60                   'start',
61                   'end',
62                   'time',
63                   'lowPass',
64                   'highPass',
65                   'fluid',
66                   'desc']
67
68  csv_file_path = r''      # <-- Insert file path for .csv file
69  pickle_file_path = r''   # <-- Insert file path for .pkl file
70  """Required already existing
71  .csv and .pkl file on file
72  directory"""
73
74
75
76  # Data Acquisition
77  """Sectidestined to data reading
78  using DAQ device. Output as numpy
79  array"""
80
81  with nidaqmx.Task() as task:
82      task.ai_channels.add_ai_voltage_chan(
83          ch,                                          # Input channel
84          terminal_config=TerminalConfiguration.RSE) # Terminal config
85
86      task.timing.cfg_samp_clk_timing(
87          rate=fs,                                 # Sampling rate
88          sample_mode=AcquisitionType.FINITE,    # Defined n samples
89          samps_per_chan=n_samples)
90
91      print('Channel configured successfully.')
```

```
92      print('Press Enter to start data acquisition.')
93      input()    # Start of data acquisition
94
95      t_start = pd.Timestamp.now()
96
97      data = np.array(
98          task.read(
99          number_of_samples_per_channel=READ_ALL_AVAILABLE,
100         timeout=timeout_time)
101         )     # Create numpy array of data
102
103 t_end = pd.Timestamp.now()
104
105 time_index = np.arange(len(data))/fs
106
107 time_df = pd.DataFrame(
108     data,
109     index = time_index
110 )         # Create data frame for time series
111
112
113
114 # Inserting data into data sheet of .pkl file
115 """Append acquired data into created data sheet
116 of existing .pkl file. Required already existing
117 .pkl file on directory"""
118
119
120 # Read the existing general DataFrame from the PICKLE file
121 with open(pickle_file_path, 'rb') as file:
122     df = pickle.load(file)
123
124 # Create data frame with measurement parameters
125 measurement_df = pd.DataFrame([{
126     'data': [data],
127     'unit': [unit],
128     'sensType': [sensor_type],
129     'rate': [fs],
130     'nsamples': [n_samples],
131     'position': [pos],
132     'vs': [vs],
133     'vf': [vf],
134     'start': [t_start],
135     'end': [t_end],
136     'time': [total_time],
137     'lowPass': [low_pass],
138     'highPass': [high_pass],
```

```
    'fluid': [fluid],
    'desc': [desc]
}])  # Data frame of measurement with metadata

# Append the new measurement DataFrame to the existing DataFrame
df = pd.concat([df, measurement_df], ignore_index=True)

# Save the updated DataFrame to a binary format
with open(pickle_file_path, 'wb') as file:
    pickle.dump(df, file)

print(f'DataFrame successfully updated and saved to {pickle_file_path}')



# Inserting data into data sheet of .csv file
"""Append acquired data into created data sheet
of existing .csv file. Required already existing
.csv file on directory (same logic)"""

# Read the existing general DataFrame from the CSV file
if os.path.exists(csv_file_path):
    df_csv= pd.read_csv(csv_file_path)
else:
    raise FileNotFoundError(f"The file {csv_file_path} does not exist.")

# Create data frame with measurement parameters
df_measurement_csv = pd.DataFrame({
    'Data': ['Voltage'],
    'Unit': [unit],
    'Sensor Type': [sensor_type],
    'Sampling Rate [Hz]': [fs],
    'N samples': [n_samples],
    'Position': [pos],
    'Vs [m/s]': [vs],
    'Vf [mm/min]': [vf],
    'Start Timestamp': [t_start],
    'End Timestamp': [t_end],
    'Measurement Time [s]': [total_time],
    'Low Pass Filter [Hz]': [low_pass],
    'High Pass Filter [Hz]': [high_pass],
    'Fluid': [fluid],
    'Description': [desc]
}) # Data frame of measurement with metadata

df_combined_csv = pd.concat([df_csv, df_measurement_csv], ignore_index=
    True)
```

```
df_combined_csv.to_csv(csv_file_path, index=False)
print(f'Data successfully updated and saved to sheet {csv_file_path}')


def del_row(df, row2del):
    """Remove specific row and overwrite existing data frame"""
    df = df.drop(labels=row2del, axis=0).reset_index(drop=True)
    with open(pickle_file_path, 'wb') as file:
        pickle.dump(df, file)
    df.to_csv(csv_file_path, index=False)



# General overview of the measurement
"""Data visualization. Time series, FFT
and PSD interactive plots integrating
pandas, plotly and endaq libraries"""

filtered_data = endaq.calc.filters.butterworth(
    time_df,
    low_cutoff = 100,
    high_cutoff = None
    ) # High-pass filter

filtered_data.columns = ['Data'] # Rename columns

# FFT and PSD using data frames
fft = endaq.calc.fft.aggregate_fft(filtered_data,
                                   bin_width = 1)
psd_df = endaq.calc.psd.welch(filtered_data,
                              bin_width = 1)

# Data frame of all available data
data_total_dash = {
    'Time': filtered_data,
    'FFT': fft,
    'PSD': psd_df,
}

# Figure environment

fig = endaq.plot.dashboards.rolling_enveloped_dashboard(
    data_total_dash,
    desired_num_points = 10e3,
    plot_as_bars=True,
    num_rows=3,
    num_cols=1,
```

```
    opacity=.9
)

fig.update_layout(
    title_text="Subplots with Time Series FFT and PSD",
    title_font_family = 'Computer Modern',
    template='endaq',
    font=dict(family='Computer Modern',
              size=12,
              color='white'),
)

fig.update_xaxes(title_text="Time [s]",
                 row=1,
                 col=1)

fig.update_yaxes(title_text="Voltage (V)",
                 row=1,
                 col=1)

fig.update_xaxes(title_text="Frequency (Hz)",
                 type='log',
                 row=2,
                 col=1)

fig.update_yaxes(title_text="Magnitude",
                 row=2,
                 col=1)

fig.update_xaxes(title_text="Frequency (Hz)", type = 'log',
                 row=3,
                 col=1)

fig.update_yaxes(title_text="PSD Magnitude",
                 row=3,
                 col=1)

fig.show()

# Open figure in .html format for interactivity
fig.write_html('data-visualization.html',
               auto_open=True)
```