



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALEX ELTON DE MOURA

**CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE *ROUTER* CNC COM DISPOSITIVO
EMBARCADO PARA MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS**

Recife

2021

ALEX ELTON DE MOURA

**CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE *ROUTER* CNC COM DISPOSITIVO
EMBARCADO PARA MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Materiais e Fabricação.

Orientador (a): Prof. Dr. Tiago Leite Rolim

Recife

2021

Catálogo na fonte

Bibliotecária Rosineide Mesquita G. Luz, CRB-4 / 1361

M929c Moura, Alex Elton de.
 Controle e automação de *Router* CNC com dispositivo embarcado para monitoramento de vibrações mecânicas / Alex Elton de Moura - 2021.
 147 folhas.

 Orientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim.

 Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2021.
 Inclui Referências.

 1. Engenharia Mecânica. 2. Controle CNC 3. Router CNC. 4. Monitoramento de máquina-ferramenta. 5. Ensaio de máquina-ferramenta. 6. Usinagem. 7. Indústria 4.0. I. Rolim, Tiago Leite (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-70

ALEX ELTON DE MOURA

**CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE *ROUTER* CNC COM DISPOSITIVO
EMBARCADO PARA MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Materiais e Fabricação.

Aprovada em: 06/10/2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Tiago Leite Rolim (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva (Examinador Externo)
Universidade Federal da Paraíba – UFPB

Prof. Dr. José Maria Andrade Barbosa (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. José Eduardo Ferreira de Oliveira (Examinador Externo)
Instituto Federal de Pernambuco - IFPE

AGRADECIMENTOS

Ao criador por toda a oportunidade de aprendizado e evolução. Ao Cristo pela sua infinita luz de amor e paz que nos guia em todos os momentos.

Aos meus pais, Roberto Moura e Jane Moura, que muito trabalharam para que eu tivesse uma educação de qualidade e que com amor e exemplo me ensinaram muitos dos valores morais que carrego.

À Aline Moura, querida irmã que sempre me apoia e vibra com as minhas conquistas.

Ao meu orientador e amigo professor Tiago Rolim, pessoa que sempre me inspirou e muito contribuiu para a minha formação. Em longas horas de conversações, trocamos ideias, realizamos projetos e ele sempre foi muito paciente com minhas críticas (teimosias) e nunca me negou ajuda.

Ao amigo professor Rogério Pontes pelo apoio moral e as grandes colaborações técnicas e científicas. Suas contribuições foram essenciais para este trabalho.

Ao professor Carlos Augusto pela extensa e valiosa avaliação realizada. Suas críticas me ajudaram bastante a tornar a escrita desta tese mais clara e objetiva. Obrigado por seu trabalho.

À Ângela Cristina que sempre me incentivou e me aconselhou.

Aos amigos: Andréa Gonçalves, José Carlos, Brenan Antas, Gustavo Costa, Edes Araújo, Daniel Azevedo, Januário Leal, André do Couto, Carolina Jeane, Dafne Ramos, Adriel Filipe, Valeska Queiroz, Orlando Rocha, Allan Belo, Anderson Dantas e Geyse Maia muito obrigado a todos(as) vocês.

À Nathália Martins que sempre me incentivou, esteve comigo em todos os momentos decisivos e comemorou cada conquista. Obrigado, você e seu carinho tornaram cada etapa deste trabalho especial.

Por fim agradeço às pessoas que não citei diretamente, mas que também contribuíram para a realização deste trabalho. Muito obrigado.

RESUMO

Desde a pré-história a fabricação de objetos é uma atividade essencial à civilização humana. No aspecto econômico, a riqueza material produzida por um país está intimamente ligada aos processos de fabricação. Mas o que tem acontecido com as formas de produção? Estamos na quarta revolução industrial, marcada pela indústria 4.0. No cenário atual, diante do fácil acesso às tecnologias, *hardwares* de baixo custo, materiais didáticos disponíveis de *internet* e *softwares* de acesso livre nasceram as máquinas-ferramenta de pequeno porte, muitas delas feitas por hobistas que, geralmente, desconhecem os princípios básicos de projetos mecânicos e das tecnologias envolvidas. Entre essas máquinas as *routers* são as mais populares e atendem a uma demanda de mercado principalmente voltada à fabricação de artefatos em madeira. No presente trabalho foi projetado, montado, instalado e testado um sistema de controle CNC para uma *router* em conjunto com um sistema de monitoramento de vibrações mecânicas embarcado. Para atingir esse objetivo foi realizado um estudo sobre os sistemas de controle CNC, como também foi construído um sistema para o monitoramento das vibrações mecânicas oriundas da usinagem. Numa última etapa, foi realizado um ensaio de avaliação, por meio da usinagem de uma peça-teste, adaptada da norma ABNT NBR NM ISO 10791-7:1999, a fim de obter-se os erros geométricos de cilindricidade, perpendicularidade, retitude, paralelismo, angularidade, circularidade, concentricidade e posição. O sistema de controle CNC foi instalado satisfatoriamente, assim como o sistema de monitoramento das vibrações. Em testes dinâmicos, o sistema de monitoramento da usinagem mostrou-se capaz de detectar variações na aceleração da vibração provocadas por variações nas condições de usinagem, conforme o comportamento previsto em literatura. A aceleração da vibração também foi correlacionada com a rugosidade superficial e os resultados obtidos podem ser úteis para inferir a rugosidade em condições específicas. A *router* automatizada no presente trabalho juntamente com o sistema de monitoramento das vibrações, proporcionam o domínio da capacidade da máquina na produção de peças usinadas. Adicionalmente, os equipamentos empregados na solução, de baixo custo em sua grande maioria, ampliaram a capacidade do que seria uma simples máquina CNC possibilitando a criação de um dispositivo IoT compatível com as necessidades da indústria 4.0.

Palavras-chave: Controle CNC; *Router* CNC; Monitoramento de Máquina-Ferramenta; Ensaio de Máquina-Ferramenta; Usinagem; Indústria 4.0.

ABSTRACT

Since prehistory, the manufacture of objects has been an essential activity for human civilization. In the economic aspect, the material wealth produced by a country is closely linked to the manufacturing processes. But what has happened to the forms of production? We are in the fourth industrial revolution, marked by industry 4.0. In the current scenario, given the easy access to technologies, low-cost hardware, teaching materials available from the internet and free access software, small machine tools were born, many of them made by hobbyists who, generally, do not know the basic principles of projects mechanics and the technologies involved. Among these machines, routers are the most popular and meet a market demand mainly focused on the manufacture of wooden artifacts. In the present work, a CNC control system for a router was designed, assembled, installed and tested, together with an embedded mechanical vibration monitoring system. To achieve this goal, a study was carried out on CNC control systems, as well as a system for monitoring mechanical vibrations from machining. In a last step, an evaluation test was carried out, by machining a test piece, adapted from the ABNT NBR NM ISO 10791-7:1999 standard, in order to obtain the geometric errors of cylindricity, perpendicularity, straightness, parallelism, angularity, circularity, concentricity and position. The CNC control system was installed satisfactorily, as was the vibration monitoring system. In dynamic tests, the machining monitoring system proved to be able to detect variations in vibration acceleration caused by variations in machining conditions, according to the behavior foreseen in the literature. Vibration acceleration was also correlated with surface roughness and the results obtained can be useful to infer roughness under specific conditions. The automated router in this work, together with the vibration monitoring system, provide the mastery of the machine's capacity in the production of machined parts. Additionally, the equipment used in the solution, which is mostly low cost, expanded the capacity of what would be a simple CNC machine, enabling the creation of an IoT device compatible with the needs of industry 4.0.

Keywords: CNC Control; CNC Router; Machine Monitoring; Machine Tool Evaluation; Machining; Industry 4.0.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Linha do Tempo da Evolução das Máquinas-Ferramenta.....	20
Figura 2 - Benefícios da utilização dos sistemas OAC.....	26
Figura 3 - Troca de informações com interface neutra.....	28
Figura 4 - Programação em código G atual.....	30
Figura 5 - Alto nível de programação STEP-NC.....	31
Figura 6 - Estrutura de dados ISO 14949-1:2003.....	32
Figura 7- Estrutura TCM.....	35
Figura 8 - Parâmetros que influenciam na rugosidade superficial.....	39
Figura 9 - Visão geral das fontes de erro em uma máquina-ferramenta e os fatores que o afetam	41
Figura 10 – Classificação de alguns ensaios geométricos de máquinas-ferramenta	42
Figura 11 – Peça-teste ABNT NBR NM ISO 10791-7:1999	44
Figura 12 - <i>Router</i> CNC	46
Figura 13 - Componentes do sistema de controle CNC da <i>router</i>	47
Figura 14 - Curva do motor de passo KTC-KML093F07	50
Figura 15 - Malha do sistema de controle CNC.....	51
Figura 16 – Placa de controle CNC NVEM	52
Figura 17 - Gerador de Pulso Manual	53
Figura 18 - <i>Driver</i> MA 860-DSP.....	54
Figura 19 - Inversor de frequência e <i>spindle</i>	55
Figura 20 - Projeto em CAD do quadro de controle	57
Figura 21 - Fixação das chaves de fim de curso	60
Figura 22 - Esquema de ligação do MACH3	61
Figura 23 - Ativação do plugin NVEM no MACH3	61
Figura 24 - Etapas para obtenção da <i>router</i> em condições de operação.....	63
Figura 25 - Montagem experimental dos ensaios de retitude.....	64
Figura 26 – Geometria da peça-teste.....	66
Figura 27 – Corpos de prova para usinagem das peças-teste	67
Figura 28 – Dimensões finais do corpo de prova da peça-teste.....	68
Figura 29 - Etapas para criação do código G e usinagem da peça.....	69
Figura 30 - Sequência de usinagem obtida com a ferramenta CAM	70
Figura 31 - Tela do MACH3 com pré-visualização da trajetória da ferramenta.....	71

Figura 32 – Fixação e alinhamento do corpo de prova na mesa da router	72
Figura 33 - Definição do ponto zero peça	73
Figura 34 - Posições de usinagem das peças-teste 1, 2 e 3.....	74
Figura 35- Medição de peças-teste na MMC.....	75
Figura 36 - Etapas da medição	76
Figura 37 - Elementos medidos nas peças-teste	77
Figura 38 - Processo de medição das peças-teste na MMC	79
Figura 39 - Procedimentos para o cálculo dos resultados das medições.....	81
Figura 40 – Representação esquemática do sistema de monitoramento das vibrações	82
Figura 41 – Fixação do acelerômetro ao spindle.....	84
Figura 42 - Corpo de prova para ensaios de rugosidade e vibração	86
Figura 43 - Montagem do quadro de comando	88
Figura 44 - Quadro de comando instalado na <i>router</i>	88
Figura 45 - Sensores e atuadores instalados na <i>Router</i>	89
Figura 46 - Chave de fim de curso eixo Y	90
Figura 47 - Peça-teste usinada	91
Figura 48 - Cilindricidade do Furo Central das peças-teste 1, 2 e 3.....	92
Figura 49 – Perpendicularidade do Furo Central com Base A, no plano YZ, das peças-teste 1, 2 e 3.....	93
Figura 50 - Perpendicularidade do Furo central com a Base A, no plano ZX, das peças-teste 1, 2 e 3.....	94
Figura 51 - Retitude dos Lados L1, L2, L3 e L4 da peça-teste 1.....	95
Figura 52 - Retitude dos Lados L1, L2, L3 e L4 da peça-teste 2.....	95
Figura 53 - Retitude dos lados L1, L2, L3 e L4 da peça-teste 3.....	96
Figura 54 - Retitude dos Lados L1, L2, L3 e L4 das peças-teste 1, 2 e 3	96
Figura 55 - Perpendicularidade entre L2, L4 e L1 da peça-teste 1.....	97
Figura 56 - Perpendicularidade entre L2, L4 e L1 da peça-teste 2.....	98
Figura 57 - Perpendicularidade entre L2, L4 e L1 da peça-teste 3.....	98
Figura 58 - Perpendicularidade entre L2, L4 e L1 das peças-teste 1, 2 e 3.....	99
Figura 59 - Paralelismo entre L3 e L1 para as peças-teste 1,2 e 3	100
Figura 60 - Retitude dos lados L5, L6, L7 e L8 da peça-teste 1.....	101
Figura 61 - Retitude dos lados L5, L6, L7 e L8 da peça-teste 2.....	101
Figura 62 - Retitude dos lados L5, L6, L7 e L8 da peça-teste 3.....	102

Figura 63 - Retitude dos lados L5, L6, L7 e L8 das peças-teste 1, 2 e 3	102
Figura 64 - Angularidade do ângulo de 75° (L9) em relação à L1 (Base B) das peças-teste 1, 2 e 3.....	103
Figura 65 - Circularidade dos Círculos Externos das peças-teste 1, 2 e 3	104
Figura 66 - Concentricidade do Círculo Externo e o Furo Central das peças-teste 1, 2 e 3	105
Figura 67 - Retitude dos lados L10 e L11 da peça-teste 1.....	106
Figura 68 - Retitude dos lados L10 e L11 da peça-teste 2.....	106
Figura 69 - Retitude dos lados L10 e L11 da peça-teste 3.....	107
Figura 70 - Retitude dos lados L10 e L11 das peças-teste 1, 2 e 3	107
Figura 71 - Angularidade dos lados L10 e L11 em relação à L1 da peça-teste 1 ...	108
Figura 72 - Angularidade dos lados L10 e L11 em relação à L1 da peça-teste 2 ...	109
Figura 73 - Angularidade dos lados L10 e L11 em relação à L1 da peça-teste 3 ...	109
Figura 74 - Angularidade dos lados L10 e L11 em relação à L1 das peças-teste 1, 2 e 3	110
Figura 75 - Posição dos Furos F1, F2, F3 e F4 em relação ao Furo Central da peça-teste 1	111
Figura 76 - Posição dos Furos F1, F2, F3 e F4 em relação ao Furo Central da peça-teste 2	111
Figura 77 - Posição dos Furos F1, F2, F3 e F4 em relação ao Furo Central da peça-teste 3	112
Figura 78 - Posição dos Furos F1, F2, F3 e F4 em relação ao Furo Central das peças-teste 1, 2 e 3.....	112
Figura 79 - Corpo de prova usinado	114
Figura 80 – Taxa de avanço versus aceleração da vibração	115
Figura 81 - Aceleração da vibração versus rugosidade superficial	116
Figura 82 –Taxa de avanço versus rugosidade superficial	117
Figura 83 - Vibração no domínio do tempo	118
Figura 84 - Vibração no domínio da frequência.....	119
Figura 85 - Portas do controlador CNC	130
Figura 86 - Configurações de sinais de entrada no MACH3	132
Figura 87 - Configuração dos sinais de saída no MACH3.....	133
Figura 88 - Ajuste do spindle.....	134
Figura 89 - Configuração do motor no eixo X.....	135

Figura 90 - Soft limits do MACH3137

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Exemplos de métodos de medição direta e indireta.....	36
Quadro 2 - Tolerâncias Geométricas	45
Quadro 3 - Motores da <i>router</i> CNC.	50
Quadro 4 - Principais componentes do quadro de controle	59
Quadro 5 - Elementos geométricos avaliados nas peças-teste.....	78
Quadro 6 - Configuração de portas digitais da placa de controle NVEM	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais fabricantes de controladores CNC	25
Tabela 2 - Parâmetros críticos de corte	48
Tabela 3 - Resultado das forças e potências de corte	49
Tabela 4 - Configuração dos <i>drivers</i> dos motores de passo	55
Tabela 5 - Parâmetros do inversor de frequência	56
Tabela 6 - Valores de retitude dos eixos nas posições a e b em mm.	64
Tabela 7 - Perpendicularidade entre os eixos.	64
Tabela 8 - Especificações ADXL 335 e Arduino UNO	83
Tabela 9 - Planejamento experimental sistema de monitoramento	85
Tabela 10 – Máximos erros geométricos da <i>router</i>	113
Tabela 11 - Mínimos erros geométricos da <i>router</i>	114
Tabela 12 - Parâmetros de configuração dos motores.....	136
Tabela 13 - Resultados completos das medições para a peça-teste 1	144
Tabela 14 - Resultados completos das medições para a peça-teste 2	145
Tabela 15 - Resultados completos das medições para a peça-teste 3	146
Tabela 16 - Medidas de Vibrações e Rugosidades	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	Projeto Auxiliado por Computador
CAM	Manufatura Auxiliada por Computador
CAX	Tecnologias Assistidas por Computador
CLP	Controlador Lógico Programável
CNC	Controlador Numérico Computadorizado
COM	Porta de Comunicação
CP	Computação nas Nuvens
CPS	Sistemas Ciber-Físicos
DFT	Transformada Discreta de Fourier
DIY	<i>Do it Yourself</i>
DNC	Controle Numérico Direto
EMC	<i>Enhanced Machine Controller</i>
EMC2	<i>Enhanced Machine Controller 2</i>
FFT	Transformada Rápida de Fourier
HMI	Interface Homem Máquina
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
IoT	Internet das Coisas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LABMEC	Laboratório de Mecânica Aplicada
LAMECO	Laboratório de Medição por Coordenadas
MCM	Monitoramento da Condição de Máquina
MMC	Máquina de Medição por Coordenadas
MPG	Gerador de Pulso Manual
MTCT	Máquina-Ferramenta Gêmea Cibernética
NA	Normalmente Aberto
NC	Normalmente Fechado
NC	Controle Numérico
NF	Normalmente Fechado

NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NMMC	Nano Metais de Matriz Compósita
OAC	Controlador de Arquitetura Aberta
OMAC	Controladores de Arquitetura Modular Aberta
OSACA	Arquitetura de Sistema Aberto para Controles em Sistemas de Automação
OSEC	Ambiente de Sistema Aberto para Manufatura
PC	Computador Pessoal
PWM	Modulação de Largura de Pulso
RMT	Máquinas-Ferramenta Reconfiguráveis
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
TCM	Monitoramento da Condição de Ferramenta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	OBJETIVOS.....	23
1.1.1	Geral.....	23
1.1.2	Específicos	23
2	REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1	SISTEMAS DE CONTROLE NUMÉRICO COMPUTADORIZADO (CNC) ..	24
2.1.1	Controladores de Arquitetura Aberta.....	26
2.1.2	Integração CAD, CAM e CNC	28
2.1.2.1	Norma ISO 6983-1:2009	29
2.1.2.2	Norma ISO 14649-1:2001	31
2.1.3	Controladores CNCs Baseados em Plataformas Computacionais.....	32
2.1.3.1	EMC2	33
2.1.3.2	MACH3	33
2.2	MONITORAMENTO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA.....	34
2.2.1	Medição Direta e Indireta.....	35
2.2.2	Medição de Vibrações Mecânicas	37
2.2.2.1	Sinais no Domínio da Frequência	37
2.2.3	Rugosidade Superficial e Vibrações Mecânicas	38
2.3	ENSAIOS GEOMÉTRICOS DE MÁQUINAS-FERRAMENTA	40
2.3.1	Avaliação por Usinagem de Peças-Teste	43
2.3.1.1	Norma ABNT NBR NM ISO 10791-7:1999	43
2.3.2	Tolerâncias Geométricas	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1	PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE CNC.....	46
3.1.1	Dimensionamento dos Motores.....	48
3.1.2	Malha de Controle	51
3.1.3	Controlador CNC.....	52
3.1.4	Gerador de Pulso Manual (MPG)	53
3.1.5	Drivers dos Motores de Passo.....	54
3.1.6	Inversor de Frequência e <i>Spindle</i>	55

3.1.7	Quadro de Controle	57
3.1.8	Instalações de Chaves Fim de Curso.....	59
3.2	CONFIGURAÇÃO DO MACH3	61
3.3	ENSAIOS DE AVALIAÇÃO PARA A DETERMINAÇÃO DE ERROS GEOMÉTRICOS	62
3.3.1	Usinagem das Peças-Teste.....	65
3.3.1.1	Geometria da Peça-Teste	65
3.3.1.2	Preparação de Corpos de Prova para a Fabricação das Peças-Teste	67
3.3.1.3	Programa CNC para Usinagem das Peças-Teste	68
3.3.1.4	Fixação do Corpo de Prova na Mesa da <i>Router</i>	72
3.3.1.5	Definição do Zero Peça e Início da Usinagem na <i>Router</i>	73
3.3.1.6	Posições de Usinagem das Peças-Teste no Volume de Trabalho da <i>Router</i>	74
3.3.2	Medição das Peças-Teste.....	75
3.3.2.1	Parâmetros Geométricos Avaliados.....	77
3.3.3	Expressão dos Resultados das Medições dos Parâmetros Geométricos	80
3.4	SISTEMA DE MONITORAMENTO EMBARCADO	82
3.4.1	Aquisição de Dados de Vibração.....	83
3.4.1.1	Fixação do Acelerômetro no <i>Spindle</i>	84
3.4.2	Rugosidade e Vibrações Mecânicas	85
3.4.2.1	Geometria do Corpo de Prova para o Ensaio do Sistema de Monitoramento.	86
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	87
4.1	SISTEMA DE CONTROLE CNC INSTALADO NA <i>ROUTER</i>	87
4.1.1	Quadro de Controle	87
4.1.2	Sensores e Atuadores Instalados na <i>Router</i>.....	89
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE AVALIAÇÃO GEOMETRICA.....	91
4.2.1	Furo Central.....	92
4.2.1.1	Cilindricidade	92
4.2.1.2	Perpendicularidade da Linha de Centro do Furo Central com a Base A.....	93
4.2.2	Quadrado	94

4.2.2.1	Retitude dos Lados L1, L2, L3 e L4	94
4.2.2.2	Perpendicularidade dos Lados Adjacentes L2 e L4 em Relação à L1 (Base B)	97
4.2.2.3	Paralelismo do Lado Oposto L3 e L1 (Base B)	99
4.2.3	Quadrado Inclinado	100
4.2.3.1	Retitude dos Lados L5, L6, L7 e L8	100
4.2.3.2	Angularidade do Ângulo de 75° (L9) em Relação à L1 (Base B)	103
4.2.4	Círculo.....	104
4.2.4.1	Circularidade	104
4.2.4.2	Concentricidade do Círculo Externo e o Furo Central.....	104
4.2.5	Faces Inclínadas	105
4.2.5.1	Retitude das Faces L10 e L11	105
4.2.5.2	Angularidade da L10 e L11 em Relação à L1 (Base B)	108
4.2.6	Furos Fresados	110
4.2.6.1	Posição dos Furos F1, F2, F3 e F4 em Relação ao Furo Central.....	110
4.3	SUMARIZAÇÃO DOS ERROS GEOMÉTRICOS DA <i>ROUTER</i>	113
4.4	ENSAIOS DO SISTEMA DE MONITORAMENTO	114
4.4.1	Taxa de Avanço versus Aceleração da Vibração	115
4.4.2	Aceleração da Vibração versus Rugosidade Superficial	116
4.4.3	Taxa de Avanço versus Rugosidade Superficial.....	117
4.4.4	Vibração no Domínio da Frequência.....	117
5	CONCLUSÃO	120
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	121
	REFERÊNCIAS	122
	APÊNDICE A – CONFIGURAÇÕES DO MACH3/PLACA DE CONTROLE..	130
	APÊNDICE B – CÓDIGO EM <i>PHYTON</i> DO DAQ	139
	APÊNDICE C – MEDIÇÕES DAS PEÇAS-TESTE	144
	APÊNDICE D – MEDIDAS DE VIBRAÇÕES E RUGOSIDADES	147

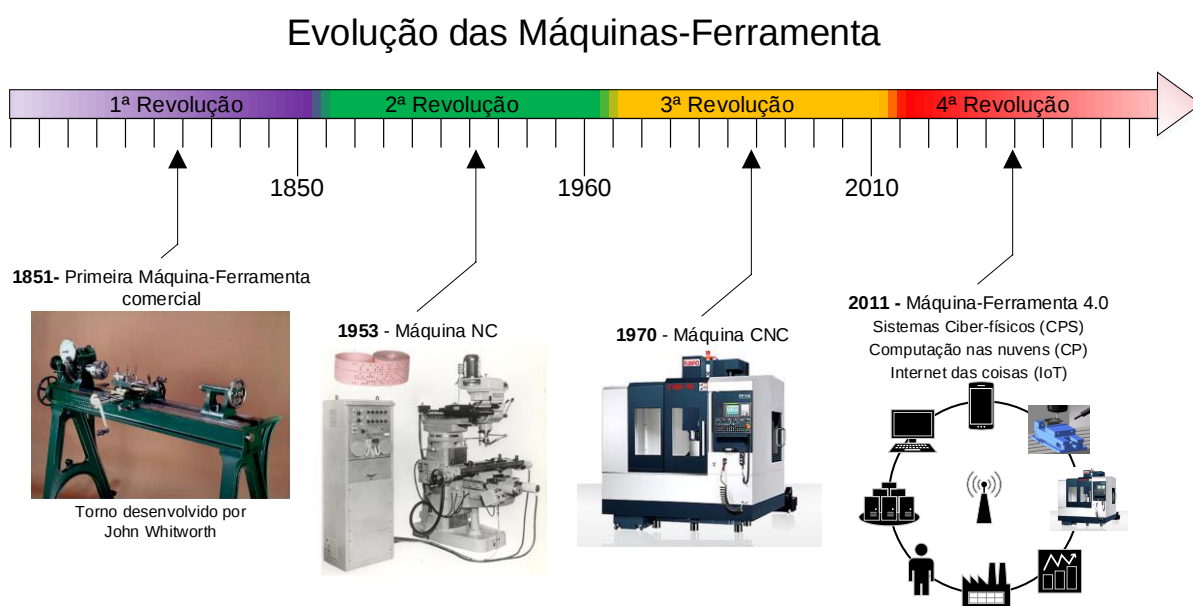
1 INTRODUÇÃO

Desde a pré-história a fabricação de objetos é uma atividade essencial à civilização humana (GROOVER, 2014). No dia-a-dia naturalmente utilizamos máquinas ou equipamentos como carros, computadores, aviões, lavadoras de roupas, mesas, cadeiras e não percebemos diretamente como nosso estilo de vida depende das máquinas-ferramentas utilizadas pela indústria. Em posição de destaque na produção de bens de consumo e capital estão as máquinas-ferramenta. Segundo o último relatório divulgado pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) as indústrias brasileiras produzem 1,1% das máquinas-ferramenta utilizadas no mundo (BERTASSO, 2013). Apesar de ser uma constatação antiga e ao mesmo tempo atual, Weck (1984) afirma em seu *handbook* que sem o desenvolvimento desse tipo de equipamento, o alto padrão de vida na atualidade seria inimaginável. Mas o que tem acontecido com os meios de produção? Estamos na quarta revolução industrial, marcada pela indústria 4.0 (ZEZULKA *et al.*, 2016). Novos paradigmas de fabricação estão lançados para que possamos atender as demandas sociais e ambientais em benefício de uma melhor qualidade de vida.

Movimentada pela força humana, animal, vapor, elétrica, as máquinas-ferramenta sofreram uma evolução vertiginosa ao longo dos anos até a atualidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS, 2006). Na primeira revolução industrial, ocorrida no século XVIII, impulsionada pela máquina a vapor de James Watt, as máquinas-ferramenta eram puramente mecânicas. Em seguida tem-se a segunda revolução industrial, no século XIX, caracterizada pela utilização do motor elétrico, em substituição do vapor de água. Nessa época surgiram as primeiras máquinas-ferramenta com o Comando Numérico (NC). Posteriormente na terceira revolução industrial, no século XX, um forte impacto causado pela utilização de computadores alavancou os meios de produção. Nessa fase surgiram o Comando Numérico Computadorizado (CNC) e o Controlador Lógico Programável (CLP) que inicialmente utilizavam a eletrônica analógica. Assim grandes circuitos valvulados e de elevado custo desempenhavam o papel de controle das máquinas-ferramenta. Após a primeira década do século XXI, novos avanços na microeletrônica, nas linguagens de programação, nos meios de comunicação e armazenamento de dados culminaram para uma nova forma de produzir: a Indústria 4.0 (HENNING, KAGERMANN WOLFGANG; JOHANNES, 2013). Essa revolução

tornou os meios de produção muito mais flexíveis em vários aspectos, por exemplo: monitoramento via *internet* de máquinas e fábricas inteiras, análise de grandes bancos de dados (*big data*), fácil modificação das linhas de produção e comunicação entre equipamentos (LIU; XU, 2017). A tendência é que não existam apenas máquinas isoladas, as modernas máquinas-ferramenta CNC da indústria 4.0, com arquitetura aberta, podem ser conectadas às nuvens de dados promovendo um sistema interligado e orientado ao serviço (GUO *et al.*, 2018; HUI *et al.*, 2018). A Figura 1 resume as quatro revoluções industriais com foco nas mudanças das máquinas-ferramenta.

Figura 1- Linha do Tempo da Evolução das Máquinas-Ferramenta



Fonte: O Autor (2021).

Nesse cenário de evolução da indústria 4.0, os sistemas de controle mais modernos utilizam controladores CNC baseados na norma ISO 14649-1:2003 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2003), possibilitando a comunicação bidirecional entre os controladores, os programas de Projeto Auxiliado por Computador (CAD), Manufatura Auxiliada por Computador (CAM) e outras tecnologias Auxiliadas por Computador (CAx) (XU; NEWMAN, 2006). Aliado à flexibilização dos sistemas CNC, as máquinas-ferramenta passaram a incorporar sistemas de monitoramento em tempo real (LAURO *et al.*, 2014). Através dos sistemas de monitoramento várias variáveis podem ser acompanhadas durante o processo de usinagem, resultando numa rica fonte de dados para a análise e melhoria de

processos. Vibrações mecânicas, emissões acústicas, forças de corte, corrente elétrica são alguns dos parâmetros que podem ser observados (GOYAL; PABLA, 2015). Essa evolução tanto a nível de *hardware* como de *software* dos sistemas de controle CNC possibilitaram a virtualização das máquinas do mundo real com a criação da Máquina-ferramenta Gêmea Cibernética (MTCT) para criação dos Sistemas Ciber-Físicos (CPS) da indústria 4.0 (LEE, JAY; BAGHERI; KAO, 2015). Robustos algoritmos, executados em servidores nas nuvens, dão vida ao ambiente CPS e processam os dados coletados das máquinas reais, no chão de fábrica, para a virtualização das MTCTs. Nesse cenário de conexão em tempo real, mudanças numa linha de produção podem ser realizadas rapidamente, seja para a melhoria do processo ou para atender a uma necessidade de produção específica. São inúmeras as possibilidades inerentes aos ambientes CPS, comunicação entre máquinas, flexibilização na produção, rápidas intervenções de manutenção, supervisionamento, rápida adequação das demandas de mercado etc.

Com a evolução da eletrônica e os ambientes de programação livres, o acesso às tecnologias, tanto a nível de *hardware* como de *softwares*, está popularizado e não mais restrito aos grandes fabricantes. Assim nasceram os projetos do tipo “faça você mesmo” ou mais comumente conhecidos do inglês como o “*Do It Yourself*” (DIY) (FOX, 2014). Esses projetos DIY podem abranger soluções variadas como por exemplo a automação residencial ou a criação de máquinas-ferramenta. Na *internet*, por exemplo, muitos serviços e produtos oferecidos têm como meio de produção as impressoras 3D e as *routers* DIY. Com tecnologia modular, baixo custo e diversas aplicações comerciais, as máquinas-ferramenta CNC DIY são amplamente utilizadas na fabricação de peças (CORREA; TOOMBS; FERREIRA, 2017).

As primeiras máquinas DIY a surgirem foram as *routers* CNC. A característica principal de uma *router* é o pórtico móvel que é responsável pelo deslocamento da ferramenta de corte diferentemente de uma máquina-ferramenta fresadora, cuja peça a ser usinada move-se em torno da ferramenta de corte (ALBERT, 2011). Esse tipo de configuração estrutural facilitou a fabricação da *router*, porém, devido à movimentação de um pórtico com a ferramenta de corte e a baixa massa estrutural tornaram a máquina limitada em suportar forças e absorver vibrações mecânicas. Desse modo, geralmente, a utilização das *routers* é limitada à usinagem de materiais

com limite de resistência inferiores ao aço, por exemplo: madeira, alumínio, acrílico e vários tipos de polímeros.

Didaticamente, uma *router* pode ser analisada como uma composição de dois sistemas, são eles: mecânico e controle. O sistema mecânico, em síntese, corresponde à estrutura de movimentação que irá suportar as cargas oriundas do processo de usinagem. O sistema de controle é composto principalmente pelo controlador CNC, sensores, atuadores e os *softwares* de controle.

Devido ao seu baixo custo, as *routers* são comumente utilizadas por pequenos empreendedores, porém nem sempre a qualidade das peças produzidas é satisfatória. Muitas dessas máquinas são desenvolvidas por criadores DIY que pouco se importam ou desconhecem as tolerâncias dimensionais e geométricas dos produtos fabricados. O objetivo do presente trabalho é implementar um sistema controle CNC e desenvolver um sistema de monitoramento de vibrações mecânicas para uma *Router* projetada, fabricada e testada por Silva (2018). O sistema de controle CNC foi instalado com sucesso e os erros geométricos de cilindricidade, perpendicularidade, retitude, paralelismo, angularidade, circularidade, concentricidade e posição foram obtidos por meio de ensaios com a usinagem de peças-teste e posterior medição numa Máquina de Medição por Coordenadas (MMC). O sistema de monitoramento de vibrações mecânicas projetado e implantado é de baixo custo, pois foi desenvolvido em plataformas livres e oferece um abrangente suporte à soluções de Monitoramento da Condição de Máquina (MCM) e Monitoramento de Condições de Ferramentas (TCM). A proposta do presente trabalho contribuirá para a melhoria da qualidade do projeto, montagem do sistema de controle CNC e obtenção de uma *router* em condições de operação. Em adição a *router* automatizada e com os erros geométricos avaliados, o sistema de monitoramento das vibrações mecânicas pode ser utilizado para a melhoria da qualidade dos produtos fabricados devido ao melhor controle das condições de usinagem. Os equipamentos utilizados na montagem do sistema de controle CNC, em conjunto com o sistema de monitoramento, possibilitaram inserção das *routers* DIY na indústria 4.0.

1.1 OBJETIVOS

Nos subtópicos a seguir estão definidos o objetivo geral e os objetivos específicos da presente tese.

1.1.1 Geral

- Projetar, instalar e validar um sistema de controle CNC em uma *Router*, em conjunto com um sistema embarcado de monitoramento das vibrações mecânicas e fazer uma correlação da aceleração da vibração com a rugosidade superficial das peças usinadas.

1.1.2 Específicos

- Dimensionar os componentes do sistema de controle CNC;
- Definir a malha de controle;
- Instalar o sistema de controle CNC;
- Testar o funcionamento do sistema de controle CNC;
- Modelar a geometria da peça-teste, para a avaliação de tolerâncias geométricas, com geometria adaptada da norma ABNT NBR NM ISO 10791-7:1999;
- Realizar ensaios de usinagem das peças-teste e medir os erros geométricos com auxílio de uma MMC;
- Projetar um sistema para o monitoramento de vibrações mecânicas e desenvolver um algoritmo para o cálculo da aceleração da vibração que possibilite avaliar o sinal no domínio do tempo e da frequência;
- Criar um código em *python* para a sistema de monitoramento;
- Validar o sistema de monitoramento por meio da usinagem de um corpo de prova para posterior medição da rugosidade superficial;
- Correlacionar a aceleração da vibração, medida durante a usinagem, com a rugosidade superficial obtida.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nas subseções seguintes deste capítulo estão apresentadas as fundamentações teóricas utilizadas neste trabalho. Sistemas de controle CNC (Seção 2.1), monitoramento de máquinas-ferramenta (Seção 2.2) e ensaios de máquinas-ferramenta (Seção 2.3) são os principais temas abordados.

2.1 SISTEMAS DE CONTROLE NUMÉRICO COMPUTADORIZADO (CNC)

Na década de 1950, uma mudança revolucionária ocorreu no mundo da manufatura com a introdução do Controle Numérico (NC) (YUSOF; LATIF, 2016). Segundo Smid (2008) o NC é definido como a operação de máquinas-ferramenta por meio de instruções codificadas especificamente para o sistema de controle da máquina. O NC permitiu às máquinas-ferramenta a fabricação de peças com geometria complexa de forma rápida e precisa. As informações sobre a peça a ser fabricada eram obtidas de cartões perfurados e imediatamente transmitidas para os eixos da máquina. Com o surgimento de componentes baseados em semicondutores, nos anos 60, surgiram os primeiros sistemas de NC Direto (DNC). Esse tipo de sistema permitia ao usuário enviar o programa diretamente para a máquina-ferramenta (RAMESH; JYOTHIRMAI; LAVANYA, 2013). Em ambos os sistemas, NC ou DNC o usuário final não consegue modificar o programa na máquina-ferramenta, ou seja, o controle era fixo e conhecido como *hardwired*. Qualquer modificação na geometria da peça a ser usinada deveria ser realizada externamente e novos cartões perfurados eram gerados com o novo programa.

Posteriormente, na década de 70, uma grande evolução nas máquinas-ferramentas ocorreu com o desenvolvimento do CNC. Em uma máquina CNC, um microcomputador armazena os programas que são preparados anteriormente e controlam a operação da máquina (LIU; XU, 2017). As máquinas-ferramenta CNC são compostas de várias partes; o controlador é uma das partes que possui dois módulos internos: o módulo de *hardware* e o módulo de *software* (YUSOF; LATIF, 2016). A função do módulo de *software* é transformar os dados de entrada em um modelo de código compatível com a linguagem interna da máquina específica. O controlador CNC faz parte do módulo de *hardware*, tem a função de ler, interpretar códigos, baseados em modelos de instruções da Organização Internacional de Normalização

(ISO), e realizar interpolações numéricas diretas da ferramenta de corte para a realização da usinagem (ERTELL, 1969). Nos sistemas CNC o operador da máquina pode alterar diretamente qualquer função ou coordenada cartesiana do programa. Devido a essa flexibilidade de programa os controladores CNC são chamados de *softwired* (SMID, 2008).

Ao longo dos anos, as funções do CNC foram bastante aprimoradas e cada empresa desenvolveu recursos e funcionalidades específicas. O mercado está dividido entre vários fornecedores, e na Tabela 1 tem-se um exemplo dessa diversificação.

Tabela 1 - Principais fabricantes de controladores CNC

Fabricante do controlador CNC	Fatia de mercado
FANUC	29,5%
SIEMENS	28,5%
HEIDENHAIN	13%
MITSUBISHI	3%
FAGOR	2%
OKUMA	1%
NUM	1%
YASUKAWA	0,5%
OUTROS	21,5%

Fonte: Adaptado de Rajput e Sarathe (2015).

Conforme pode-se observar na Tabela 1, FANUC, SIEMENS e HEIDENHAIN tem uma parcela importante do mercado das máquinas CNC. Esses controladores são convencionais, possuem arquitetura proprietária de cada fabricante e também dependem de um *hardware* específico para funcionar. Os controladores CNC passaram por muitas modificações ao longo dos anos, tanto a nível de *hardware* quanto de *software*. Os controladores FANUC 21T&M, por exemplo, possuem cinco eixos, e tem quatro *spindles* de controle e podem controlar quatro eixos simultaneamente (RAJPUT; SARATHE, 2015). A SIEMENS fornece os controladores SINUMERIK cuja a série mais avançada é a 840D. Os controladores SINUMERIK 840D, possuem Interface Homem Máquina (HMI) customizável, monitoramento online do sistema de controle, compensadores de erro de passo, guia avançado de movimento de superfície, etc. (RAJPUT; SARATHE, 2015). Esses avanços foram

O conceito de sistemas abertos foi inicialmente definido pela Comitê Técnico de Sistemas Abertos da IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) da seguinte forma: 'Um sistema aberto fornece recursos os quais permitem que aplicativos corretamente implementados sejam executados em várias plataformas de vários fornecedores, além do mais podem interoperar com outros aplicativos do sistema e assim apresentem um estilo consistente de interação com o usuário' (IEEE, 1994).

Os controladores de arquitetura aberta se dividem em três categorias gerais:

- HMI aberto: Modificações estão restritas para os componentes que não funcionam em tempo real. As alterações são realizadas nas aplicações orientadas ao usuário.
- *Kernel* com abertura limitada: o núcleo de controle possui topologia fixa, porém permite ao usuário inserir filtros e até funções de tempo real.
- Sistemas de controle aberto: A topologia do núcleo de controle depende do processo. Ele oferece intercambialidade, escalabilidade, portabilidade e interoperabilidade.

Os projetos pioneiros desenvolvidos em controladores OAC são: Controladores de Arquitetura Modular Aberta (OMAC), desenvolvido nos EUA, o Ambiente de Sistema Aberto para Manufatura (OSEC), desenvolvido no Japão, e por último tem-se o Arquitetura de Sistema Aberto para Controles em Sistemas de Automação (OSACA), desenvolvido na Europa (NACSA, 2001).

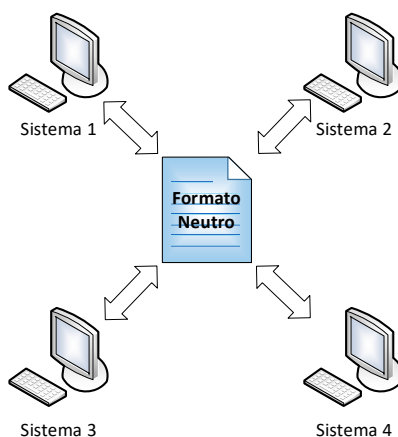
Em seu artigo, Gadalla e Xue (2017) exemplificam a aplicação de sistemas OAC em Máquinas-Ferramenta Reconfiguráveis (RMT). Os equipamentos RMT podem ter diversas funções numa mesma máquina apenas modificando as configurações mecânicas, por exemplo, uma mesma máquina pode ser uma fresadora ou um torno dependendo da configuração montada. Nesse caso, a aplicação dos sistemas OAC possibilita a integração entre diferentes tipos de *hardwares* e *softwares*. Yamazaqui (2016) mostrou em seu trabalho que a utilização de máquinas-ferramenta RMT, também conhecidas como híbridas, reduzem o custo do produto e o tempo de fabricação devido ao agrupamento de diferentes processos de fabricação num mesmo equipamento.

2.1.2 Integração CAD, CAM e CNC

Capazes de interpretar e executar precisamente os comandos numéricos para a fabricação, nos últimos 50 anos, viu-se o CNC tornar-se uma tecnologia essencial para automatização dos processos clássicos como também a impressão tridimensional, corte a laser e muitas outras aplicações recentes (CORREA; TOOMBS; FERREIRA, 2017). Aliados ao CNC, os programas de Desenho Auxiliado por Computador (CAD) e Manufatura Auxiliada por Computador (CAM) oferecem soluções práticas e eficientes para o ambiente produtivo. Juntos CAD, CAM e CNC formam uma tríade importantíssima nos processos de fabricação.

A integração dos controladores CNC e *softwares* CAM possibilitaram uma grande agilidade nos processos e produção dos produtos. Nesse ambiente integrado, o processo de fabricação é iniciado com a modelagem do produto em um *software* CAD. Em seguida, a aplicação de CAM interpreta o arquivo CAD do produto e gera uma sequência de comandos a serem executados pelo controlador CNC. O fluxo de dados é simples, porém alguns problemas de intercambialidade entres os sistemas CAD, CAM e CNC começaram a surgir. As ferramentas de CAD e de manufatura CAM proliferaram para satisfazer as crescentes, complexas e diversas necessidades de engenharia, fazendo com que os formatos de arquivos exclusivos utilizados para capturar e armazenar os dados gerassem limitações nas comunicações (NIST, 1999). Segundo Benavente (2011), a forma mais eficiente de se solucionar esse problema de intercambialidade de dados é utilizar um arquivo neutro. A Figura 3 ilustra o fluxo de dados segundo um arquivo neutro.

Figura 3 - Troca de informações com interface neutra



Fonte: Adaptado de NIST (1999).

Nos programas que geram arquivos neutros, os tradutores indiretos são responsáveis pela transferência de dados de/para o arquivo com formato neutro. O pré-processador é o tradutor responsável pela conversão de dados de uma base particular para o formato neutro. O pós-processador faz a transferência no sentido oposto, ou seja, do formato neutro para o formato particular.

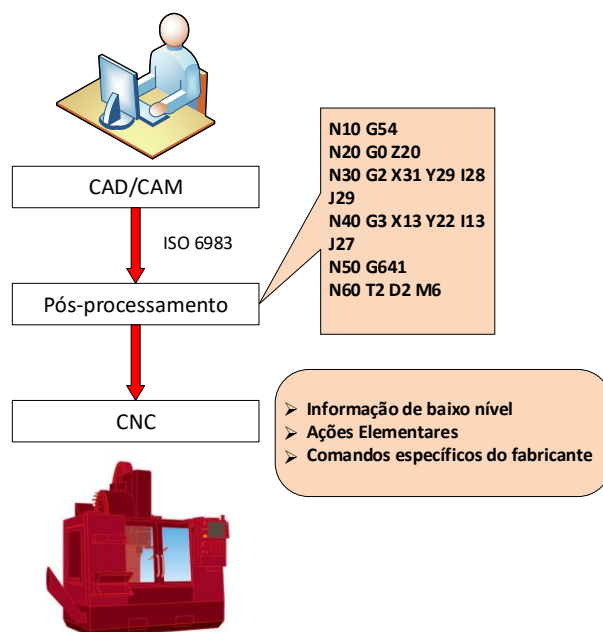
O primeiro arquivo de dados neutro a surgir, criado para plataformas CAD, foi o *Initial Graphics Exchange Specification* (IGES). Em seu artigo, Wilson (1987) descreve toda a trajetória desde a versão inicial do formato de arquivo IGES até uma versão mais avançada compatível com padrões da Organização Internacional de Normalização (ISO). Surgia então na ISO, em 1983, o Comitê Técnico 184 na área de Sistemas de Automação Industrial com a tarefa de desenvolver um padrão de dados internacional único (WILSON, 1987). Com o TC 184, a ISO tinha como objetivo a criação de um padrão internacional que permitisse capturar a informação do modelo computadorizado do produto de uma forma neutra sem perda da integridade, através do ciclo de vida do produto (BENAVENTE, 2011). Foi criada então a norma ISO 10303:1994 que é composta por um conjunto de partes e ficou conhecida como STEP - *Standard for the Exchange of Product Model Data*. Além do padrão IGES que foi primariamente desenvolvido para troca de informações puramente geométricas entre *softwares* CAD, a norma ISO 10303-1:1994 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1994) destina-se a manipulação de uma grande faixa de dados de produtos cobrindo todo o seu ciclo de vida. A nomenclatura adotada para indicar as diferentes partes é ISO 10303-xxx, onde 'xxx' indica o número da parte. Atualmente a norma tem 40 partes.

2.1.2.1 Norma ISO 6983-1:2009

No mercado, a grande maioria dos controladores CNC são aderentes à norma ISO 6983 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2009), também conhecida como código G e M (RAUCH *et al.*, 2012). O código G e M foram criados na década de 1950 para o funcionamento das máquinas NC. Com o passar do tempo e o surgimento do CNC, diversos fabricantes desenvolveram melhorias exclusivas para seus controladores, resultando num total de mais de 2000 sistemas CNC distintos (YUSOF, 2010). Assim, cada controlador CNC possui comandos específicos o que dificulta ou torna inviável o compartilhamento de códigos entre

máquinas de fabricantes diferentes. Dessa forma, o fluxo de dados para a fabricação de uma peça torna-se rígido e unidirecional como ilustrado esquematicamente na Figura 4.

Figura 4 - Programação em código G atual



Fonte: Adaptado de Rauch *et al.* (2012).

No fluxograma da Figura 4, a primeira etapa de processamento é a criação do modelo em CAD e CAM. Os sistemas CAD são projetados para descrever precisamente a geometria da peça, e o pacote CAM utiliza o sistema computacional para gerar os planos e controlar as operações de fabricação de acordo com o modelo do CAD e os recursos disponíveis no campo. O arquivo final gerado no pacote CAM, é um conjunto de programas CNC que podem ser executados na máquina-ferramenta CNC.

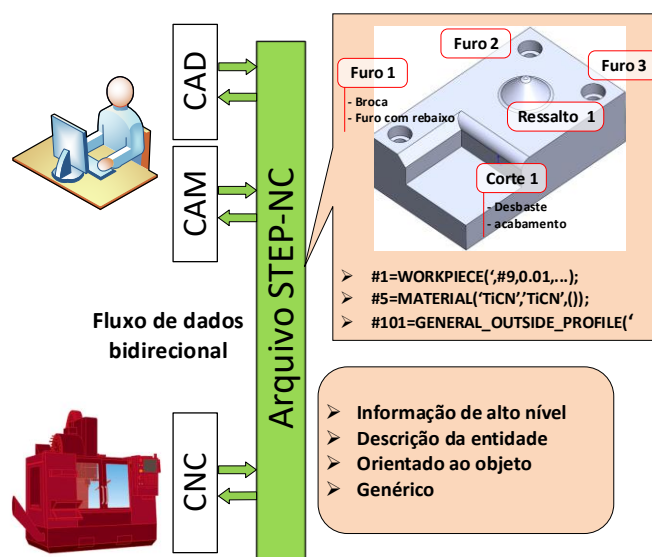
O código G gerado no pacote CAM descreve a trajetória da ponta da ferramenta de corte e descrições de status da máquina (XU *et al.*, 2005). Os arquivos gerados pelos pacotes CAM através de pós-processadores específicos, tornam o código G exclusivo para um determinado controlador. Isso torna os controladores CNC inflexíveis, pois o arquivo de saída do CAM torna-se inadaptável, o que impede a troca de dados com outras máquinas-ferramenta CNC como também a modificação bidirecional das instruções de usinagem. A razão principal para essa limitação, é que os programas em código G contém apenas informações de baixo nível que podem ser

descritas em informações de ‘como fazer’ (XU; NEWMAN, 2006). Para preencher as lacunas da ISO 6983:2009, a comunidade internacional criou um novo padrão de NC compatível com a norma STEP, estabelecido na norma ISO 14649-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2003).

2.1.2.2 Norma ISO 14649-1:2001

A norma ISO 14649-1:2003, também conhecida como STEP-NC, possibilitou novas oportunidades de suporte para informações padronizadas e de alto nível, abrangendo a fase do projeto até o controlador numérico. O padrão STEP-NC foi desenvolvido com o objetivo de criar um novo modelo de dados para controladores CNC inteligentes (BENARDOS; VOSNIAKOS, 2003). O Modelo de Referência da Aplicação (ARM), definido na norma ISO 14649-1:2003, possibilita a compatibilidade com controladores CNC de alto nível tornando a programação rápida e consistente (BENAVENTE, 2011). A norma ISO 14649-1:2003 estabelece padrões para o arquivamento e compartilhamento de informações completas sobre as etapas de usinagem, dispositivos de fixação, peças a serem usinadas, ferramentas de corte e características de fabricação no programa de controle (POBOŽNIAK, 2013). Assim, essa norma suporta a integração de várias aplicações de engenharia, que são necessárias para implementação de uma metodologia de projeto eficiente. A Figura 5 ilustra o fluxo de dados bidirecional para um arquivo do tipo STEP-NC entre os sistemas CAD/CAM e CNC (RAUCH *et al.*, 2012).

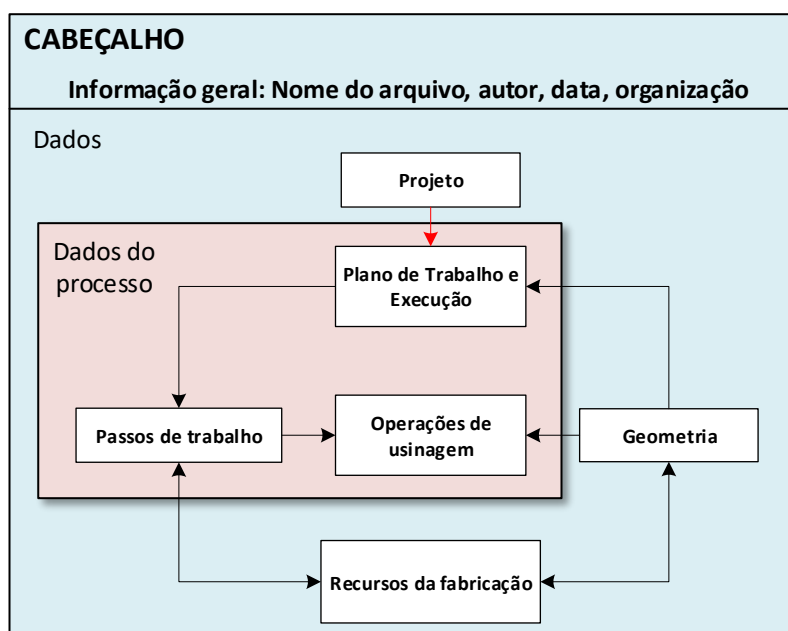
Figura 5 - Alto nível de programação STEP-NC



Fonte: Adaptado de Rauch *et al.* (2012).

O padrão STEP-NC busca eliminar as limitações do padrão ISO 6983:2009 pela especificação dos processos de usinagem ao invés da trajetória da ferramenta de corte, utilizando o conceito de orientação a objetos com a criação de *Workingsteps*. Os *Workingsteps* correspondem à recursos (*features*) de usinagem e aos parâmetros do processo associados de alto nível. A Figura 6 mostra as partes de um programa STEP-NC.

Figura 6 - Estrutura de dados ISO 14949-1:2003



Fonte: Adaptado de Xu e He (2004).

A primeira seção do programa é o cabeçalho, denotado pela palavra chave “*HEADER*”. Neste cabeçalho, algumas informações gerais e comentários sobre o programa da peça são colocados, como nome, autor, data, organização, etc (PAREDES; EDUARDO, 2013). Iniciada pela palavra “Dados” tem-se a segunda seção do programa. Ela contém as informações sobre geometria, funções e tarefas de fabricação.

2.1.3 Controladores CNCs Baseados em Plataformas Computacionais

Há vários controladores CNC disponíveis no mercado. Alguns são programas abertos que funcionam em uma ampla faixa de *hardware*. Outros funcionam exclusivamente com *hardware* específico do fabricante, são esses os sistemas proprietários. Alternativamente, existem os controladores *open source*, que podem ser utilizados sem custo de *software* para o usuário. Por funcionar em Computadores

Pessoais (PCs), alguns controladores CNC ganharam bastante destaque e são amplamente utilizados em projetos pessoais, entre eles pode-se citar o EMC e o MACH3.

2.1.3.1 EMC2

Depois de desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST), o *Enhanced Machine Controller* (EMC) se tornou um *software* de domínio público em 2000. Em sua versão mais nova o EMC2 emprega como padrão a linguagem neutra da norma RS-274D (Código G). O EMC2 inclui um intérprete RS274NGC com a finalidade de controlar: o planejador da trajetória de movimento, os *drivers* do motor/atuador em tempo real e a interface do usuário (PAREDES; EDUARDO, 2013).

2.1.3.2 MACH3

Vários usuários de máquinas CNC utilizaram, utilizam, ou ouviram falar sobre o programa MACH3. Sem dúvida é o *software* controlador mais popular disponível (OVERBY, 2010). Esse programa funciona em plataforma de Computadores Pessoais (PC), com o sistema operacional *Windows*, e pode controlar até 6 eixos simultaneamente. O MACH3 permite customizações por meio de criação de interfaces, botões, funções e entradas de dados adequadas às necessidades de operações específicas. Sua interface é desenvolvida na linguagem *Visual Basic* e integrado ao *software* há um editor.

O MACH3 pode utilizar placas externas de controle de vários fabricantes, para isso basta incorporar as bibliotecas associadas no programa. Além de um PC onde o *software* é processado, o controlador necessita de uma placa de controle externa para fazer o controle em tempo real do movimento dos eixos da máquina-ferramenta. Devido a essa flexibilidade de *hardware* que pode ser obtida com o MACH3, Alvares *et al.* (2017) fez um *retrofitting* de um braço robótico tornando o equipamento mais flexível para programações didáticas.

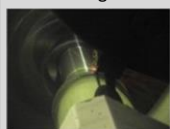
2.2 MONITORAMENTO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA

Nas últimas décadas com o objetivo de garantir melhor qualidade, redução de custos e aumento de produtividade muitas mudanças ocorreram na indústria metal mecânica. Para atingir esses objetivos, o monitoramento em tempo real é claramente um dos requisitos mais importantes (DU; ELBESTAWI; WU, 1995). Dessa forma pode-se prever, por exemplo, através das variáveis monitoradas a qualidade da peça final. Com o Monitoramento da Condição de Máquina (MCM) é possível avaliar os componentes da própria máquina-ferramenta. No caso do monitoramento das ferramentas de corte existe a área específica do Monitoramento de Condição da Ferramenta (TCM). Juntos o MCM e o TCM são linhas de pesquisas largamente estudadas (GOYAL; PABLA, 2015), por exemplo, em seu trabalho Zhu et al (2004) realizou medições de emissões acústicas para detecção de falhas na ferramenta de corte. Rivero et al (2008) avaliou o desgaste de ferramenta de corte no processo de fresamento de alta velocidade, por meio do monitoramento da potência de corte, chegando à conclusão que o fenômeno de abrasão foi o grande vilão para deterioração da ferramenta. Wang et al (2016) conseguiu obter dados diretamente do Controlador Lógico Programável (CLP) do sistema CNC da SIEMENS e inferir o estado da ferramenta de forma confiável. Em um contexto mais atual, Lee et al (2018) demonstra a importância dos sistemas de monitoramento para as fábricas inteligentes em termo de compatibilidade de dados, comunicação, sistemas CPS e fábricas virtuais, relacionando-os a Internet das Coisas (IoT), Computação nas nuvens (CP) e o gerenciamento de grandes quantidades de dados.

Em se tratando do monitoramento de vibrações mecânicas, por exemplo, as máquinas-ferramenta possuem várias fontes de oscilações, umas são inerentes ao funcionamento dos componentes internos, outras, são oriundas dos processos de usinagem. Sistemas mecânicos alternativos ou componentes rotativos como rolamentos, motores, caixas de engrenagens, eixos, turbinas, motores elétricos produzem baixo nível de vibrações quando projetados corretamente (GOYAL; PABLA, 2015). Em adição as vibrações provenientes do funcionamento da máquina-ferramenta, existem as oscilações geradas durante o fenômeno de corte do material. Esses fenômenos podem afetar a produção por meio da queda de qualidade ou pelo aumento dos custos, seja ele de produção, material ou tempo (LAURO *et al.*, 2014).

Os sistemas de TCM e MCM envolvem etapas de aquisição, processamento e interpretação dos sinais monitorados. Na Figura 7, está ilustrado um quadro geral com as etapas e processos de um sistema TCM.

Figura 7- Estrutura TCM

Usinagem	→	Sinais	→	Processamento	→	Classificação	→	Ferramenta
Montagem 	Sensor	Força Emissão acústica Vibração Corrente Imagem		Análise de amplitude Análise de Fourier Análise de Wavelet Estatística Séries temporais	Recursos	Séries temporais LDA NN Cluster HMM	Estimativa	Desgaste Quebra Fratura Falha Ranhuras

Fonte: Adaptado de Lauro *et al.* (2014).

A fase inicial do processo de monitoramento, acontece com a montagem do sensor na máquina e termina com a análise dos resultados quanto aos diversos danos na ferramenta ou até mesmo a qualidade da superfície usinada. Entre essas fases, tem-se a aquisição de sinais, o processamento e a classificação dos grupos de dados. Diferentes métodos podem ser aplicados no processamento de sinais, análise de amplitude, análise de Fourier, Wavelet, etc. Cada caso precisa ser avaliado para escolha da técnica adequada (LIANG; HECKER; LANDERS, 2004). Apesar do esquema da Figura 7 ilustrar o desenvolvimento de uma sistema TCM, a mesma metodologia pode ser aplicada a um sistema MCM, o que muda é apenas a finalidade.

2.2.1 Medição Direta e Indireta

De acordo com Teti *et al* (2010), as técnicas de monitoramento das condições de usinagem se dividem em dois grupos:

- Medição direta: Neste caso o valor real da variável medida fornece um elevado grau de precisão e exatidão. A utilização deste método implica na interrupção do processo para medição direta da ferramenta ou componente da máquina.
- Medição indireta: Neste caso o valor real da variável medida é deduzido utilizando determinadas correlações empíricas. É menos precisa que uma medição direta e requer modelos matemáticos específicos. Nesse caso a aquisição de dados é realizada concomitantemente ao processo de usinagem.

O Quadro 1 fornece alguns exemplos de métodos de medição direta e indireta.

Quadro 1 - Exemplos de métodos de medição direta e indireta

Método	Procedimento	Medição	Transdutor/Sensor
Diretos	Óptico	Contorno ou posição da aresta de corte (região desgastada).	Câmera CCD; sensor de fibra óptica; microscópio.
	Perda volumétrica global da ferramenta	Tamanho e concentração de partículas desprendidas da ferramenta no cavaco.	Análise via radioatividade: espectrofotômetro e cintilador; análise eletroquímica.
	Resistência da junção	Alterações na resistência elétrica da junção ferramenta-peça.	Voltímetro
	Tamanho da peça	Dimensão da peça.	Micrômetros; transdutor: óptico, pneumático, ultrassom, eletromagnético.
	Distância ferramenta-peça	Distância entre a peça e a ferramenta ou suporte.	Micrômetro; transdutor indutivo (LVDT ³), capacitivo ou ultrassom.
Indiretos	Força de usinagem	Alterações no comportamento da força.	Dinamômetros: piezelétricos ou resistivos (<i>strain-gauge</i>); sensor de torque no eixo-árvore.
	Emissão acústica ⁴	Ondas de deformação plástica.	Transdutor piezelétrico.
	Som	Ondas acústicas.	Microfone.
	Vibração	Oscilações da ferramenta e/ou suporte.	Acelerômetro piezelétrico.
	Temperatura	Variação da temperatura na região de corte.	Termopar; pirômetro; reflexão da superfície do cavaco ou sua coloração.
	Potência	Potência ou corrente consumida no motor (avanço ou rotação).	Amperímetro; sensor de corrente; sensor de potência.
	Acabamento da superfície usinada	Mudanças na rugosidade da superfície.	Rugosímetro; laser; métodos ópticos: sensor de fibra óptica, câmera CCD.

Fonte: (SOUZA, 2004).

Os métodos de medição direta são mais aplicados em escala de laboratório pois são mais demorados e implicam em perda de produtividade. Os métodos de medições indiretas são mais utilizados no ambiente fabril, por serem realizados concomitantemente ao processo de usinagem. A escolha do tipo de sensor e transdutor é muito específica, e deve ser estudada detalhadamente de acordo com as condições específicas do processo.

2.2.2 Medição de Vibrações Mecânicas

Diagnóstico é a arte de determinar a saúde da máquina a partir de seus sinais ou sintomas, para corrigir o que é a falha e identificar qual elemento do sistema é afetado (GOYAL; PABLA, 2015). Cada máquina tem um comportamento vibratório particular que são conhecidos como assinaturas de vibração, e podem fornecer informações importantíssimas para a manutenção preditiva, risco de falhas catastróficas e ainda avaliar as condições de corte (LAURO *et al.*, 2014).

A vibração é um movimento ondulatório que pode ser avaliado em termos de deslocamento, velocidade e aceleração; quanto à forma da onda senoidal, randômica, de impulso; valor instantâneo; valor pico-a-pico; valor eficaz; período e frequência; etc. Uma oscilação de forma senoidal pode ser expressa pela Equação (1):

$$y = y_0 \operatorname{sen}(\omega t + \theta) \quad (1)$$

onde 'y' é o valor instantâneo do deslocamento no instante 't', 'y₀' é a amplitude do deslocamento 'ω' é a frequência angular; 'θ' é a fase.

Derivando a Equação (1) uma vez pode-se obter valores para a velocidade de vibração expressos na Equação (2) e derivando-a novamente obtém-se os valores de aceleração determinados pela Equação (3):

$$v = v_0 \cos(\omega t + \theta) = v_0 \operatorname{sen}(\omega t + \theta + \pi/2) \quad (2)$$

$$a = -a_0 \operatorname{sen}(\omega t + \theta) = a_0 \cos(\omega t + \theta + \pi/2) \quad (3)$$

Inerente ao desgaste dos componentes de uma máquina-ferramenta, as vibrações mecânicas mudam de comportamento. A avaliação da amplitude do deslocamento, velocidade e aceleração das vibrações são essenciais na investigação do desgaste da ferramenta, avaliação da qualidade superficial de peças usinadas e/ou no monitoramento da condição de máquina.

2.2.2.1 Sinais no Domínio da Frequência

As vibrações geradas pelos componentes de uma máquina possuem frequências características que não são modificadas, apesar de sua amplitude variar

de uma local para o outro (GOYAL; PABLA, 2015). Por exemplo, imaginando-se que uma *router* esteja ligada em vazio a intensidade das vibrações oriundas do desbalanceamento residual no eixo do *spindle* é muito maior em sua própria carcaça se comparada a uma medição feita na mesa da máquina. A análise no domínio da frequência dos sinais de vibração é amplamente empregada no diagnóstico de falhas (WANG, LIHUI WANG; GAO, 2006). A Transformada de Fourier (FT) é uma representação no domínio da frequência de um sinal no domínio do tempo. A Equação (4) tem-se a representação da FT:

$$F(\omega) = Ff(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (4)$$

Para sistemas discretos a Transformada de Fourier sofre algumas adequações (OPPENHEIM; SCHAFER, 2009) e o resultado final é expresso pela Transformada de Fourier Discreta (DFT) demonstrada na Equação (5).

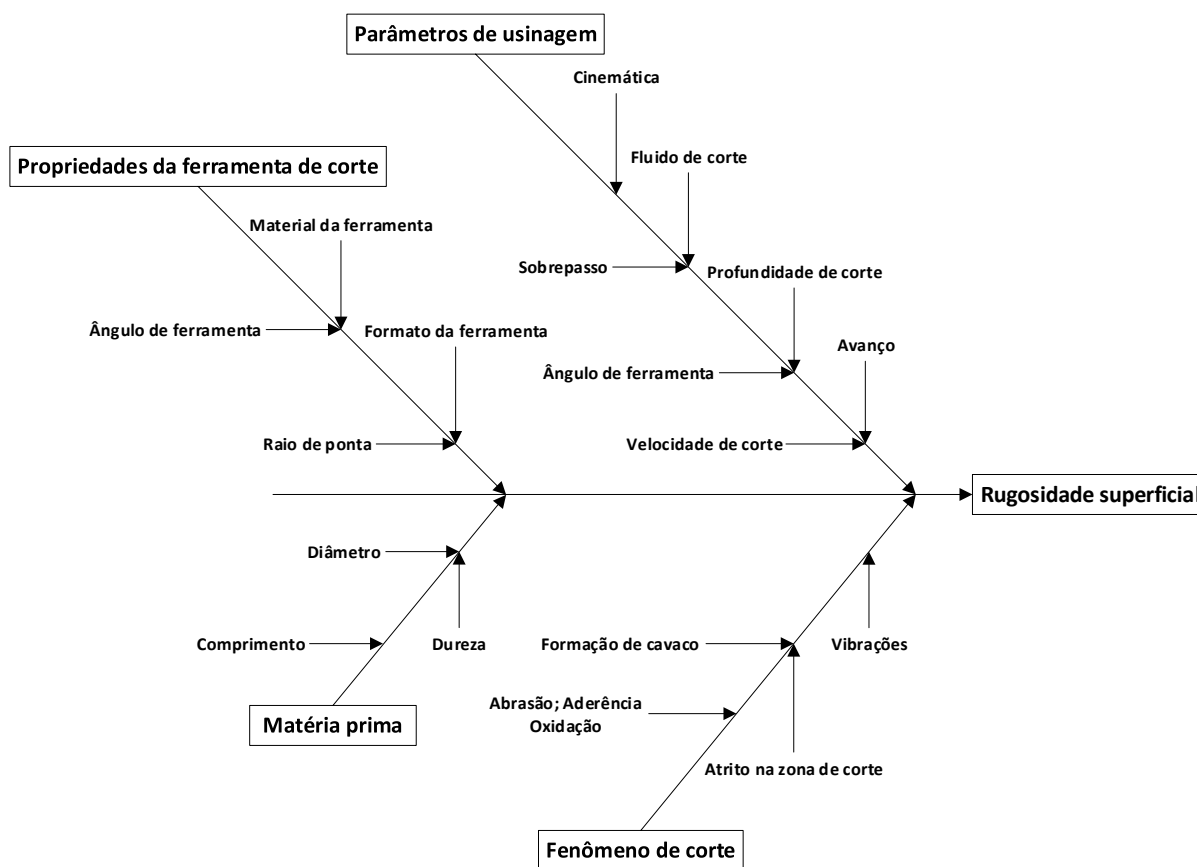
$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{kn}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (5)$$

Onde $X[k]$ é uma sequência periódica com N períodos.

2.2.3 Rugosidade Superficial e Vibrações Mecânicas

A rugosidade superficial é um fator crítico na mecânica de precisão e está intimamente ligada à aplicação, durabilidade, intercambialidade e confiabilidade dos produtos usinados. A rugosidade é formada como resultado da passagem da aresta de corte da ferramenta repetidas vezes ao longo do comprimento da peça segundo uma velocidade de avanço estabelecida durante o processo de usinagem (JANG *et al.*, 1996). Muitas vezes para atingir o nível de rugosidade requerido no projeto mecânico são necessários processos de acabamento como o polimento, brunimento e a retificação. São vários os fatores que influenciam na rugosidade superficial de uma peça fabricada por processos de usinagem. Parâmetros de corte, tipo de ferramenta de corte, material da peça, fluidos de cortes são alguns dos fatores importantes no acabamento superficial. O Diagrama de causa e efeito mostrado na Figura 8 ilustra os principais fatores que causam variações de rugosidade superficial sintetizados por Benardos e Vosniakos (2017).

Figura 8 - Parâmetros que influenciam na rugosidade superficial



Fonte: Adaptado de Benardos e Vosniakos (2003).

Como pode-se observar na Figura 8, são várias variáveis que influenciam na rugosidade superficial e esse assunto é amplamente abordado por pesquisadores. Nos primeiros estudos científicos, a relação de causa e efeito para a rugosidade eram obtidas depois de forma direta, ou seja, as peças eram avaliadas após a fabricação. Atualmente, redes neurais e inteligência artificial são capazes de prever o resultado da rugosidade superficial durante o processo de usinagem (MISAKA *et al.*, 2020).

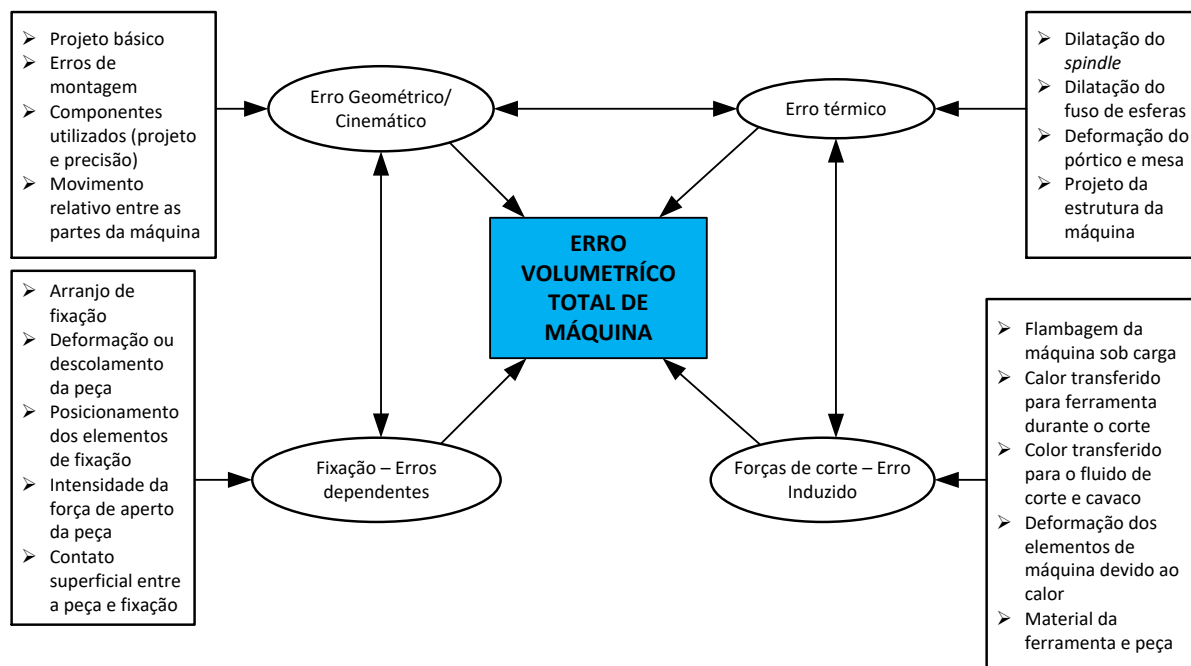
Pesquisas mitigadoras no que tange a medição direta da rugosidade superficial foram desenvolvidas por Taraman (1974), Seireg e Lindberg (1976) e Osman e Sankar (1975) cujo o principal objetivo foi correlacionar a rugosidade superficial com os parâmetros de corte. Nessas pesquisas, as medições da rugosidade eram realizadas após a fabricação, não havendo assim um monitoramento concomitante ao processo. Posteriormente surgiram os sistemas para o monitoramento *online* da rugosidade superficial como, por exemplo, a pesquisa pioneira de Jang *et al.* (1996) cujo sinal de acelerômetro em conjunto com um algoritmo foi utilizado para determinar a rugosidade

em tempo real. Várias vantagens são obtidas ao monitorar constantemente o processo de usinagem, entre elas pode-se destacar a melhoria no controle de qualidade, diminuição de desperdícios, diminuição de retrabalhos, economia de tempo e energia. Nessa mesma linha, Abouelatta e Ma (2001) criaram um modelo matemático para prever a rugosidade superficial baseado nos parâmetros de corte e análise do sinal de vibrações no domínio da frequência como auxílio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Nesse artigo foram medidas as componentes de vibrações radiais e axiais ao eixo da ferramenta corte e posteriormente foi aplicada a FFT para entrada dos dados no modelo matemático que apresentou resultados satisfatórios no cálculo da rugosidade. Com maior nível de robustez Duro *et al.* (2016) desenvolveram um sistema de monitoramento baseado em três sensores de Emissão Acústica (AE) marcando uma nova era para os sistemas de monitoramento da usinagem que antes eram baseados em apenas um sensor. Em seu artigo de revisão Mouli *et al.* (2020) destaca a importância da fusão de múltiplos sensores para a otimização da usinagem de Nano Metais de Matriz Compósita (NMMC). Nesse artigo o autor evidencia a necessidade de um sistema de monitoramento baseado em medições de temperatura, vibração, corrente elétrica e etc diante da dificuldade de usinagem de materiais com nanopartículas.

2.3 ENSAIOS GEOMÉTRICOS DE MÁQUINAS-FERRAMENTA

As máquinas-ferramenta não são perfeitas e vários erros são inerentes ao seu funcionamento (RAMESH; MANNAN; POO, 2000). Cada eixo linear apresenta seis tipos de erros diferentes, um erro de posicionamento, dois erros de retitude e três desvios angulares: guinamento, rolamento e tombamento para os eixos horizontais (MAJDA, 2012). Em adição a esses erros, existem também os erros de perpendicularidade entre os eixos da máquina, totalizando assim 21 fontes de erro para uma máquina ferramenta de 3 eixos (ZHANG *et al.*, 1988). Para os eixos de rotação existe um erro de posicionamento e dois erros de movimentação radial. Esses erros geométricos são causados por vários fatores, como erros cinemáticos, erros termomecânicos, variações de carga, forças dinâmicas, controle de movimento e programas de controle (BOHEZ, 2002). No diagrama da Figura 9 estão apresentadas as principais fontes de erro numa máquina ferramenta.

Figura 9 - Visão geral das fontes de erro em uma máquina-ferramenta e os fatores que o afetam



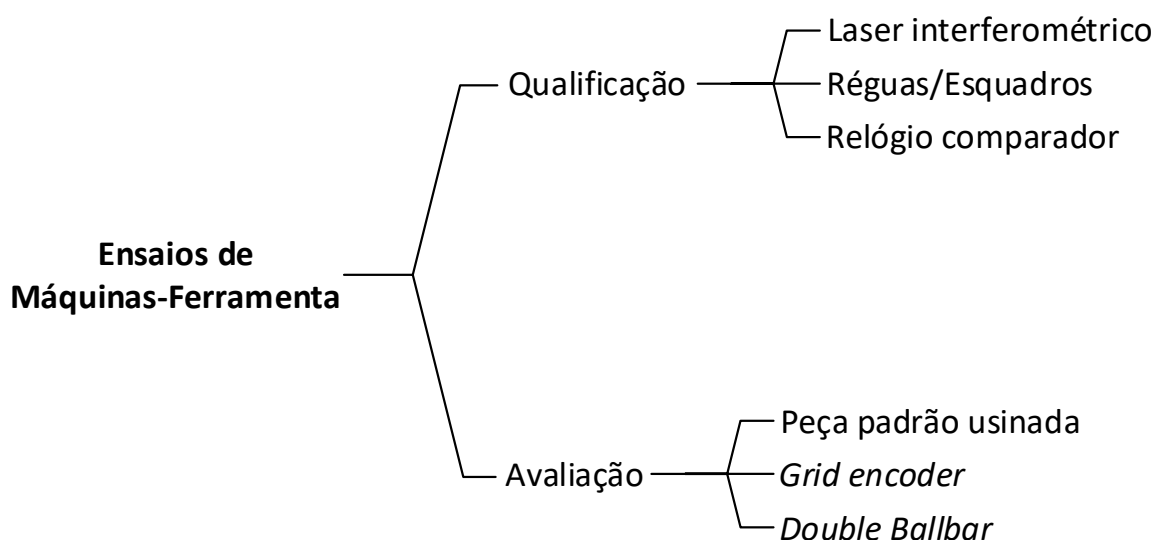
Fonte: Adaptado de Ramesh, Mannan e Poo (2000).

Para apresentar uma boa qualidade geométrica das peças produzidas, toda a máquina-ferramenta precisa ser geometricamente calibrada antes de entrar em operação (BRINGMANN; KNAPP, 2009). No campo de estudo dos erros geométricos, inicialmente foram estudadas as fontes de erro, elaborados modelos matemáticos capazes de descrever o comportamento da máquina. Numa etapa posterior foram efetivamente implementados os compensadores de erros em máquinas, sendo considerado o trabalho desenvolvido por Ferreira e Liu (1986) um dos pioneiros.

Os erros das máquinas podem ser identificados através de ensaios e com o auxílio de modelos matemáticos para calculá-los. Por meio dos ensaios geométricos são obtidos os parâmetros para esses modelos matemáticos. A obtenção desses parâmetros pode ser feita de forma direta ou auto calibrada (SARTORI; ZHANG, 1995). Na forma direta os parâmetros são obtidos diretamente por medidas feitas com auxílio de equipamentos específicos, por exemplo os lasers interferométricos. Nos métodos de auto calibrados, uma peça padrão com parâmetros geométricos conhecidos é usinada no volume de trabalho da máquina e posteriormente medida para a obtenção dos parâmetros e cálculo dos erros. Os ensaios geométricos em si podem ser divididos em duas categorias, são eles: os ensaios de avaliação e os

ensaios de qualificação (SOUSA, 2000). Os ensaios de qualificação são mais complexos, envolvem um elevado custo e mão-de-obra qualificada para sua realização. Esses ensaios fornecem separadamente as fontes de erro que podem ser compensadas por meio de corretores no controlador CNC. Os ensaios de avaliação fornecem resultados gerais cujas as fontes de erro estão sobrepostas sendo difícil ou não viável sua separação. O Diagrama apresentado na Figura 10, mostra uma classificação geral dos ensaios quanto à finalidade e forma com que ele é realizado.

Figura 10 – Classificação de alguns ensaios geométricos de máquinas-ferramenta



Fonte: O Autor (2021).

Na divisão esquemática apresentada na Figura 10, como exemplo de um ensaio de qualificação tem-se o laser interferométrico cuja aplicação requer a utilização de equipamentos caros e mão-de-obra especializada. Por outro lado, existem os ensaios de avaliação que utilizam procedimentos mais simples. Um ensaio de avaliação comum é realizado com a fabricação de peças padrões usinadas. Com esse tipo de ensaio é possível mensurar vários parâmetros geométricos e avaliar a máquina ferramenta de forma generalista (SOUSA, 2000). Assim, pode-se afirmar se uma determinada máquina-ferramenta atende ou não atende às tolerâncias dos parâmetros especificadas em norma, mas não se pode identificar precisamente a origem do erro. Por exemplo, na metodologia de avaliação de centros de usinagem CNC desenvolvida por Araújo (2019), foram fabricadas peças-teste padrões e o resultado dos erros medidos serviram apenas para atestar se a máquina-ferramenta

atende ou não as tolerância estabelecidas na norma NBR NM ISO 10791-7:1999 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1999a).

Alternativamente, vários pesquisadores desenvolveram seus próprios métodos de qualificação das máquinas-ferramenta a fim de gerar menores custos e simplificar o processo. Por exemplo, no trabalho desenvolvido por Trapet e Wäldele (1991), uma peça padrão e simples equipamentos de medição foram utilizados para determinar os erros em máquinas-ferramenta e Máquinas de Medição por Coordenadas (MMC). No artigo de Xing et al. (2018) foram encontrados resultados aceitáveis para medição de erro com um artefato de esferas desenvolvido pelos próprios autores.

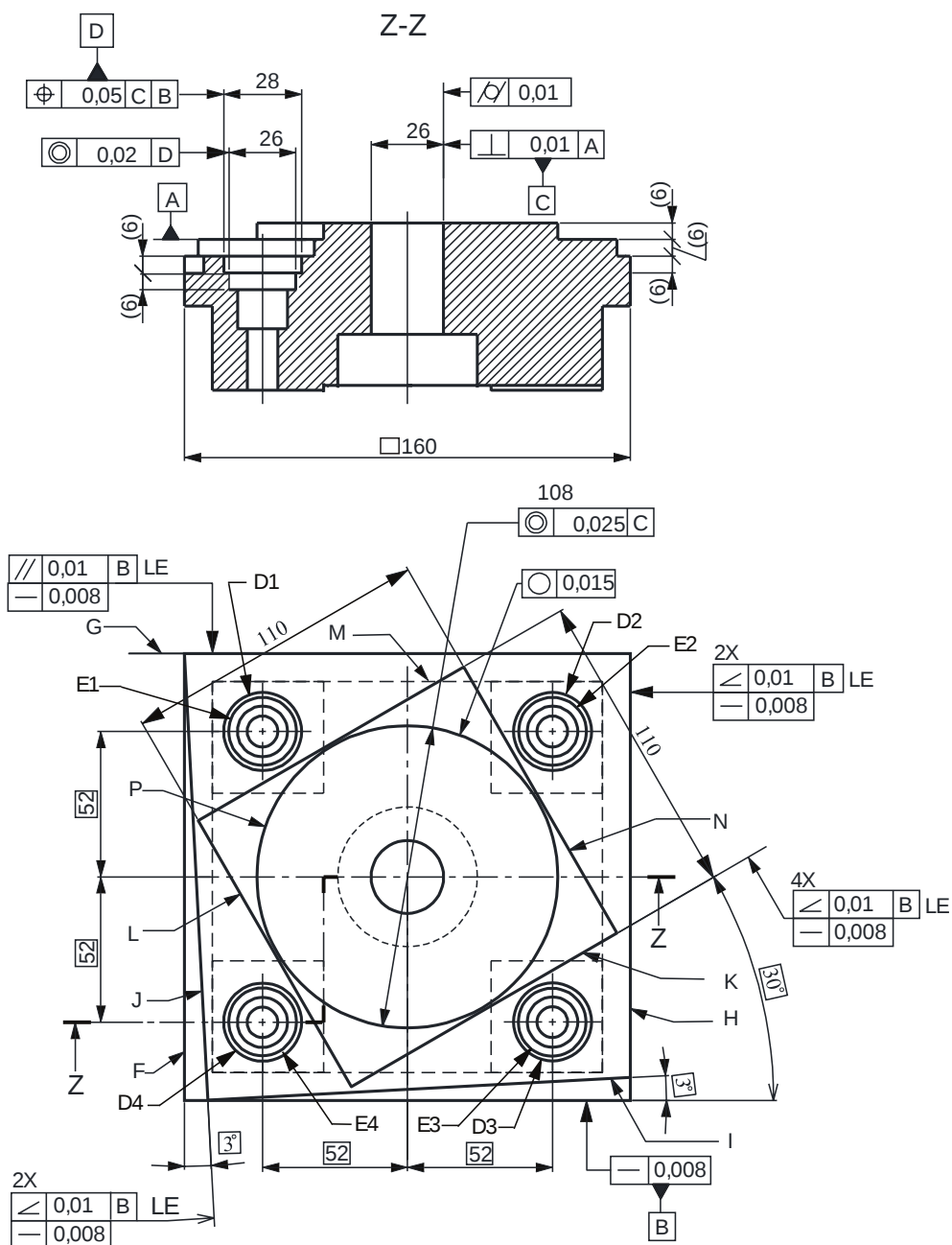
2.3.1 Avaliação por Usinagem de Peças-Teste

Uma forma de se avaliar uma máquina-ferramenta com controladores CNC é usinar uma peça padrão e medi-la. Diferentemente dos ensaios de qualificação, nos ensaios de avaliação a usinagem de peças-teste é utilizada para fornecer o diagnóstico acerca dos erros geométricos da máquina sem a identificação direta de sua origem. Assim não é possível se obter valores para os corretores do controlador CNC, pois, apenas são avaliadas as características geométricas da peça produzida. Além das peças-teste definidas em normas, alguns pesquisadores desenvolveram suas próprias peças-teste a fim de criar processos mais simples e práticos.

2.3.1.1 Norma ABNT NBR NM ISO 10791-7:1999

Nessa norma uma peça padrão é definida para a avaliação de máquinas-ferramenta que possuem um sistema de controle CNC. A norma ABNT NBR NM ISO 10791-7:1999 faz referência à várias outras normas, e em destaque a norma ABNT NBR NM-ISO 230-1:1999 que explica como fazer os procedimentos de fixação da peça e medição dos parâmetros (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1999a, b). A norma ABNT NBR NM ISO 10791-7:1999 não determina uma ordem na execução da usinagem da peça-teste, ficando a critério do executor o estabelecimento de uma metodologia. A Figura 11 mostra a geometria da peça-teste, com os tipos e valores de tolerância estabelecidos na referida norma.

Figura 11 – Peça-teste ABNT NBR NM ISO 10791-7:1999



Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1999a).

2.3.2 Tolerâncias Geométricas

As tolerâncias geométricas devem ser especificadas de acordo com os requisitos de funcionalidade (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2017). Uma tolerância geométrica aplicada a um elemento determina uma zona de tolerância na qual esse elemento deve estar contido. Baseada nas definições da norma ISO 1101:2017, as tolerâncias geométricas avaliadas neste trabalho estão mostradas no Quadro 2.

Quadro 2 - Tolerâncias Geométricas

Tolerância	Característica	Símbolo	Definição simplificada
Forma	Retitude	—	A linha mediana medida no elemento avaliado deve estar contida entre duas linhas paralelas separadas pelo valor da tolerância
	Circularidade	○	Uma circunferência medida no elemento avaliado deve estar contida entre duas outras circunferências concêntricas separadas pelo valor da tolerância
	Cilindricidade		Um cilindro medido no elemento avaliado deve estar contido entre dois outros cilindros coaxiais com a diferença entre os raios determinada pela tolerância
Orientação	Paralelismo	//	A linha mediana medida no elemento avaliado deve estar compreendida entre dois planos que por sua vez são paralelos ao elemento de referência. A separação entre esses dois planos é definida pela tolerância
	Perpendicularidade		A linha mediana medida no elemento avaliado deve estar compreendida entre dois planos que por sua vez são perpendiculares ao elemento de referência. A separação entre esses dois planos é definida pela tolerância
	Angularidade	∠	A linha mediana medida no elemento avaliado deve estar compreendida entre dois planos que por sua vez formam um ângulo exato com o elemento de referência. A separação entre esses dois planos é definida pela tolerância
Localização	Posição		A linha mediana deve estar dentro de uma zona cilíndrica de diâmetro determinado pela tolerância, cujo eixo coincide com a posição teoricamente exata do furo considerado, em relação aos planos de referência
	Concentricidade		O centro do círculo interno medido deve estar dentro de um círculo de diâmetro determinado pela tolerância, concêntrico com o ponto de referência definido na mesma seção transversal

Fonte: O Autor (2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os procedimentos, técnicas e montagens experimentais utilizadas para a implantação do controle CNC na *router* e do sistema de monitoramento embarcado.

3.1 PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE CNC

Este trabalho teve início concomitante ao trabalho de Silva (2018) cuja *router* projetada e fabricada está mostrada na Figura 12. Atendendo aos objetivos propostos no Capítulo 1, a primeira etapa para a implementação do sistema de controle CNC foi a seleção e dimensionamento de seus componentes. Esses componentes são os mais diversos possíveis como parafusos, cabos, eletrodutos, motores, *drivers*, fontes de alimentação, botoeiras, sensores, bornes, controlador CNC etc. Todos esses itens são essenciais para o funcionamento da máquina de forma correta e segura.

Figura 12 - *Router* CNC

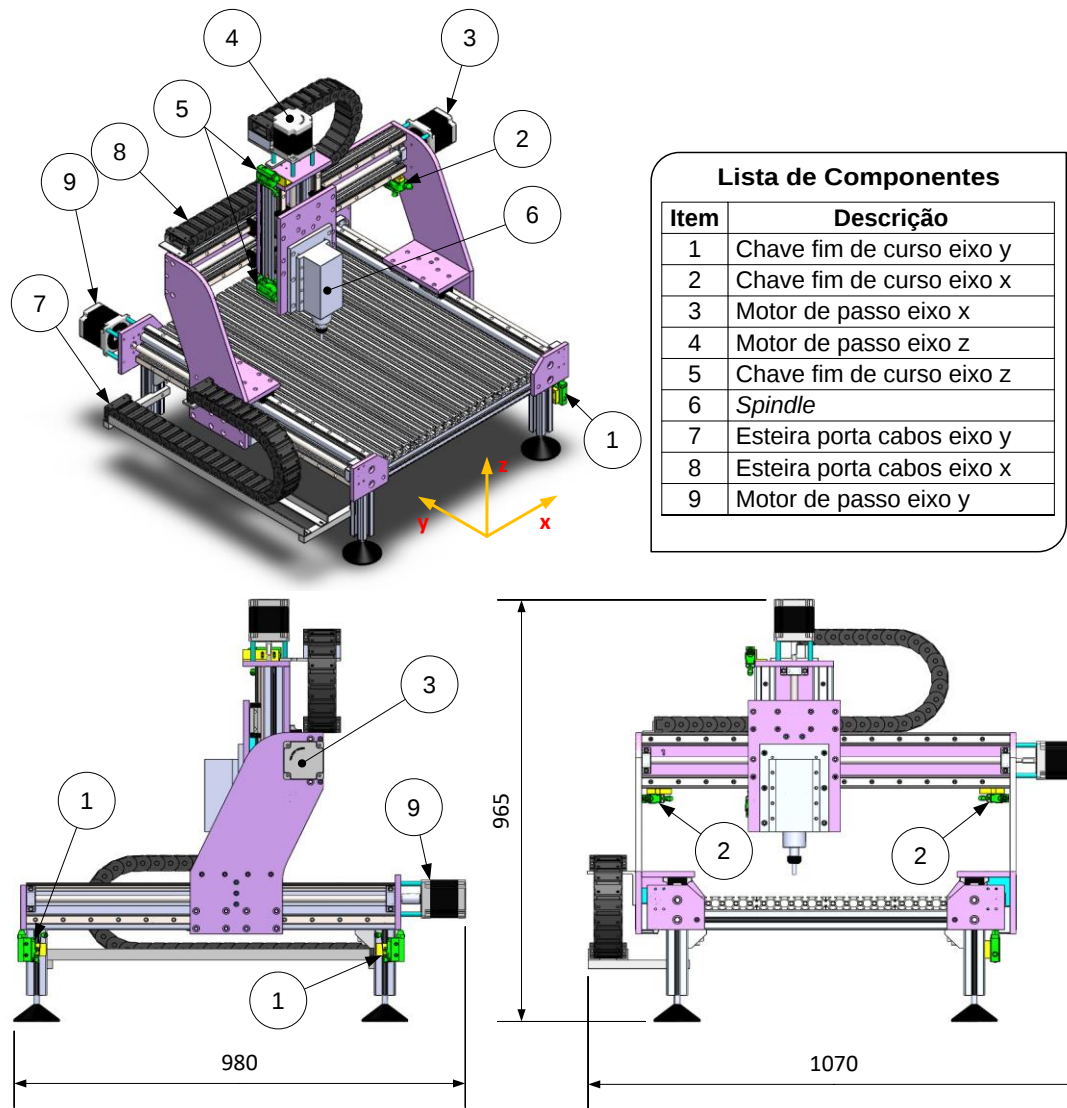


Fonte: O Autor (2021).

Da Figura 12, observa-se que a máquina apresenta basicamente sua estrutura mecânica com alguns motores fixados. Essa foi uma condição provisória de funcionamento para os testes iniciais de deslocamento realizados por (SILVA, 2018). Para tornar possível a usinagem de peças na *router*, fisicamente na máquina, por exemplo, são necessárias vias para a acomodação dos cabos elétricos uma vez que os motores e alguns componentes são movimentados durante a usinagem. Por meio

de um projeto em CAD desenvolvido no programa SolidWorks, alguns componentes do sistema de controle CNC da *router*, estão ilustrados na Figura 13.

Figura 13 - Componentes do sistema de controle CNC da *router*



Fonte: O Autor (2021).

Na Figura 13, as esteiras porta cabos (itens 7 e 8) escolhidas são fabricadas pela empresa IGUS e da série R48 que possuem resistência ao cavaco e abrigam de forma segura os cabos elétricos durante a movimentação do pórtico (eixo Y) e do *spindle* (eixo X). Pela esteira 7 passam os cabos do *spindle*, dos sensores de fim de curso dos eixos X e Z e dos motores dos eixos X e Z. Na esteira 8, a quantidade de cabos é menor, pois, através dela apenas os sensores e atuadores do eixo Z são conectados. Ainda na Figura 13, podem ser observadas também as chaves fim de curso (itens 1, 2 e 5) instaladas nos eixos da máquina. Cada uma das chaves de fim

de curso além de proteger a máquina ao evitar choques físicos também possuem a função de referência para sistema de coordenadas da *router*. Os motores de passo (itens 3, 4 e 9) são fundamentais para o acionamento dos fusos e consequentemente o deslocamento dos eixos X, Y e Z da máquina ferramenta. O *spindle* (item 6) é um motor responsável pela rotação da ferramenta de corte segundo uma velocidade de corte definida pelo operador. O dimensionamento desses motores será detalhadamente abordado na Seção 3.1.1. Além desses componentes mostrados na Figura 13, há vários outros equipamentos elétricos e eletrônicos como o controlador CNC e os *drivers* do motores que também fazem parte do sistema de controle CNC (Quadro 4). Em resumo, ao longo dos subtópicos seguintes serão abordados vários componentes do sistema de controle CNC.

3.1.1 Dimensionamento dos Motores

Um dos elementos essenciais do sistema de controle CNC são os motores, pois, o processo de usinagem acontece pela remoção de material devido ao movimento relativo entre a peça e a ferramenta de corte (FERRARESI, 1970). Em muitas ocasiões há o movimento concomitante dos três eixos da máquina em função da superfície a ser usinada. Para calcular a potência necessária dos motores, levou-se em consideração que durante o corte as solicitações mecânicas são elevadas e para estimá-las foram realizados cálculos analíticos considerando uma condição crítica de corte. Nessa condição os parâmetros críticos foram determinados no projeto de Silva (2018) e estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros críticos de corte

Parâmetros de Críticos de corte	
Profundidade de corte (a_p)	3 mm
Largura de corte (a_e)	12 mm
Velocidade de avanço (v_a)	1000 mm/min
Rotação (n)	2000 rpm
Avanço por dente (f_z)	0,125 mm/dente
Velocidade de corte (K_c)	75,4 m/min
Rendimento do motor (η)	80%
Coeficiente de força específica de corte (K_c)	2000 MPa

Fonte: (SILVA, 2018).

Os parâmetros apresentados na Tabela 2, estão baseados no fresamento frontal de um aço com baixo carbono por meio de uma fresa de topo em aço rápido com quatro arestas de corte. A partir dos dados da Tabela 2, foram calculadas as forças, potências e torques que estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultado das forças e potências de corte

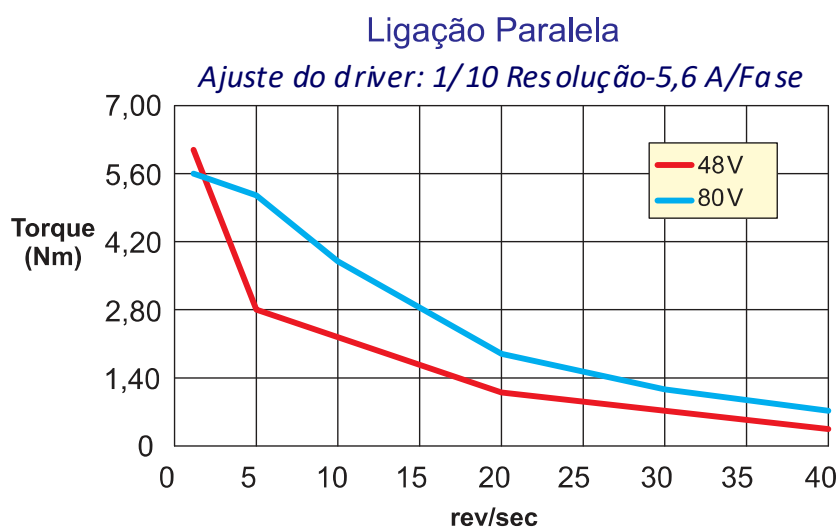
Potências, Forças e Torque	
Potência de Corte	1,5 kW
Potência de Avanço	15 W
Força de Corte	1,2 kN
Força de Avanço	92 N
Torque do Motor de Passo	2 N.m

Fonte: (SILVA, 2018).

Os valores de potência, força e torque apresentados na Tabela 3 foram fundamentais para a escolha dos motores e dimensionamento da estrutura da máquina. Esses motores são responsáveis pela geração dos movimentos de corte e avanço durante o processo de usinagem, e dessa forma fornecem o torque necessário para a movimentação dos eixos de translação e rotação da ferramenta de corte. Em relação a estrutura física da *router*, para suportar as forças oriundas do processo de corte, foram utilizados perfis estruturais em alumínio de baixa densidade e consequentemente menor inércia tornando a movimentação dos eixos mais rápida, estável e com menor consumo de energia (SILVA, 2018). A aquisição dos motores do sistema de controle CNC foi realizada posteriormente ao processo de projeto uma vez que os requisitos foram definidos nessa etapa. Testes iniciais de movimentação dos eixos foram realizados no trabalho de Silva (2018) exclusivamente para ajustes mecânicos da máquina. Nessa etapa foram ajustados os alinhamentos das guias lineares nos três eixos da máquina verificando-se o paralelismo entre as guias do mesmo eixo e a perpendicularidade entre as guias de eixos diferentes. Todas as medidas tomadas para o alinhamento dos eixos foram feitas com auxílio de um relógio comparador. Uma avaliação mais aprofundada sobre as tolerâncias geométricas, foi realizada a partir de uma peça-teste usinada na presente *router* e está descrita na Seção 3.3. Essa avaliação forneceu não somente os limites possíveis de tolerâncias atingíveis pela *router*, como também o teste completo do sistema de controle CNC.

Inicialmente, foi selecionado o motor de acionamento da ferramenta de corte (*spindle*) com potência de 2,2 kW que pode funcionar em rotações que variam de 7.500 RPM a 24.000 RPM. Para o acionamento dos eixos X, Y e Z foram selecionados motores de passo da marca Kalatec modelo KML093F07 cujo torque estático é 9 N.m e torque dinâmico varia em função da tensão de operação, rotação e algumas configurações do *driver* como mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Curva do motor de passo KTC-KML093F07



Fonte: (KALATEC, 2019).

Em resumo, os motores adquiridos para os eixos da máquina estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Motores da *router* CNC.

Eixo	Fabricante	Modelo	Especificações Gerais
X	Kalatec	KTC-KML093F07	Torque: 9 N.m; NEMA34
Y	Kalatec	KTC-KML093F07	Torque: 9 N.m; NEMA34
Z	Kalatec	KTC-KML093F07	Torque: 9 N.m; NEMA34
4º Eixo	Kalatec	KTC-KML093F07	Torque: 9 N.m; NEMA34
<i>Spindle</i>	TECNR	GDZ80*73-2.2	2.2kW; ER 20; 24000 RPM

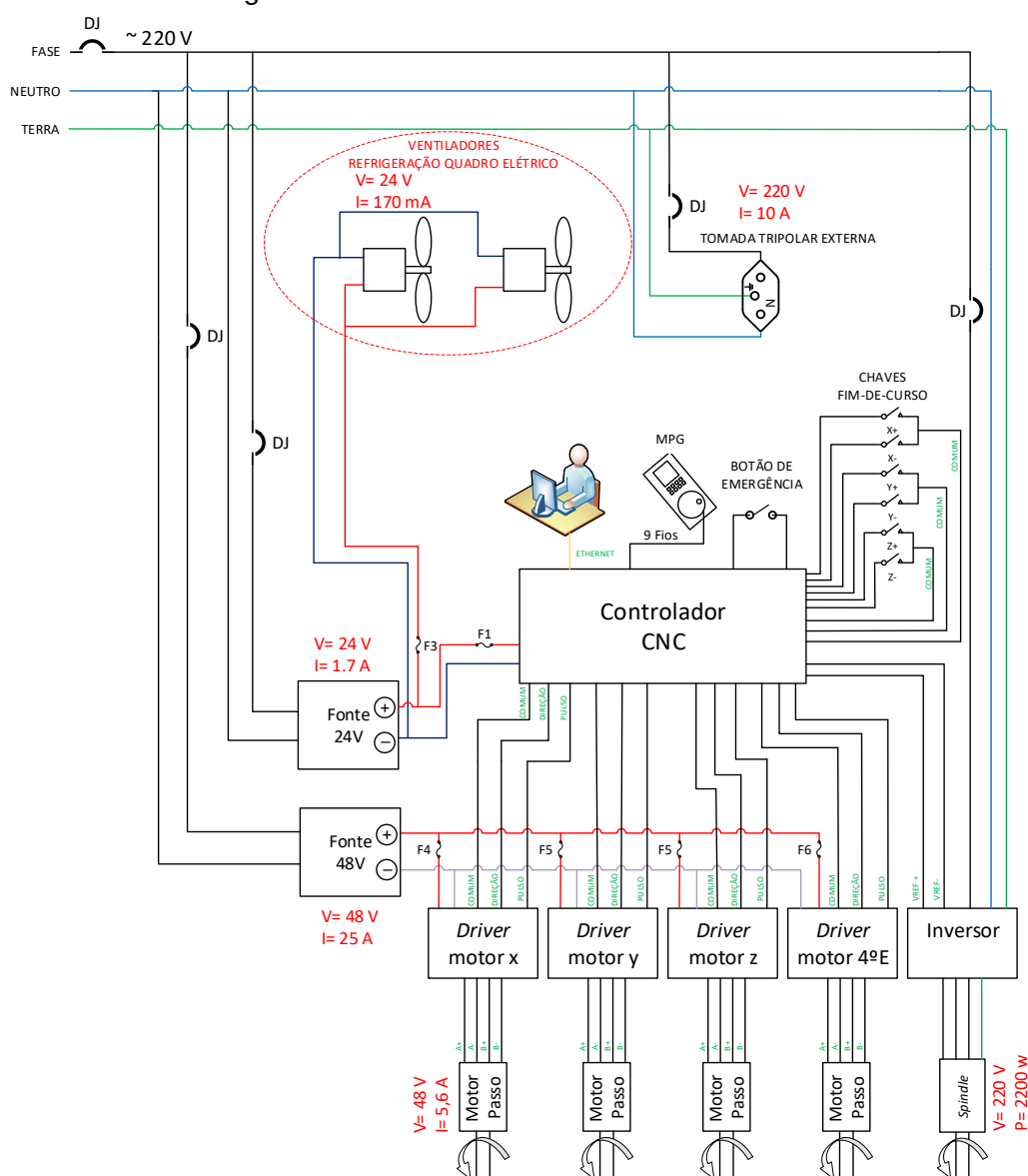
Fonte: O Autor (2021).

Para alimentar o sistema de motores de passo, foi adquirida uma fonte de corrente contínua com tensão de saída de 48 V e corrente útil de 30 A. Considerando a curva para um tensão de 48 V da Figura 14, pode-se atingir o torque necessário para o corte em uma faixa de rotação que varia de 0 a 15 rev/sec.

3.1.2 Malha de Controle

Além dos motores, a malha do sistema de controle CNC tem como equipamento central o controlador CNC e ligado a ele estão vários componentes entre eles: chaves fim de curso, Gerador de Pulso Manual (MPG), botão de emergência, *drivers* dos motores de passo, fontes de alimentação, inversor de frequência do *spindle* e o computador. Esquematicamente, está apresentado na Figura 15, o circuito da malha de controle proposto para automação da *router*.

Figura 15 - Malha do sistema de controle CNC



Fonte: O Autor (2021).

A topologia apresentada na Figura 15, tem como elemento central o controlador CNC e conectado à ele estão os quatro *drivers* dos motores de passo que são

alimentados paralelamente por uma fonte de 48 V. Para o acionamento do *spindle*, foi instalado um inversor de frequência cuja rotação é ajustada por meio de um sinal analógico proveniente do controlador CNC. Em cada eixo coordenado têm-se duas chaves de fim de curso instaladas em sentidos opostos. O MPG está conectado ao controlador por meio de um cabo manga com 9 condutores. A alimentação da placa de controle CNC é feita por uma fonte específica de 24 V a fim de atender às especificações da entrada de tensão da placa de controle que pode variar entre 12 V e 32 V em corrente contínua. Os ventiladores mostrados no esquema da Figura 15, têm a função de refrigerar os componentes do sistemas de controle que estão abrigados no quadro elétrico (Figura 20). Adicionalmente, uma tomada de força tripolar foi inserida ao projeto, fixada externamente ao quando de controle, para ligar equipamentos auxiliares como, por exemplo, um *notebook*.

3.1.3 Controlador CNC

O controlador CNC escolhido para a automação da *router* foi o MACH3 e a placa de controle escolhida foi o modelo NVEM fabricado pela empresa Novusun podendo controlar até seis eixos simultaneamente, ver Figura 16. O *software* MACH3 apresenta flexibilidade de programação e integração com diferentes *hardwares*, podendo ser caracterizado como um sistema OAC definido por Pritschow *et al.* (2001).

Figura 16 – Placa de controle CNC NVEM



Fonte: O Autor (2021).

A interface física do controlador NVEM possui diversas portas de entradas e saídas (I/O) digitais configuráveis cujos terminais podem conectar: sensores de fim de curso, sensor de zero peça, bomba de fluido de corte, lâmpadas, etc. Também nessa interface existem os bornes exclusivos para ligação dos *drivers* dos motores de passo,

Gerador de Pulso Manual (MPG) e o *spindle*. A comunicação entre a placa de controle NVEM e o *software* controlador MACH3 é possível devido à instalação de uma biblioteca fornecida pelo próprio fabricante da placa. A troca de dados entre o controlador e o programa de controle instalado em um PC, ocorre através de um cabo de rede *ethernet* segundo o protocolo de comunicação TCP/IP versão 4. O uso de uma rede *ethernet* torna mais fácil a operação da máquina remotamente, uma vez que ela pode ser conectada à uma rede de computadores. Essa possibilidade de comunicação remota inerente à interface de comunicação da placa NVEM, possibilita a integração de sistemas com diferentes aplicações podem-se tornar ambientes de manufatura IoT como o definido por Zhong e Ge (2018).

3.1.4 Gerador de Pulso Manual (MPG)

O MPG possibilita a operação da *router* por meio de um *joystick* sem a necessidade de o operador inserir comandos diretamente no computador. Por meio de *joystick*, mostrado na Figura 17, o operador pode selecionar diretamente o eixo a ser movimentado, ajustar a rotação do *spindle*, abortar ou iniciar a execução de programas. O MPG escolhido é o modelo NVMPG fabricado pela Novusun.

Figura 17 - Gerador de Pulso Manual



Fonte: O Autor (2021).

O manípulo giratório do MPG pode acionar os eixos X, Y e Z da *router* em três escalas de velocidades distintas são elas: 1x, 10x e 100x. Para escala de 1x a cada divisão do disco o eixo avança 0,001 mm, as outras escalas são múltiplas desse valor em 10 e 100 vezes respectivamente. O display LCD colorido do MPG exibe dinamicamente as coordenadas cartesianas da ferramenta-corte. A vantagem de sua

utilização está na praticidade que ele oferece ao operador no referenciamento do ponto zero peça, ou simplesmente para movimentação dos eixos da máquina com a finalidade de liberação de espaço para fixação do material bruto a ser usinado. Com o MPG a operação de referenciamento do ponto zero peça torna-se mais rápida e segura, pois, o operador não precisa deslocar-se para longe da mesa da máquina a fim de executar comandos de movimentação dos eixos através do PC. Assim, com o MPG toda a movimentação é realizada com a observação próxima do operador diminuindo o risco de colisões. Para a integração do NVMPG com *software* controlador MACH3, é realizada a instalação de uma biblioteca específica fornecida pela Novusun.

3.1.5 Drivers dos Motores de Passo

Capaz de fornecer uma corrente de pico de 7.2 A, o *driver* modelo MA860-DSP é ideal para o acionamento de motores de passo no padrão NEMA 34 da *router* (Quadro 3). Esse *driver* possui configuração de micropasso e corrente elétrica que são realizadas por meio de chaves liga/desliga localizadas entres os conectores de cabos, ver Figura 18.

Figura 18 - Driver MA 860-DSP



Fonte: O Autor (2021).

Através dos terminais de sinais (*Signal*) do *driver* (Figura 18), são recebidos os comandos de pulso e direção enviados pelo controlador CNC MACH3 por meio da placa de controle NVEM a fim de gerar a rotação dos motores de passo. Nesse *driver* todos os cabos são interligados através de conectores removíveis o que facilita bastante o trabalho de montagem e manutenção. As configurações da corrente de saída dos *drivers* e número de passos por revolução utilizados em cada eixo estão exibidas na Tabela 4.

Tabela 4 - Configuração dos *drivers* dos motores de passo

Eixo	Corrente nominal (A)	Corrente de pico (A)	Pulsos/Revolução
X	3,14	3,77	10.000
Y	4,86	3,77	10.000
Z	3,14	3,77	10.000
4º Eixo	3,14	3,77	10.000

Fonte: O Autor (2021).

Para alimentar os *drivers*, foi utilizada uma fonte de 48 V, dessa forma foi possível obter os torques especificados na etapa de projeto (Tabela 3) em função da curva de resposta dos motores de passo exibida na Figura 14.

3.1.6 Inversor de Frequência e *Spindle*

O conjunto formado pelo inversor de frequência e o *spindle* é responsável por fornecer a potência de corte requerida no processo de usinagem. O *spindle* é um componente muito importante do sistema de controle CNC, pois, em seu mandril é fixada a ferramenta de corte. O *spindle* escolhido para a *router* é um motor trifásico cuja tensão entre seus polos é de 220 V, ver Figura 13 (b). Para variar a frequência de giro e consequentemente a velocidade de corte, foi utilizado um inversor de frequência ligado ao *spindle*. O inversor escolhido é o modelo FC300-2.2-T2, fabricado pela empresa chinesa Best, ver Figura 19 (a).

Figura 19 - Inversor de frequência e *spindle*

(a)



(b)

Fonte: O Autor (2021).

Esse inversor possui uma potência de 2,2 KW e tensão de entrada monofásica de 220 V. Para interligar corretamente o inversor ao *spindle*, alguns parâmetros de operação do inversor foram configurados com os valores exibidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros do inversor de frequência

Número do Parâmetro	Função	Valor	Unidade
P002	Tensão nominal do motor	220	V
P003	Frequência nominal do motor	400	Hz
P012	Frequência inicial	1,2	Hz
P021	Frequência mais alta	400	Hz
P022	Frequência de operação mais baixa	120	Hz
P023	Frequência de saída mais baixa	120	Hz
P030	Primeira frequência	120	Hz
P064	Comando de referência para ajuste de frequência	4	-
P065	Comando de operação para referência de ajustes	1	-

Fonte: O Autor (2021).

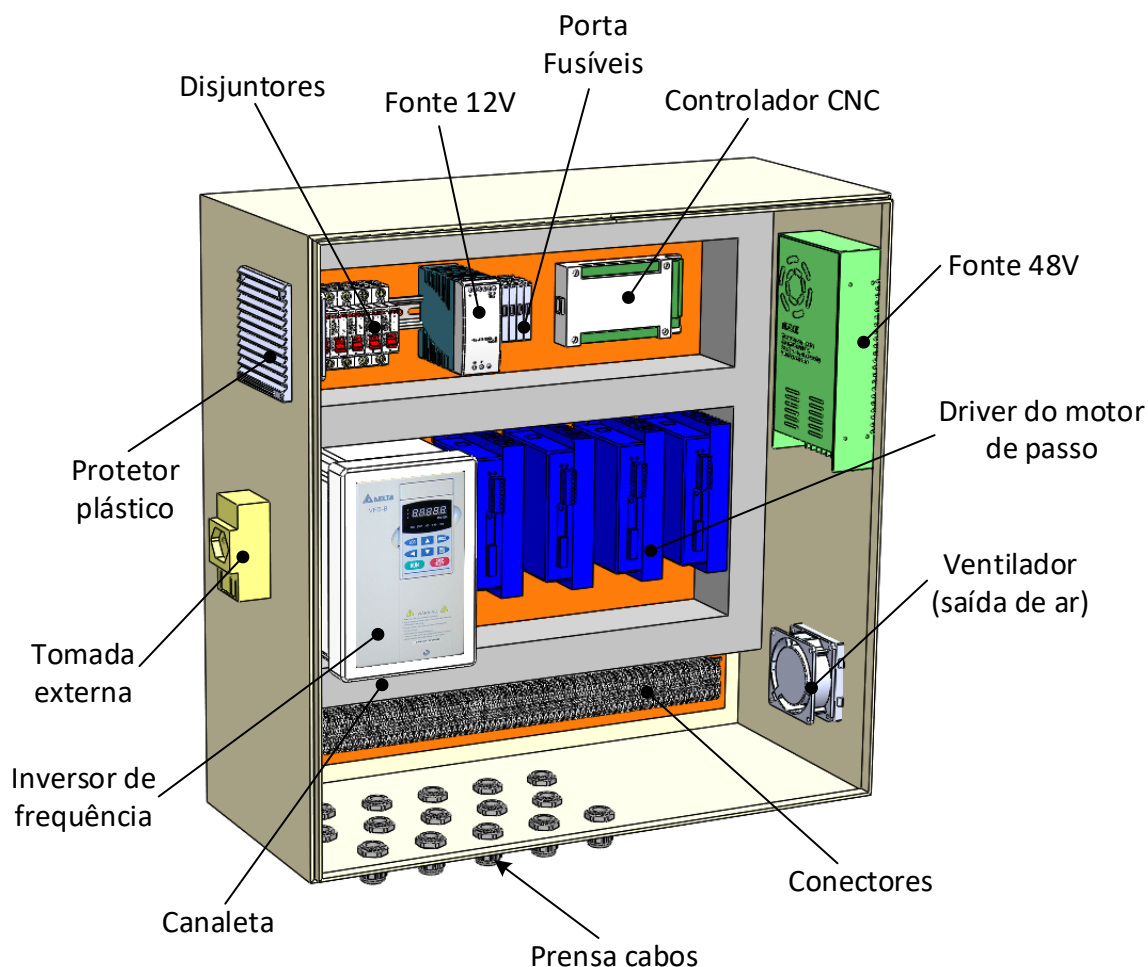
O parâmetro P002 define a tensão de alimentação do *spindle* que é 220 V. O parâmetro P021 define a frequência máxima de giro e está configurado para 400 Hz, isso resulta numa rotação máxima de 24.000 RPM, pois o motor tem dois polos. O parâmetro P023 define uma frequência mínima de saída que no caso é 120 Hz, esse valor de frequência gera uma rotação de operação mínima de 7.200 RPM necessária para garantir a refrigeração adequada do motor. Essa é uma particularidade dos *spindles* refrigerados à ar, pois, todo o fluxo de ar utilizado para arrefecer o motor é gerado por um rotor plástico acoplado ao eixo do *spindle*. O parâmetro P064 está definido com o valor quatro, isso determina que ajuste da frequência de saída é proporcionalmente estabelecido por uma entrada de sinal analógica que pode variar de 0 a 10 V. Esse sinal analógico é enviado diretamente do controlador CNC para o inversor de frequência, o que possibilita o ajuste de rotação diretamente no programa de computador MACH3. Por fim, o parâmetro P065 define como será o modo de operação do inversor, ou seja, o inversor pode iniciar seu funcionamento por meio de botões na sua Interface Homem Máquina (HMI) ou através de sinais digitais em seu terminal de controle externo. Dentre as opções disponíveis o parâmetro P065 seu

valor foi ajustado para o valor 1, isso significa que quando a entrada digital X1 está interligada com o terminal comum (COM), a rotação é iniciada no sentido horário. De forma análoga, quando com o terminal X2 está interligado com o COM a rotação é iniciada no sentido anti-horário.

3.1.7 Quadro de Controle

Em complementação aos componentes do sistema de controle fixados diretamente na *router* (Figura 13), no quadro de controle estão abrigados os restantes dos componentes da malha (Figura 15), como por exemplo a placa de controle CNC NVEM. A principal função do quadro de controle é proteger os vários componentes do sistema de controle CNC, o que proporciona a segurança para o usuário e praticidade para interligação dos dispositivos. Na Figura 20, pode-se ver o projeto em CAD, criado no SolidWorks, do quadro de controle.

Figura 20 - Projeto em CAD do quadro de controle



Fonte: O Autor (2021).

O quadro elétrico metálico mostrado na Figura 20 é fabricado pela empresa Cemar e suas dimensões são de 600 mm x 600 mm x 250 mm. Em seu painel interno, denotado por uma chapa metálica de cor laranja, estão fixados os principais componentes do sistema de controle e as canaletas para a passagem dos cabos. Essas canaletas são abertas lateralmente e possuem uma seção transversal de 40 mm x 70 mm. No painel interno os componentes de potência, inversor de frequência e *drivers* dos motores de passo, foram fixados na parte inferior, enquanto o controlador CNC e a fonte de 12 V foram fixados na parte superior. Essa escolha estratégica das posições dos componentes foi baseada na geração de calor e no fluxo de ar refrigerante forçado internamente ao quadro elétrico. Na lateral superior esquerda do quadro elétrico foi instalado um ventilador que aspira o ar externo e na lateral inferior direita foi instalado um ventilador que direciona o fluxo de ar para o meio externo. Dessa forma, o fluxo de ar frio entra na parte superior do quadro, passa pela placa de controle CNC e a fonte de 12 V, em seguida passa pelo inversor de frequência e *drivers* dos motores de passo e, em seguida, é jogado para fora do quadro. Uma vez que a maior parte do calor gerado provém do inversor de frequência e dos *drivers* dos motores de passo, essa distribuição otimiza a refrigeração, pois, o fluxo de ar ganha calor gradativamente. Inicialmente, a temperatura ambiente, o ar passa pelos componentes superiores onde recebe uma pequena quantidade de calor. Na sequência, o ar passa através do inversor de frequência e os *drivers* dos motores de passo onde recebe uma grande quantidade de calor devido à elevada potência dissipada nesses equipamentos.

Nas laterais do quadro estão fixados os protetores plásticos dos ventiladores, a fonte de 48 V, os ventiladores de ar, a tomada externa e os terminais prensa cabos. Os protetores plásticos dos ventiladores além de proteger o rotor do ventilador, possuem um filtro de ar interno, evitando assim a entrada de grandes partículas. A fonte de 48 V foi fixada na lateral superior direita do quadro, otimizando assim o espaço interno. Na parte inferior do quadro, estão dispostos vários terminais prensa cabos que são responsáveis pela fixação dos cabos que interligam o quadro aos componentes instalados fisicamente na *router*. A cabos foram dimensionados em função da corrente elétrica e os principais componentes do quadro de controle estão descritos no Quadro 4.

Quadro 4 - Principais componentes do quadro de controle

Componentes	Fabricante	Características
Fonte 12 V	Mean Well	1,2 A
Fonte 48 V	Mean Well	24 A
Controlador CNC	Novusun	6 Eixos; comunicação ethernet; compatível com MACH3
Inversor de frequência	Best	2,2 KW; 220 V
<i>Drivers</i> dos motores de passo	Action Technology	Corrente de saída: 6 A; várias configurações de micropasso
Ventilador	Metaltext	Tensão 12 V; modelo: 8025D24MS
Disjuntores	Metaltext	Curva C; 15 A; 8 A; 4 A
Protetor plástico	Metaltext	Filtro interno; modelo:
Canaleta perfurada	HellermannTyton	40 x 70 mm
Tomada externa	Ilumi	10 A
Borne SAK fusível	Metaltext	4 mm ² ; fusíveis 5 x 20 mm ou 5 x 25 mm
Prensa cabos	Steck	½ pol
Quadro metálico	Cemar	600 x 600 x 250 mm

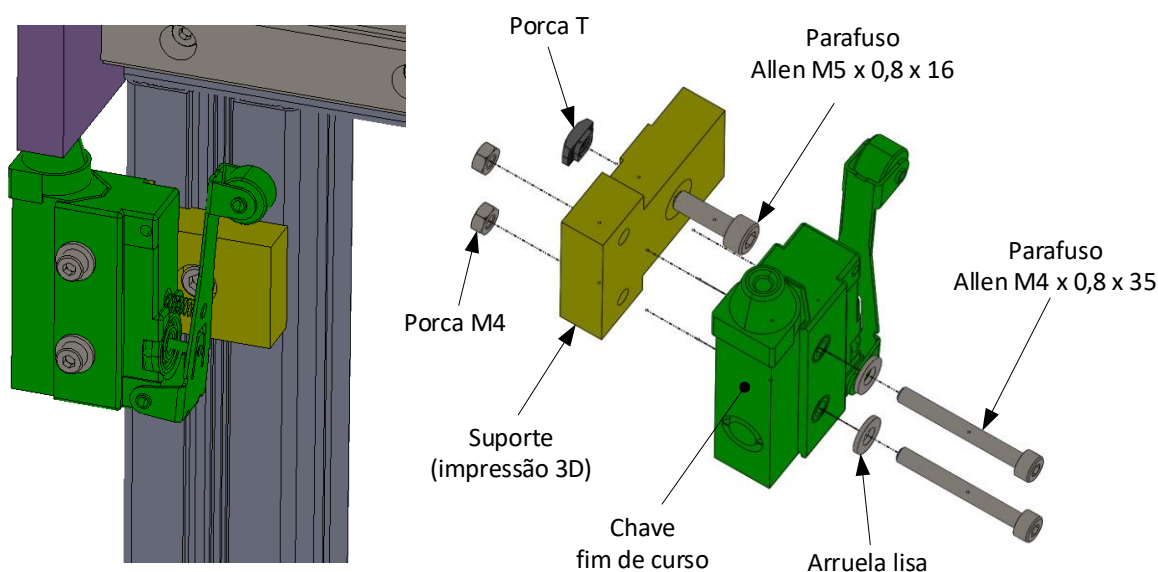
Fonte: O Autor (2021).

3.1.8 Instalações de Chaves Fim de Curso

Na *router* CNC as chaves de fim de curso tem duas funções: limite físico de deslocamento nos eixos e referenciamento de posição. Na função de limite físico, a chave fim de curso atua para bloquear a movimentação do eixo com a finalidade de evitar danos materiais ao equipamento. Cada eixo da máquina, X, Y e Z, possui duas chaves de fim de curso que limitam o deslocamento em direções opostas. Na função de referenciamento de posição, o controlador CNC utiliza a chave fim de curso para estabelecer o ponto zero máquina. Esse ponto é um referencial geral para movimentação dos eixos da máquina como também na execução de programas em código G. A partir do ponto zero máquina, todo o volume de trabalho da *router* é conhecido pelo controlador CNC.

Para facilitar a fixação das chaves de fim de curso, suportes foram fabricados por meio de uma impressora 3D. A Figura 21 mostra uma vista explodida que ilustra como as chaves de fim de curso foram fixadas nos perfis de alumínio estrutural da máquina.

Figura 21 - Fixação das chaves de fim de curso



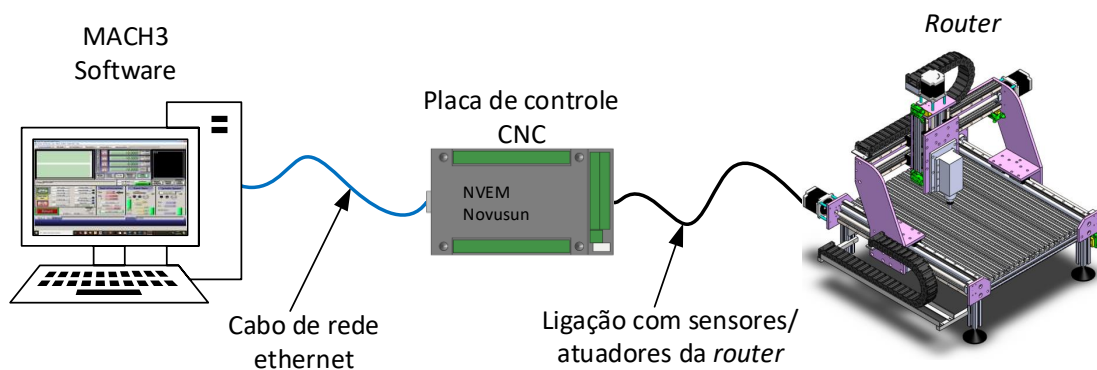
Fonte: O Autor (2021).

A Figura 21 mostra o suporte impresso para fixar as chaves de fim de curso do eixo Y. Cada eixo teve seu projeto de suporte particular, adequando-se ao espaço de instalação. Esses suportes foram impressos em ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) com preenchimento interno de 90% em forma de uma malha triangular. O uso da tecnologia de manufatura aditiva tornou mais simples o processo de fabricação do suporte. Uma vez modelado no CAD, o projeto é enviado para o *software* Cura cuja função é gerar o código G a ser enviado à impressora 3D. A impressora utilizada foi o modelo Ender 3 da marca Creality. Esse projeto de suporte foi projetado para ser bastante prático, pois, as porcas M4 ficaram alojadas dentro de rebaixos sextavados, eliminando assim a utilização de chaves para aperto. A montagem do suporte na máquina é bastante simples. Para a montagem do conjunto primeiramente, deve-se fixar o suporte ao perfil estrutural de alumínio com o auxílio do parafuso allen M5x0,8x16 e a porca T específica para o rasgo do perfil. Na sequência, a chave fim de curso é fixada ao suporte por meio de dois parafusos allen M4x35. A chave fim de curso escolhida é o modelo FM7121 fabricado pela marca Metaltex. Essa chave pode funcionar com tensões que variam de 0 VCC a 220 VCC e possuem um ciclo de vida de dez milhões de operações.

3.2 CONFIGURAÇÃO DO MACH3

O MACH3 é um *software* controlador CNC baseado em plataforma de Computador Pessoal (PC) que utiliza de placa de controle NVEM para a comunicação com os sensores e atuadores da máquina-ferramenta. A Figura 22 abaixo ilustra como acontece essa comunicação.

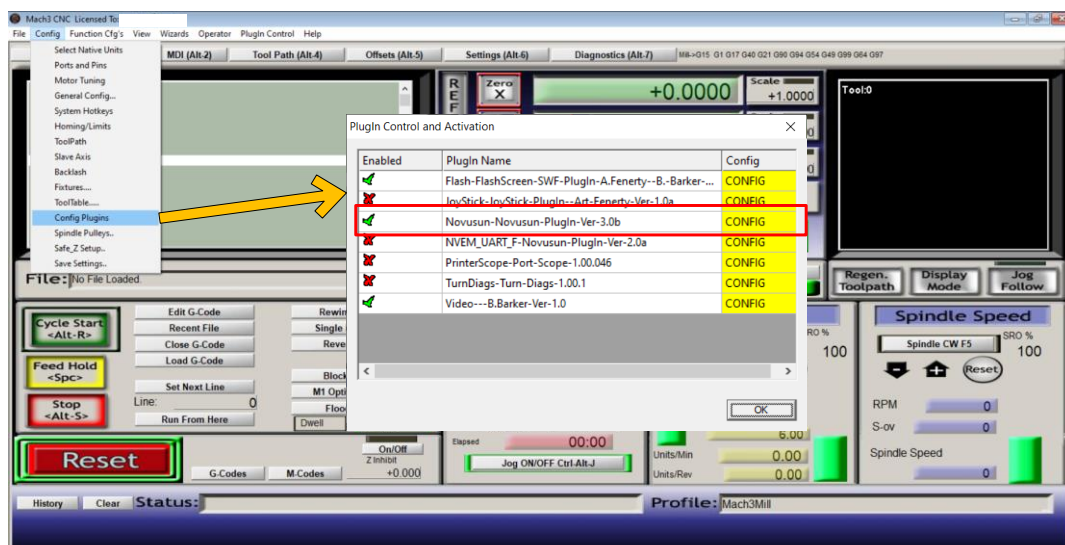
Figura 22 - Esquema de ligação do MACH3



Fonte: O Autor (2021).

O MACH3 é um programa genérico que pode ser utilizado com diferentes placas de controle. Para que o MACH3 possa de fato controlar a *router*, é preciso configurá-lo segundo a placa de controle específica. Essa configuração acontece pela adição de bibliotecas de funções específicas no *software*. A Figura 23 mostra como o plugin do controlador NVEM da Novusun é ativado no *software* MACH3.

Figura 23 - Ativação do *plugin* NVEM no MACH3



Fonte: O Autor (2021).

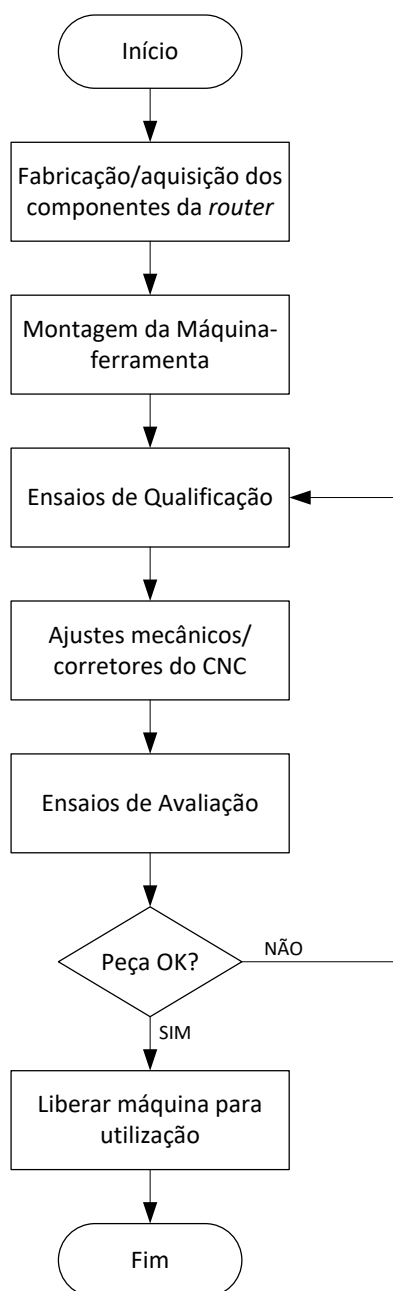
A comunicação do *software* MACH3 com o controlador CNC ocorre por meio de um cabo de rede ethernet da categoria 5e como ilustrado na Figura 22. A configuração do *software* e a ligação física do controlador CNC com seus periféricos serão detalhados nas subseções seguintes. As demais configurações do *software* MACH3 e da placa de controle CNC NVEM, segundo as características particulares da *router*, estão disponíveis no Apêndice A.

3.3 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO PARA A DETERMINAÇÃO DE ERROS GEOMÉTRICOS

A *router* do presente trabalho é composta de diversos componentes que foram fabricados ou adquiridos, montados e ajustados para fornecer o resultado esperado. A *router* foi mecanicamente projetada e montada por Silva (2018). Nessa etapa, vários componentes padrões da máquina foram adquiridos como as guias lineares, patins, fusos de esferas recirculantes, mancais de rolamento, etc. Porém outros componentes foram fabricados ou ajustados. Os componentes fabricados foram usinados a partir de chapas metálicas até a obtenção da peça final, como por exemplo as chapas, em alumínio, montadas nas laterais do pórtico da *router* (Figura 12). Os componentes ajustados foram os perfis estruturais em alumínio. Esses perfis foram previamente serrados e em seguida foram faceados através do fresamento para obtenção das medidas de projeto.

Os ensaios geométricos de qualificação realizados na *router*, em sua etapa de montagem mecânica, tiveram como objetivo ajustar mecanicamente a máquina-ferramenta (SILVA, 2018). É importante destacar que esses ensaios geométricos foram realizado sem usinagem, segundo os critérios estabelecidos nas normas ABNT NBR NM-ISO 230-1:1999 e ABNT NBR NM-ISO 10791-2:2003 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1999b, 2003). A norma ABNT NBR NM-ISO 230-1:1999 especifica, por exemplo, como deve ser feita a montagem dos dispositivos de medição na máquina e a norma ABNT NBR NM-ISO 10791-2:2003 especifica como avaliar um centro de usinagem com o eixo Z localizado verticalmente. Esquemáticamente, o fluxograma apresentado na Figura 24 mostra as etapas para obtenção da presente *router* em condições de operação.

Figura 24 - Etapas para obtenção da *router* em condições de operação



Fonte: O Autor (2021).

De acordo com o fluxograma proposto na Figura 24, o processo de obtenção da *router* em condições de operação se inicia com a aquisição/fabricação dos componentes da máquina e em seguida tem-se a etapa de montagem. Na sequência, foram realizados ensaios geométricos de qualificação. Como resultado dos ensaios de qualificação realizados por Silva (2018), foram obtidos os erros de retitude e perpendicularidade entres os eixos da X, Y e Z apresentados nas Tabela 6 e Tabela 7 respectivamente.

Tabela 6 - Valores de retitude dos eixos nas posições a e b em mm.

Eixo	Retitude (mm)	
	a	b
X	$0,027 \pm 0,007$	$0,031 \pm 0,009$
Y	$0,021 \pm 0,004$	$0,029 \pm 0,005$
Z	$0,015 \pm 0,003$	$0,019 \pm 0,003$

Fonte: (SILVA, 2018).

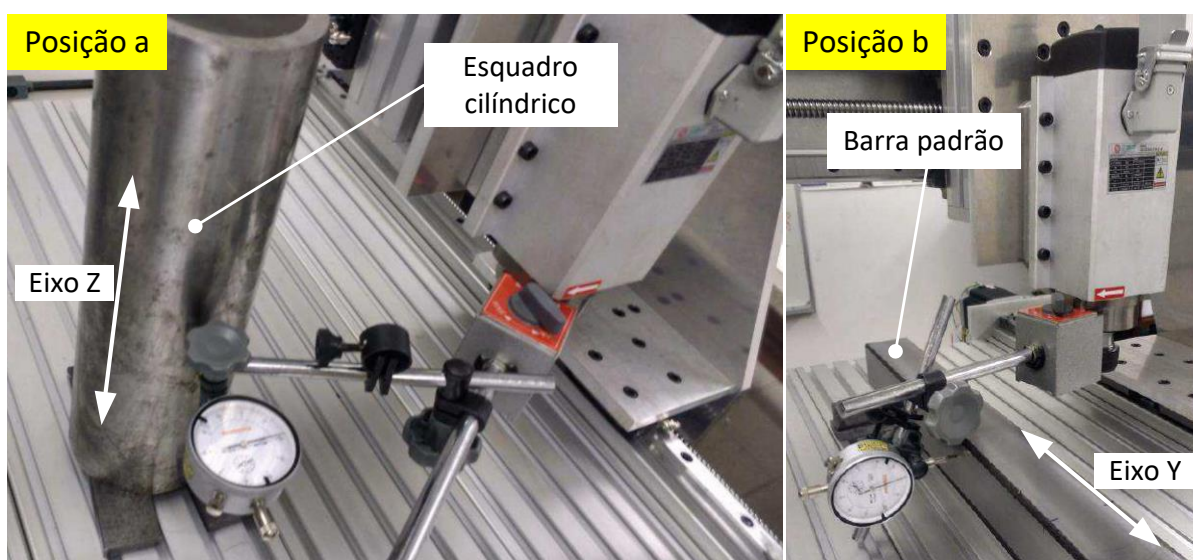
As posições a e b dos resultados mostrados na Tabela 6, estão ilustradas na Figura 25 e especificadas na norma ABNT NBR NM-ISO 10791-2:2003.

Tabela 7 - Perpendicularidade entre os eixos.

Eixos	Perpendicularidade (mm)
XY	$0,180 \pm 0,062$
XZ	$0,270 \pm 0,076$
YZ	$0,260 \pm 0,084$

Fonte: (SILVA, 2018).

Figura 25 - Montagem experimental dos ensaios de retitude



Fonte: Adaptado de Silva (2018).

Seguindo as etapas do fluxograma da Figura 24 com os ensaios geométricos feitos, foram realizados os ajustes mecânicos de alinhamento das guias lineares e da

estrutura da *router*. Importante destacar que esses ensaios foram realizados sem carga e apenas com a movimentação dos eixos da máquina.

Após a etapa de ajustes mecânicos da metodologia apresentada no fluxograma da Figura 24, no presente trabalho foram realizados os ensaios de avaliação. Para essa finalidade, foram usinadas peças de teste com objetivo de avaliar a performance geral da *router*. Nesse sentido, as peças-teste fabricadas serviram para avaliar o correto funcionamento da máquina e também para a medição de alguns erros geométricos da *router*. Depois de fabricadas as peças-teste usinada na *router*, as mesmas foram medidas através de uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) para a determinação dos erros geométricos. Seguindo a sequência do fluxograma (Figura 24), uma vez realizado o ensaio de avaliação e obtidos resultados satisfatórios para a finalidade do equipamento, a *router* foi liberada para utilização.

3.3.1 Usinagem das Peças-Teste

Para usinar as peças-teste, vários fatores importantes foram definidos como: geometria da peça, matéria prima e os parâmetros de corte. Além desses fatores, foi necessário a criação de um programa em código G para usinagem das peças. Nos subtópicos seguintes desta seção, estão estabelecidas todas as ações necessárias para os ensaios geométricos de avaliação realizados por meio da usinagem das peças-teste.

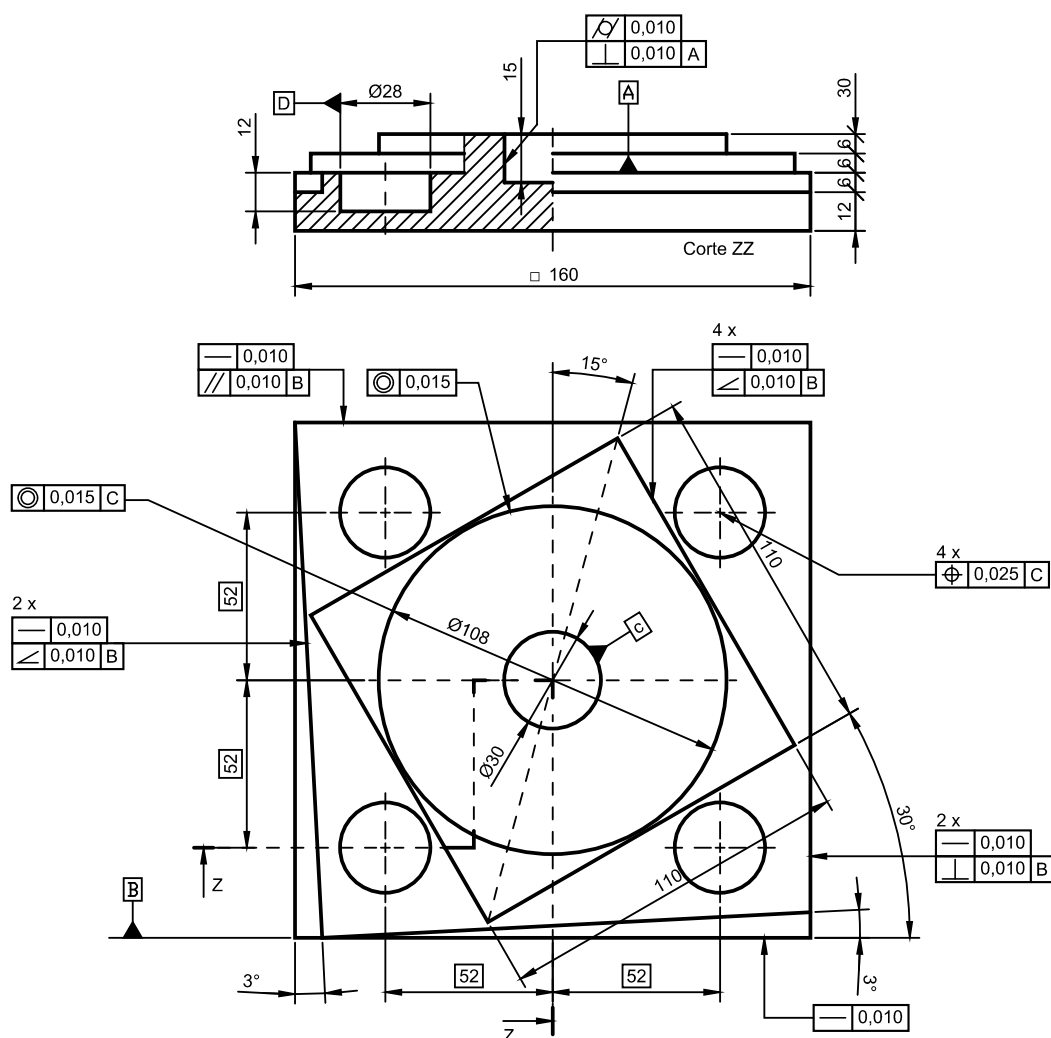
Para a fabricação das peças-teste, foi escolhido um material característico de usinagem em *routers*, a madeira (ALBERT, 2011). A usinagem de madeira é amplamente realizada e estudada neste tipo de equipamento (KOC *et al.*, 2017). Foram utilizados blocos de madeira da espécie *Manilkara longifolia*, comercialmente conhecida como maçaranduba. É de domínio público que dentre as madeiras, a maçaranduba é uma das mais densa, dura e resistente.

3.3.1.1 Geometria da Peça-Teste

Até o presente momento, não foi verificada a existência de norma específica para a avaliação de erros geométricos em *routers*. Dessa forma, baseando-se na norma ABNT NBR MN-ISO 10791-7:1999, foi modelada uma peça-teste. Como matéria prima foi utilizado um bloco de *Manilkara longifolia* (maçaranduba) cujas

dimensões externas 170 mm x 170 mm x 50mm. Em comparação com a peça apresentada na referida norma, que é uma peça específica para testes em centros de usinagem CNC, algumas simplificações foram realizadas a fim de adequar o ensaio para a *router*. Por exemplo, os furos mandrilados da peça original (Figura 11) foram retirados, pois a *router* não tem o controle da posição angular da ferramenta de corte em relação ao eixo do *spindle*. Em sua grande maioria as *routers* também não possuem magazine porta ferramentas, o que também dificulta diferentes operações de usinagem. Levando-se em conta esses fatores limitantes, a geometria da peça-teste proposta está apresentada na Figura 26.

Figura 26 – Geometria da peça-teste



Fonte: O Autor (2021).

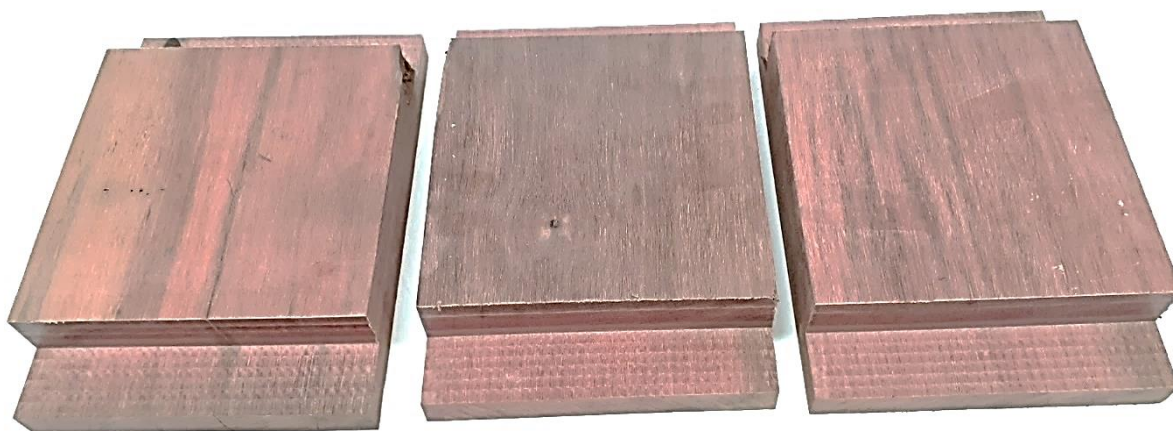
Por se tratar de uma adaptação, a geometria de peça-teste proposta acaba sendo uma alternativa para o ensaio de avaliação, assim como fizeram Trapet e

Wäldele (1991), Sousa (2000) e Xing *et al.* (2018). Para simplificar o processo de fabricação, uma vez que a máquina-ferramenta não possui um *magazine* para troca de ferramentas automaticamente, foi utilizada apenas uma fresa de topo reta (carbeto de tungstênio) com três arestas de corte e 6 mm de diâmetro. Em comparação com a peça original, na peça-teste proposta os furos são cegos. Essa condição facilita a fabricação, pois, o comprimento útil da fresa de topo quando fixada ao mandril é de 30 mm. Os quatros furos laterais da peça-teste original também foram simplificados e são compostos por quatro furos cegos com 28 mm de diâmetro e 12 mm de profundidade (ver o corte apresentado na Figura 26).

3.3.1.2 Preparação de Corpos de Prova para a Fabricação das Peças-Teste

Na Figura 27 estão ilustrados os três corpos de provas, em madeiras, utilizados para usinagem das peças-teste.

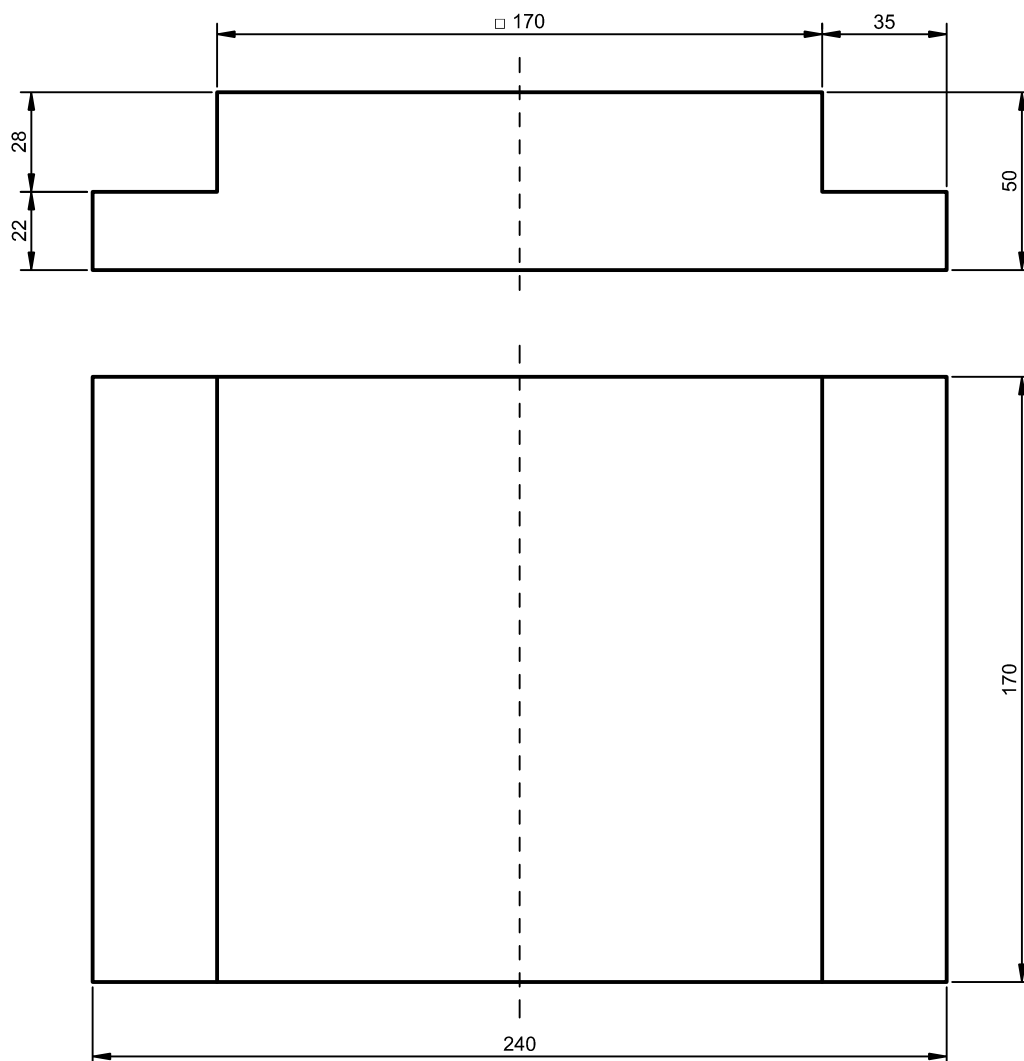
Figura 27 – Corpos de prova para usinagem das peças-teste



Fonte: O Autor (2021).

As dimensões finais dos corpos de prova estão apresentadas no desenho técnico da Figura 28.

Figura 28 – Dimensões finais do corpo de prova da peça-teste



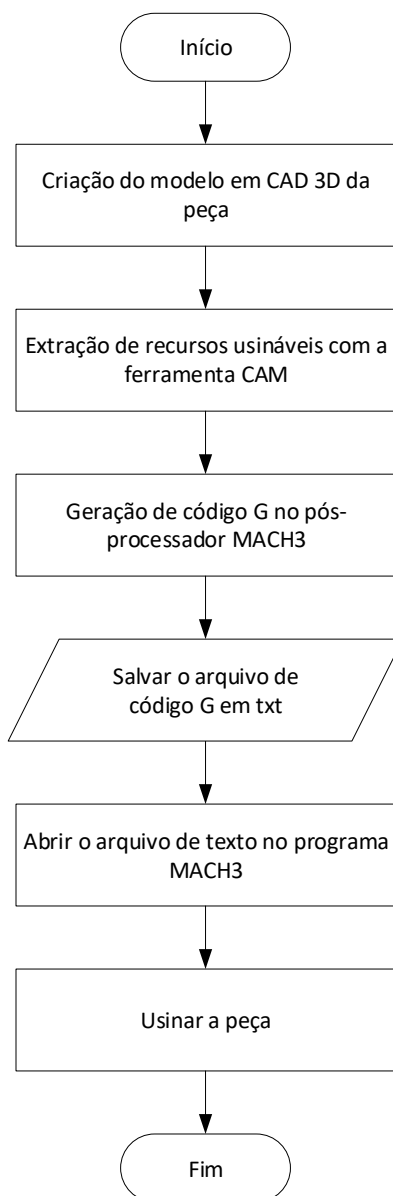
Fonte: O Autor (2021).

Essas abas laterais do corpo de prova foram utilizadas para fixá-lo à mesa da *router*.

3.3.1.3 Programa CNC para Usinagem das Peças-Teste

O programa em código G para o controlador MACH3, foi gerado através da ferramenta SolidWorks CAM inclusa no *software* SolidWorks 2016. De forma resumida, inicialmente a peça foi modelada em CAD 3D, em seguida foram extraídos os recursos usináveis e na sequência o pós-processador gerou o código G para ser inserido na máquina-ferramenta. O fluxograma da Figura 29 mostra a sequência de etapas para obtenção do programa CNC e usinagem de uma peça-teste.

Figura 29 - Etapas para criação do código G e usinagem da peça

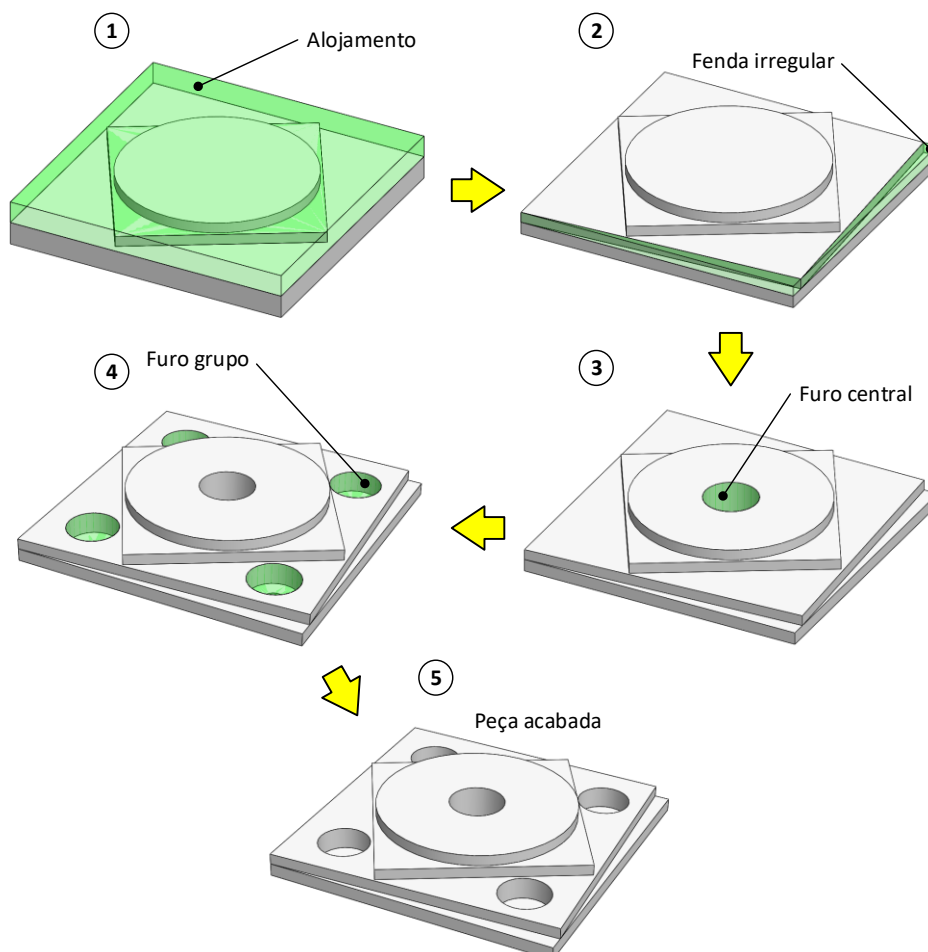


Fonte: O Autor (2021).

A primeira etapa de criação do código G para usinagem da peça-teste consiste em modelar a peça no programa CAD paramétrico. Por meio de recursos do *software* CAD como extrusão e corte extrudado, o modelo tridimensional da peça-teste foi criado conforme o desenho de fabricação mostrado na Figura 26. Em seguida, com auxílio da ferramenta CAM, foram extraídos os recursos usináveis. Nessa etapa, cada recurso usinável do sólido, como por exemplo um rebaixo ou um furo, são reconhecidos pelo algoritmo e são configurados os tipos de ferramentas de corte adequadas assim como os parâmetros de corte para cada recurso. Em detalhes a

sequência de usinagem dos recursos usináveis reconhecidos pelo algoritmo do CAM está ilustrada na Figura 30.

Figura 30 - Sequência de usinagem obtida com a ferramenta CAM



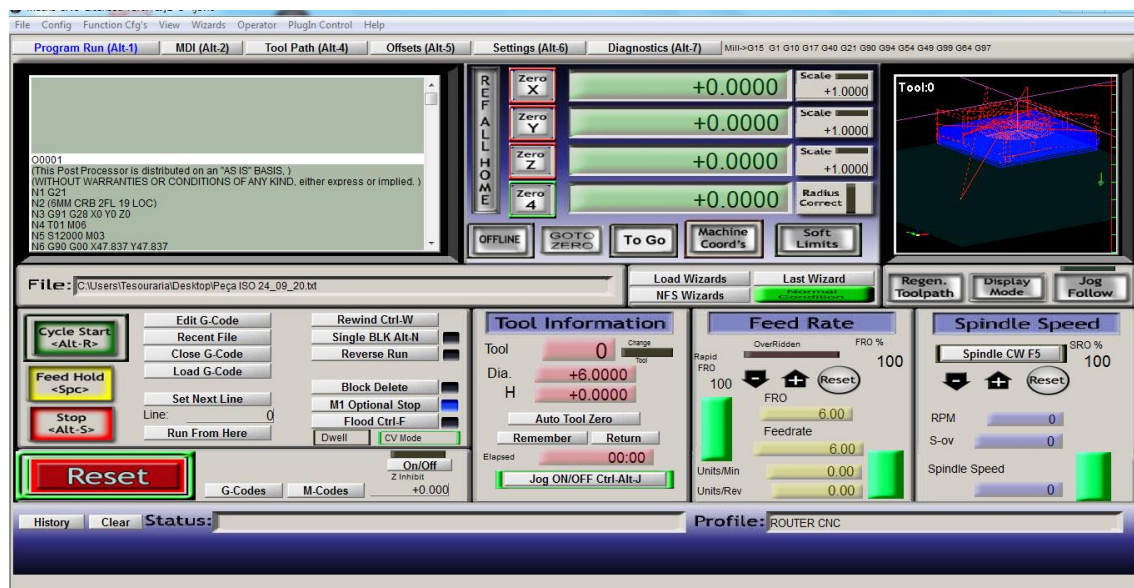
Fonte: O Autor (2021).

Esse reconhecimento de recursos (*features*) da ferramenta CAM a partir do arquivo da peça-teste em CAD, obedece às determinações da ISO 14949-1:2003 e caracteriza uma programação para controladores de alto nível (BENAVENTE, 2011). Conforme mostrado na Figura 30, na primeira etapa do processo de fabricação ocorre a remoção do material indicado em verde translúcido, reconhecido como um recurso de alojamento. Na segunda etapa, são usinadas as fendas irregulares. Na terceira etapa, é usinado o furo central. Na quarta etapa, são usinados os quatro furos radiais. Na quinta etapa, são removidas as rebarbas e é obtida a peça acabada. Para realização dessas etapas de usinagem, o algoritmo do pacote CAM seleciona(s) a(s) ferramenta(s) de corte dentre as definidas pelo usuário no *magazine* da máquina-ferramenta virtual, não encontrada(s) a(s) ferramenta(s) adequada(s) o algoritmo CAM

escolhe automaticamente a(s) ferramenta(s) de sua biblioteca interna e insere-a(s) no *magazine*. Se alguma ferramenta escolhida pelo algoritmo não atender às condições técnicas e operacionais requeridas pelo usuário ela pode ser substituída manualmente. Os parâmetros de corte como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte foram determinados automaticamente, inicialmente segundo as características inerentes à ferramenta de corte, o material a ser usinado e o processo de usinagem. A velocidade de corte ficou $V_c = 226,19$ m/min, o avanço por dente $f_z = 0,07$ mm/dente e a profundidade de corte foi de 1,5 mm. Na prática, para usinagem das peças-teste, foi utilizada apenas uma fresa de topo descrita na Seção 3.3.1.1.

Seguindo o fluxograma da Figura 29, tem-se a etapa de geração do código G a ser executado pelo *software* controlador MACH3. Para criar esse código foi utilizado um pós-processador específico do SolidWorks CAM para o MACH3. Na sequência, o código gerado foi transferido para o *software* de controle MACH3 e a peça-teste foi usinada. Na prática, antes de realizar a usinagem das peças-teste foi realizado um aquecimento (*warm up*) no qual por cerca de uma hora os eixos da *router* e com o *spindle* ligado foram movimentados em vazio. O objetivo do *warm up* é de estabilizar termicamente a máquina em relação a dilatação de seus componentes e dessa forma reduzir a influência dessa fonte de erro nas peças-testes usinadas. A Figura 31 mostra a simulação da trajetória da ferramenta para usinagem da peça-teste no programa MACH3.

Figura 31 - Tela do MACH3 com pré-visualização da trajetória da ferramenta

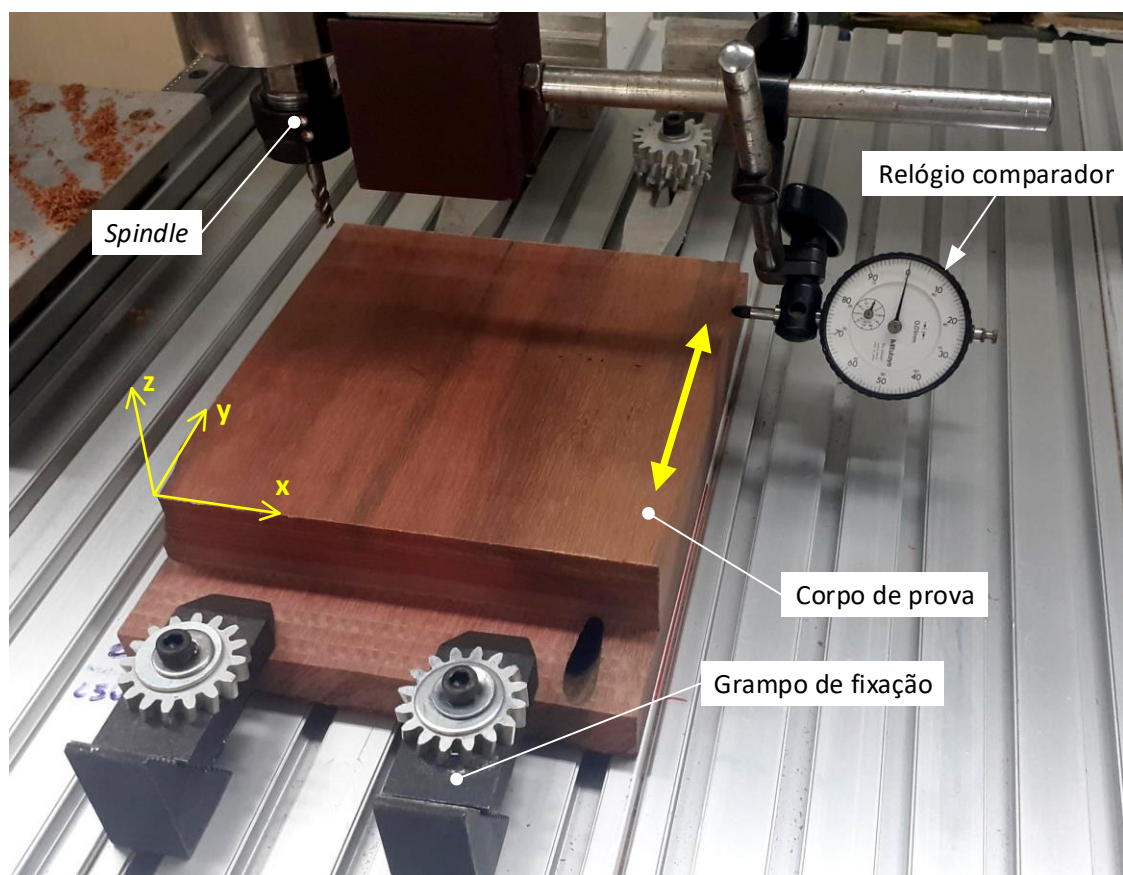


Fonte: O Autor (2021).

3.3.1.4 Fixação do Corpo de Prova na Mesa da Router

Os corpos de prova utilizados para a fabricação das peças-teste, foram presos à mesa da *router* por meio de grampos apoiados sobre suas abas laterais conforme a montagem mostrada na Figura 32. A fim de garantir o paralelismo entre os planos do corpo de prova e os eixos da máquina, um relógio comparador, com resolução de 0,001 mm, foi utilizado no processo de alinhamento como ilustrado.

Figura 32 – Fixação e alinhamento do corpo de prova na mesa da *router*



Fonte: O Autor (2021).

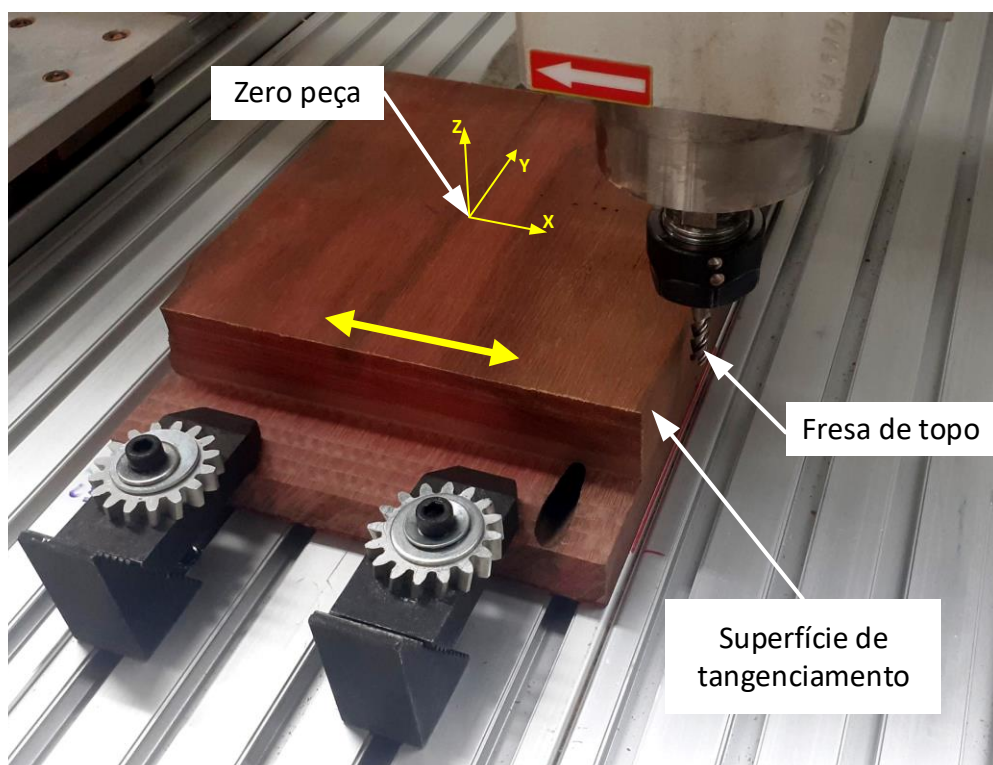
Nesse procedimento de alinhamento, como pode-se observar na Figura 32, a base magnética do relógio comparador foi fixada ao *spindle* e a ponta de contato do relógio comparador foi posicionada externamente na superfície lateral direita do corpo de prova. Fixando-se as posições dos eixos X e Z o eixo Y foi movimentado para o ajuste do paralelismo entre a face do corpo de prova e o eixo Y da *router*. Dessa forma, foram garantidas as condições adequadas para a realização do ensaio uma vez que os eixos XY do corpo de prova ficaram paralelos com os eixos XY da *router*. O erro de paralelismo obtido nesse procedimento foi de 0,02 mm, no comprimento de 170

mm, o que é insignificante considerando que a peça tem 10 mm de material excedente. O propósito desse procedimento foi corrigir grandes desalinhamentos, de modo que a peça-teste usinada apresente apenas os erros oriundos da máquina-ferramenta.

3.3.1.5 Definição do Zero Peça e Início da Usinagem na Router

Basicamente, existem dois sistemas de coordenadas fundamentais para a usinagem CNC são eles: zero máquina e zero peça. O ponto zero máquina é um ponto de referência fixo utilizado para determinação do volume de trabalho da *router*. A partir do ponto zero máquina, o controlador CNC estabelece o curso máximo em cada eixo coordenado baseado nos limites configurados (Figura 90), evitando assim choques físicos. O procedimento padrão para usinagem da peça-teste na *router* consiste inicialmente em referenciar os eixos X, Y e Z no ponto zero máquina, e posteriormente definir o ponto zero peça. O ponto zero peça é o ponto de referência para usinagem da peça, ele pode estar em qualquer lugar dentro do volume de trabalho. O código G gerado para fabricação das peças-teste, está definido em coordenadas incrementais cujo ponto zero peça está no centro do corpo de prova como mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Definição do ponto zero peça



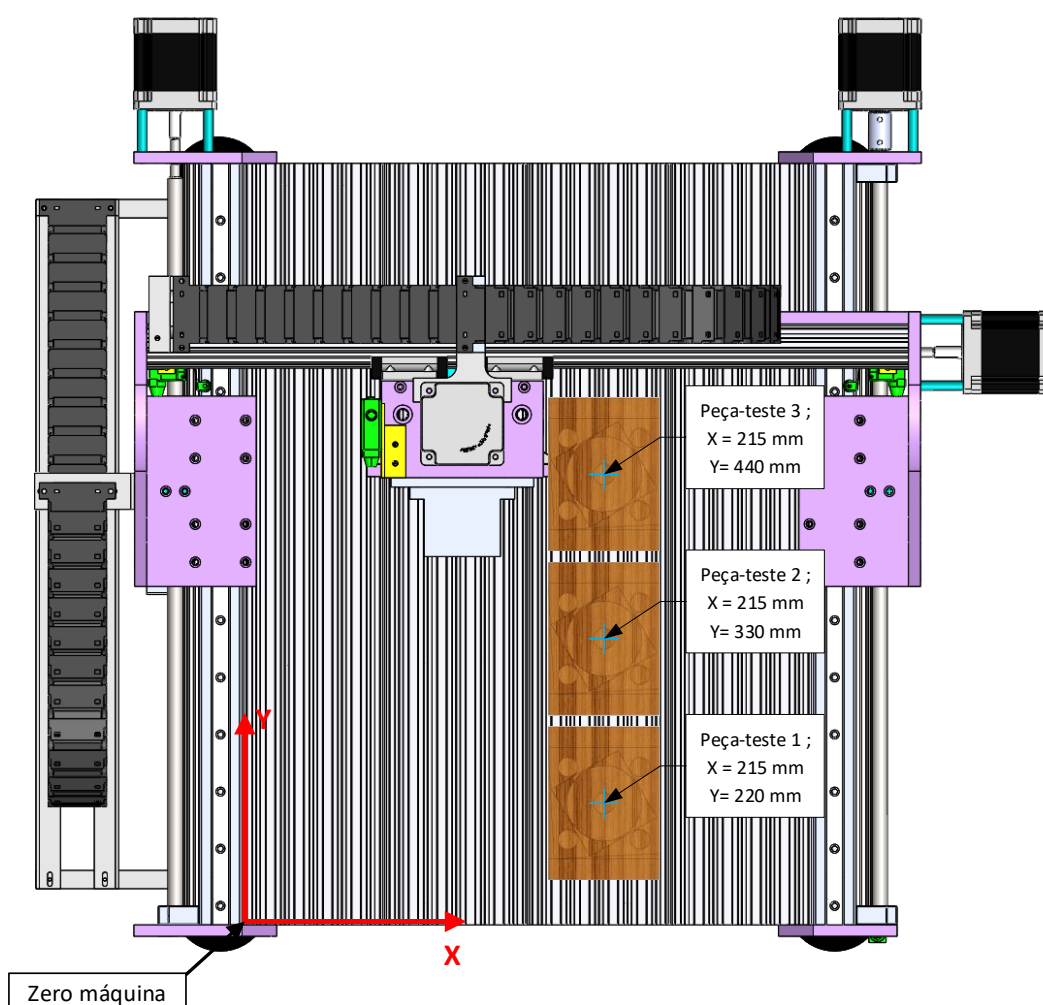
Fonte: O Autor (2021).

Para definir o ponto zero peça, foram realizados os tangenciamentos da aresta de corte da fresa de topo nos três eixos da máquina. A Figura 33 mostra uma etapa de tangenciamento para o eixo X. Após o tangenciamento nos eixos X, Y e Z e o referencição das coordenadas no MACH3 foi executado um comando de deslocamento G00 X-88. Y88. de modo o centro da ferramenta ficasse coincidente com centro geométrico do quadro do corpo de prova. Nesse ponto foi referenciado o zero peça dos eixos X e Y no *software* MACH3.

3.3.1.6 Posições de Usinagem das Peças-Teste no Volume de Trabalho da Router

A fim de avaliar os erros geométricos em diferentes pontos do volume de trabalho da *router*, cada peça teste foi usinada em posições diferentes conforme mostrado na Figura 34.

Figura 34 - Posições de usinagem das peças-teste 1, 2 e 3

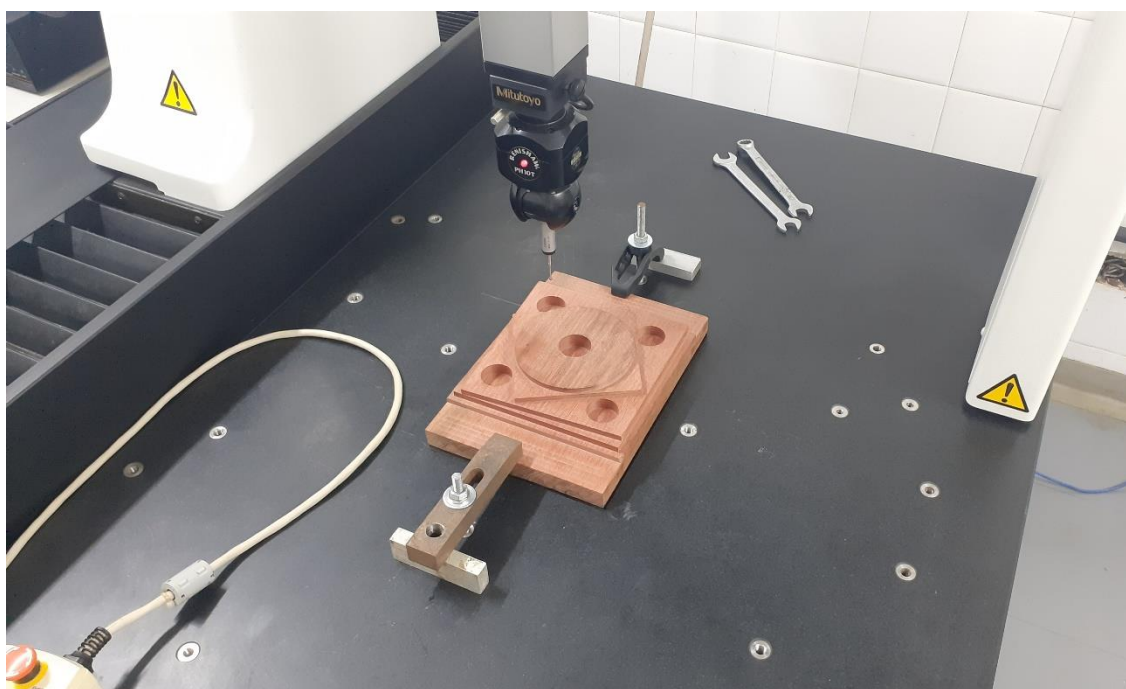


Fonte: O Autor (2021).

3.3.2 Medição das Peças-Teste

Para realização das medições, foi utilizada uma MMC da marca Mitutoyo modelo Beyond Crysta C574 mostrada na Figura 35. Essa MMC pertence ao Laboratório de Medição por Coordenadas (LAMECO) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE. A capacidade de medição desse equipamento são 500 mm no eixo X, 700 mm no eixo Y e 400 mm no eixo Z. Essa MMC possui uma resolução de 5×10^{-4} mm e certificado de calibração número 03206/13 (RBC).

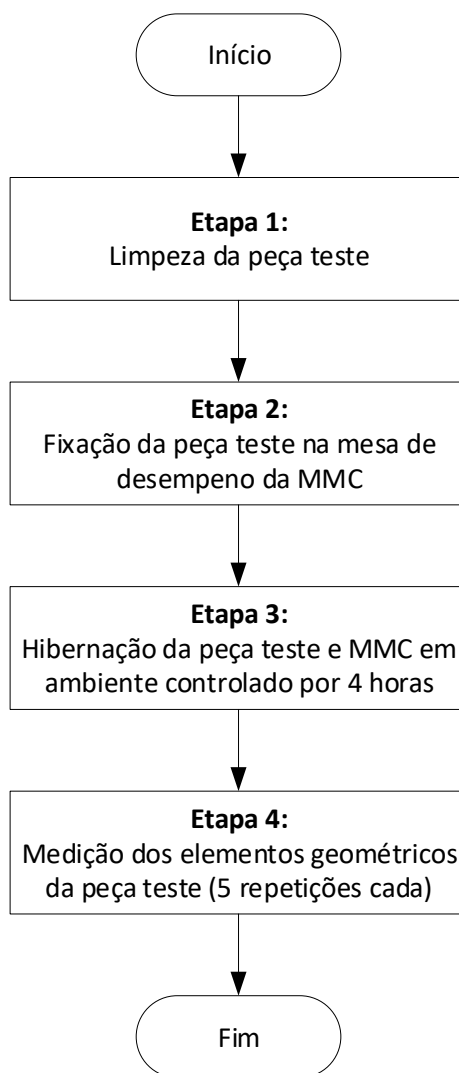
Figura 35- Medição de peças-teste na MMC



Fonte: O Autor (2021).

Para obtenção de medições confiáveis e reproduzíveis dos parâmetros geométricos das peças-teste, foi estabelecido um procedimento operacional que está apresentado no fluxograma da Figura 36.

Figura 36 - Etapas da medição



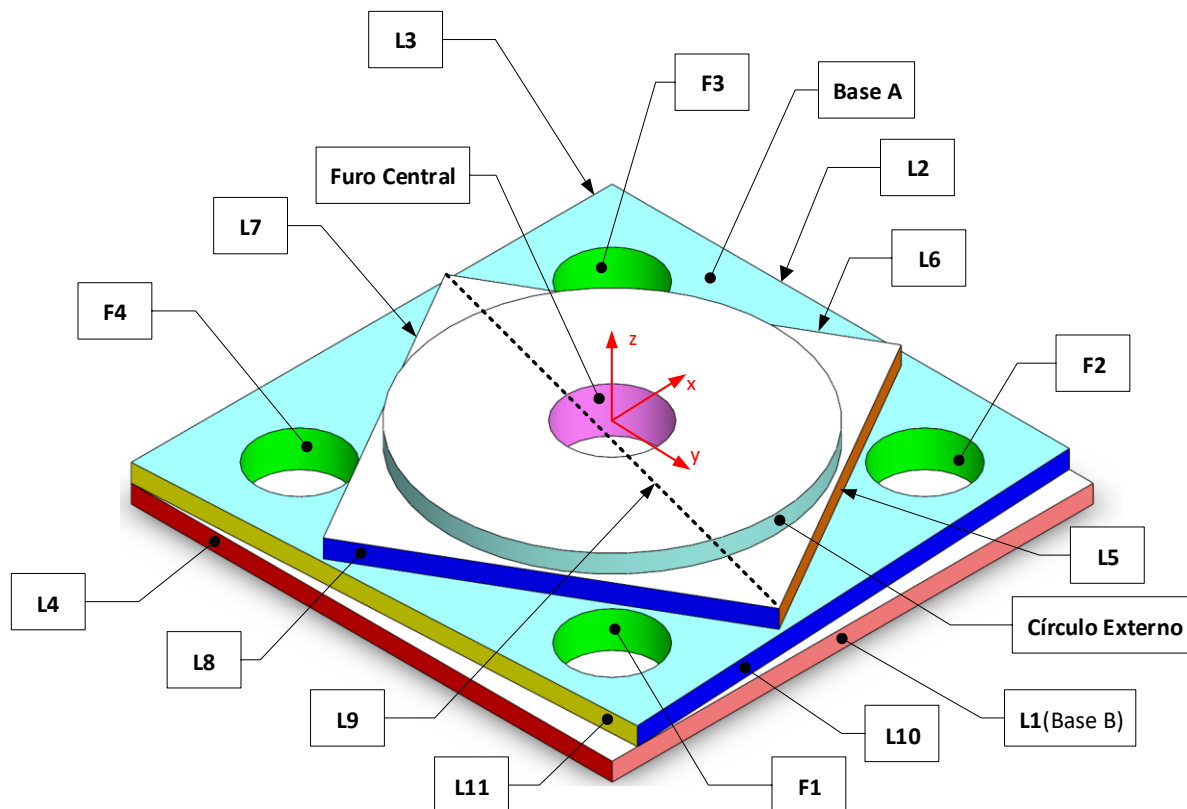
Fonte: Adaptado de Araújo (2019).

A primeira etapa do procedimento apresentado na Figura 36, consiste em limpar todas as superfícies da peça e remover qualquer rebarba ou resíduos remanescentes do processo de usinagem. Na segunda etapa, a peça-teste foi fixada na mesa da MMC a fim de que a peça não mova durante o processo de medição. Na terceira etapa todo o sistema de medição e mensurando foram postos em hibernação até atingir o equilíbrio térmico na temperatura controlada de $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(50 \pm 10) \% \text{UR}$. Finalmente, na última etapa foram feitas as medições dos parâmetros geométricos. Na Figura 35 está ilustrada a montagem experimental feita para a medição das peças-teste.

3.3.2.1 Parâmetros Geométricos Avaliados

Para facilitar a medição dos erros geométricos, foi estabelecida a indicação dos elementos medidos, na peça-teste, conforme a nomenclatura indicada na Figura 37.

Figura 37 - Elementos medidos nas peças-teste



Fonte: O Autor (2021).

Levando-se em consideração as simplificações realizadas na geometria da peça-teste proposta (Figura 26), os elementos geométricos avaliados na peça-teste proposta estão apresentados no Quadro 5.

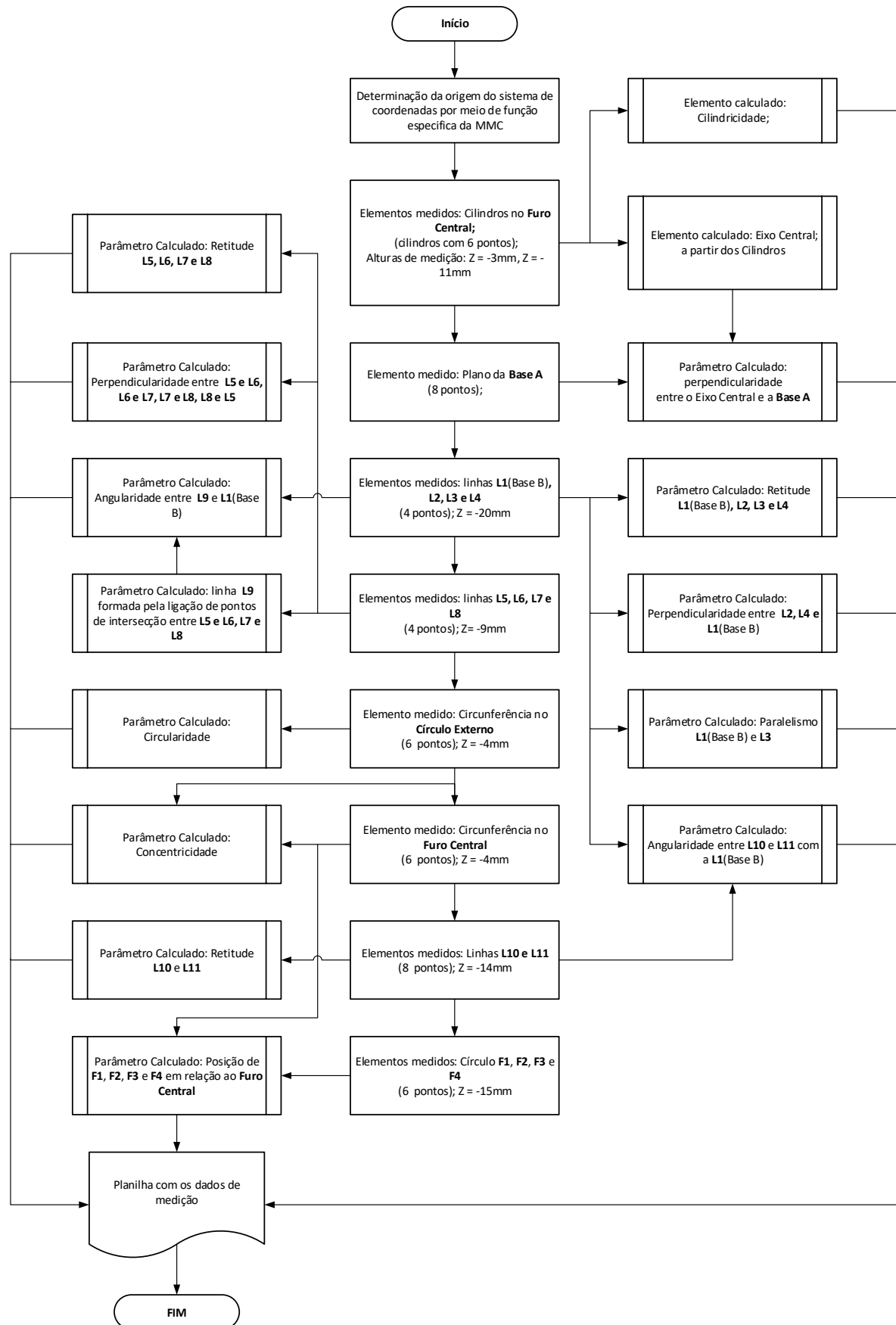
Quadro 5 - Elementos geométricos avaliados nas peças-teste

Elemento geométrico	Parâmetro tolerado	Plano de referência
Furo central	Cilindricidade	*XY
	Perpendicularidade entre a linha de centro do furo central e a base A	*YZ
		*ZX
Quadrado (L1, L2, L3 e L4)	Retitude dos lados	*XY
	Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação à base B	*XY
	Paralelismo do lado oposto à base B	*XY
Quadrado inclinado (L5, L6, L7 e L8)	Retitude dos lados	*XY
	Angularidade do ângulo de 75° em relação à base B	*XY
Círculo	Circularidade	*XY
	Concentricidade do círculo externo e o furo central	*XY
Faces inclinadas (L10 e L11)	Retitude das faces	*XY
	Angularidade dos ângulos em relação à base B	*XY
Furos fresados (F1, F2, F3 e F4)	Posição dos furos com relação ao furo central	*XY

Fonte: Adaptado de Araújo (2019).

Os valores de parâmetros obtidos ao final do processo de medição serão utilizados para especificação técnica da *router*, dentro do volume de trabalho avaliado (Figura 34). Toda a sistemática para a medição dos elementos geométricos e o cálculo dos parâmetros apresentados no Quadro 5, está apresentada no fluxograma da Figura 38.

Figura 38 - Processo de medição das peças-teste na MMC



Fonte: O Autor (2021).

Na coluna central de blocos do fluxograma da Figura 38, estão os processos principais de medição dos elementos geométricos e nas colunas laterais estão os subprocessos utilizados para os cálculos das tolerâncias avaliadas segundo a norma ABNT NBR NM-ISO 10791-7:1999. Nesses subprocessos, os parâmetros tolerados foram calculados pelo *software* COSMOS da MMC a partir dos dados dos elementos medidos nos processos principais. Nesse fluxograma, a primeira etapa do processo de medição consiste em definir um sistema de coordenadas para a referência das medidas no *software* da MMC. Esse sistema de coordenadas e a nomenclatura utilizada para os elementos medidos estão exibidas na Figura 37.

Então com o sistema de coordenadas definido, na etapa seguinte do fluxograma da Figura 38 foram medidos cilindros no furo central. A partir dessas medidas, foram calculadas as cilindrícidades e os valores foram armazenados numa planilha de Excel. De forma análoga, os outros elementos geométricos foram medidos, seus parâmetros foram calculados e armazenados numa planilha de dados. Cada elemento geométrico foi medido 5 vezes a fim de obter-se um valor médio e a variabilidade. Essa estimativa do número de medições foi obtida pela Equação (6) segunda a distribuição *t Student* (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2007).

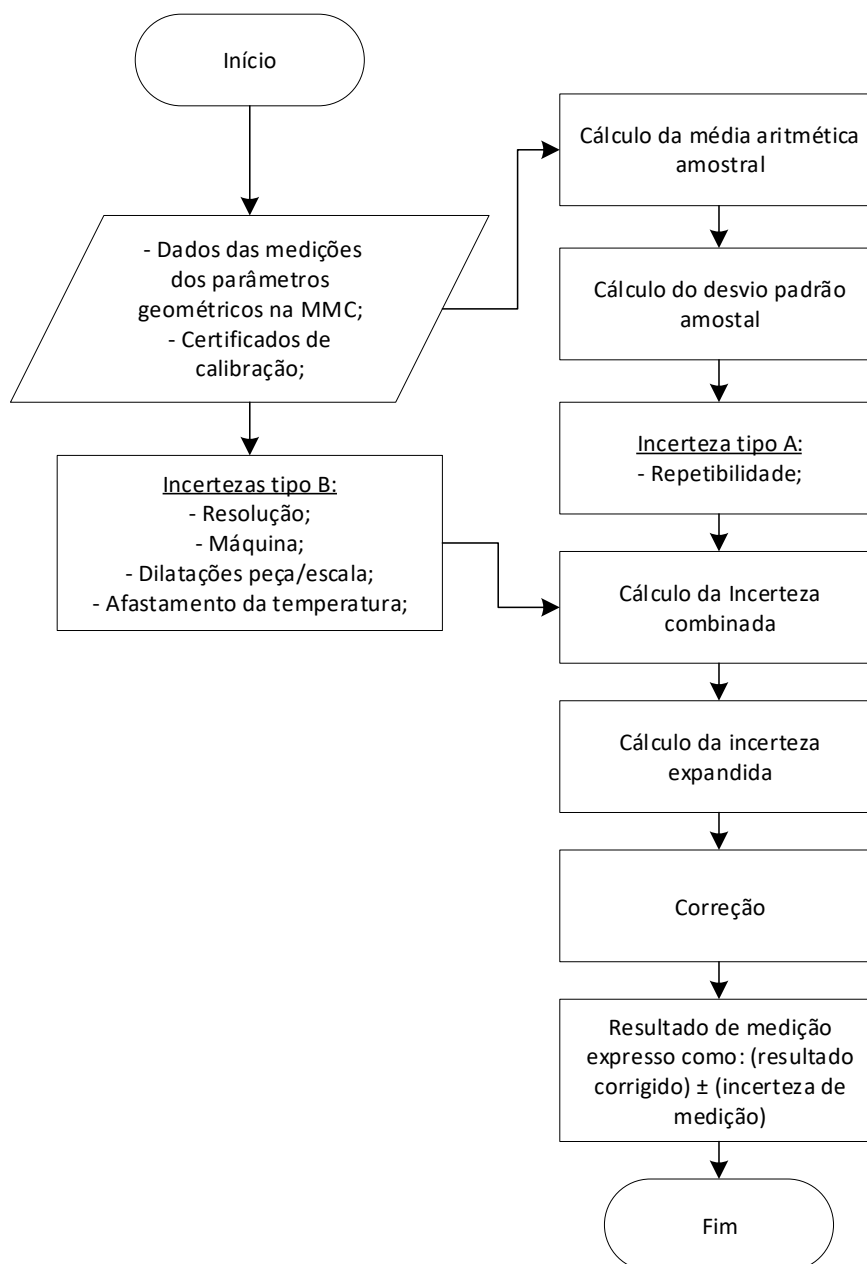
$$N \geq \left(\frac{t \cdot s}{e_e} \right) \quad (6)$$

Onde N é o tamanho da amostra, t é o coeficiente de *Student*, s é o desvio padrão amostral e e_e é a estimativa de erro. Assim foi estabelecido um número de 5 medições para cada parâmetro, valor esse que excede o indicado pela Equação (6).

3.3.3 Expressão dos Resultados das Medições dos Parâmetros Geométricos

Para expressão dos resultados das medições realizadas, as incertezas dessas medições foram calculadas conforme estabelecido no livro ISO GUM 2008 (INMETRO, 2012). Todos os cálculos da incerteza foram feitos diretamente em uma planilha do Microsoft Excel e para o resultado de medição de cada parâmetro medido o intervalo de confiança adotado foi de 95,45%. Essa planilha foi devidamente validada com cálculos analíticos. O Fluxograma da Figura 39 mostra as várias etapas para obtenção dos resultados das medições dos parâmetros geométricos.

Figura 39 - Procedimentos para o cálculo dos resultados das medições



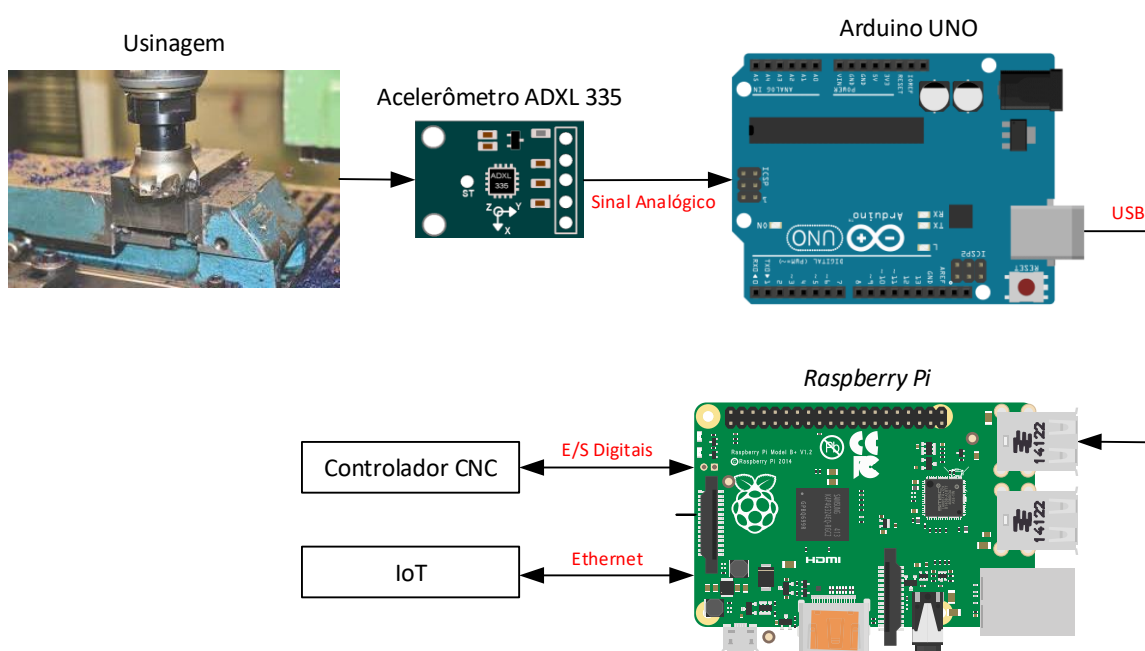
Fonte: O Autor (2021).

Conforme apresentado esquematicamente no fluxograma da Figura 39, as fonte de incertezas consideradas foram: repetibilidade, resolução, máquina, comprimento da peça devido dilatação, dilatação da escala da MMC, afastamento da temperatura de referência, comprimento da peça devido à diferença de temperatura.

3.4 SISTEMA DE MONITORAMENTO EMBARCADO

O sistema de monitoramento proposto tem a função inicial de detectar a amplitude das vibrações mecânicas geradas no processo de usinagem. Em síntese, para o sistema de monitoramento foi montado um Dispositivo de Aquisição de Dados (DAQ) composto por um acelerômetro, um microcontrolador Arduino UNO e um computador em placa única o *Raspberry Pi*. A montagem esquemática do sistema de monitoramento está apresentada na Figura 40.

Figura 40 – Representação esquemática do sistema de monitoramento das vibrações



Fonte: O Autor (2021).

No esquema da Figura 40, o processo de aquisição de dados é iniciado a partir das vibrações oriundas da usinagem por meio do acelerômetro modelo ADXL 335. Em seguida, o sinal analógico das vibrações gerado pelo acelerômetro é direcionado para o Arduino UNO que neste caso tem a função de um Conversor Analógico Digital (ADC). Os dados digitais provenientes do Arduino são transferidos através da porta USB para a placa *Raspberry Pi*. O *Raspberry Pi* foi utilizado devido a sua confiabilidade, capacidade de processamento e armazenamento dos dados aliado ao seu baixo custo (MUDALIAR; SIVAKUMAR, 2020). Projetos similares de sistema de monitoramento foram montados por Upadhye; Borole; Sharma, (2015) e Varanis *et al.*, (2016).

3.4.1 Aquisição de Dados de Vibração

Posicionado radialmente ao *spindle* da *router* o acelerômetro é o transdutor responsável pelas transformações dos deslocamentos mecânicos em sinais elétricos (VARANIS *et al.*, 2016). Esses sinais elétricos são interligados à entrada analógica do Arduino UNO cujas especificações técnicas são totalmente compatíveis, não necessitando de um conversor intermediário. As principais especificações tanto do Arduino UNO quanto acelerômetro ADXL 335 estão mostradas na Tabela 8.

Tabela 8 - Especificações ADXL 335 e Arduino UNO

Equipamento	Parâmetros	Valores
Arduino UNO, microcontrolador ATmega328P	Resolução ADC	10 bits
	Frequência de amostragem ADC	10 KHz
	Tensão de operação	5 V
	Tensão de entrada recomendada	7 - 12 V
	Portas de entradas analógicas	6
	Velocidade de <i>Clock</i>	16 MHz
Acelerômetro ADXL 355 (3 eixos)	Tensão de operação	1.8 - 3,6 V
	Faixa de Medição	+ - 3 g
	Largura de banda eixos X e Y	0,5 - 1600 Hz
	Largura de banda eixo Z	0,5 - 550 Hz

Fonte: O Autor (2021).

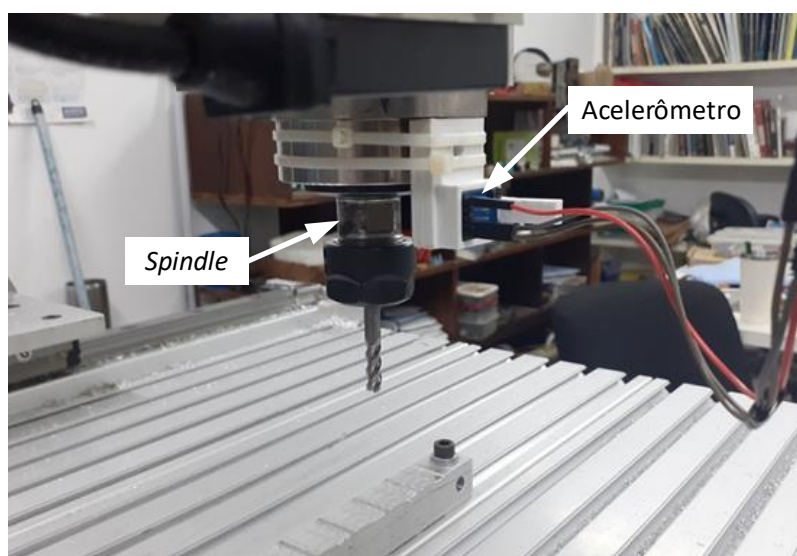
Para garantir uma medição confiável o critério de Nyquist determina que a frequência de amostragem seja no mínimo do dobro da frequência do sinal original (LIANG; HECKER; LANDERS, 2004). Sabe-se que a frequência máxima de giro na *router* é de 24,000 RPM (400 Hz) e assim a largura de banda dos sensores nos eixos X e Y, conforme os dados da Tabela 8, atendem ao critério de Nyquist. Na aquisição de dados das vibrações mecânicas o Arduino faz apenas a conversão ADC e transmite automaticamente os dados através da porta USB por meio de uma comunicação serial para o *Raspberry Pi*. Nesse processamento o Arduino otimiza a taxa de aquisição de dados deixando os cálculos complexos para serem realizados posteriormente na *Raspberry Pi*. Essa configuração foi pensada para proporcionar uma maior velocidade na aquisição de dados uma vez que a capacidade do Arduino UNO está exclusivamente dedicada aos processos de aquisição, conversão e transmissão de dados da vibração. Na sequência, no *Raspberry Pi*, um código em *Phyton* é

responsável pelo o processamento do sinal digital seja para o cálculo da aceleração da vibração em g (aceleração da gravidade) ou uma Transformada Discreta de Fourier (DFT) para obtenção de um espectro da vibração no domínio da frequência. Nessa configuração a capacidade de processamento do *Raspberry Pi* e as bibliotecas de funções da linguagem *Phyton* proporcionam um ambiente poderoso, amplo e flexível de programação. Além disso, o *Raspberry Pi* possui diversas interfaces de comunicação como portas de rede *ethernet* e adaptados de rede sem fio tornando o sistema acessível remotamente pela *internet*. Assim, esse sistema de aquisição de dados pode ser considerado um dispositivo de *IoT*. O código em *phyton* desenvolvido para o sistema de aquisição está disponível no Apêndice A.

3.4.1.1 Fixação do Acelerômetro no *Spindle*

O acelerômetro foi fixado diretamente na carcaça do *spindle* conforme mostrado na Figura 41.

Figura 41 – Fixação do acelerômetro ao *spindle*



Fonte: O Autor (2021).

O acelerômetro foi posicionado radialmente no eixo de rotação, pois nessa posição tem-se a melhor relação sinal-ruído tanto para o monitoramento da ferramenta de corte quanto para a qualidade da peça (ISKRA; HERNA, 2012).

3.4.2 Rugosidade e Vibrações Mecânicas

A proposta do sistema de monitoramento embarcado é criar um sistema de análise em tempo real capaz de predeterminar o nível de acabamento obtido nas condições específicas de usinagem.

A partir de vários experimentos, foi plotado um gráfico de correlação da rugosidade superficial em função da vibração captada pelo acelerômetro. Como resultado final, a rugosidade superficial não é consequência apenas dos parâmetros de corte, mas também é influenciada por fatores inerentes da própria máquina-ferramenta como a frequência natural de vibração e o sistema de controle CNC, o que pode tornar a correlação de rugosidade obtida algo particular da presente *router*.

Para validar o sistema de monitoramento embarcado, foi realizada uma série de experimentos com a usinagem de um corpo de prova (Seção 3.4.2.1), mantendo-se a velocidade de corte e a profundidade de corte constantes enquanto a velocidade de avanço foi variada. Essa estratégia foi utilizada para a validação do sistema, pois a velocidade de avanço tem a maior influência na rugosidade superficial (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). A Tabela 9 apresenta o planejamento experimental dos testes realizados com o sistema proposto.

Tabela 9 - Planejamento experimental sistema de monitoramento

Condição de corte	Profundidade de corte (mm)	Velocidade de corte (m/min)	Avanço por dente (mm)	Taxa de alimentação XY (mm/min)
1	0,16	245	0,010	390
2	0,16	245	0,015	585
3	0,16	245	0,020	780
4	0,16	245	0,030	1170

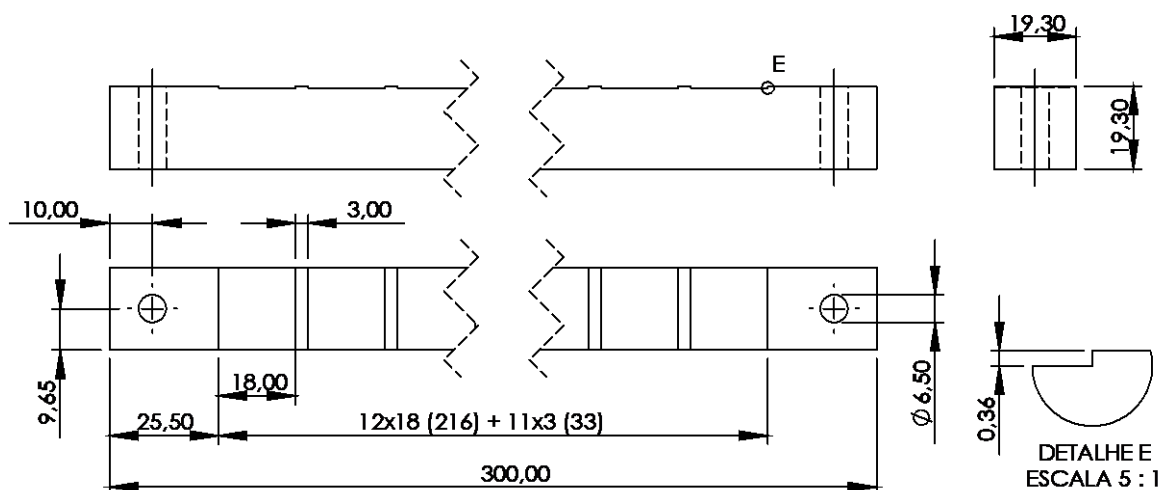
Fonte: O Autor (2021).

Cada experimento foi repetido três vezes. A ferramenta de corte utilizada foi um fresa de topo reta com três arestas de corte, 6 mm de diâmetro em carbeto de tungstênio. Após usinado o corpo de prova, foi medida da rugosidade média (R_a) três vezes em cada rasgo do corpo de prova. Para a medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da marca INSTRUTHERM modelo RP-200.

3.4.2.1 Geometria do Corpo de Prova para o Ensaio do Sistema de Monitoramento

O corpo de prova é composto da liga de alumínio 6063-T5 e sua geometria está mostrada no desenho técnico da Figura 42.

Figura 42 - Corpo de prova para ensaios de rugosidade e vibração



Fonte: O Autor (2021).

O corpo de prova apresentado na Figura 42 possui 12 rebaixas de 18 mm x 19,30 mm com 0,36 mm de profundidade onde foram avaliadas a rugosidade e a vibração. Para cada condição de corte especificada na Tabela 9 foram usinados três rebaixas consecutivos em sequência até completar a usinagem dos 12 rebaixas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão descritos e comentados os resultados da implementação do sistema de controle CNC na *router*, testes de performance e o sistema de monitoramento embarcado.

4.1 SISTEMA DE CONTROLE CNC INSTALADO NA ROUTER

Após a definição de todos os componentes da malha de controle apresentados na Seção 3.1, escolhidos segundo os critérios de projeto e a disponibilidade de mercado, foi iniciado o processo de aquisição dos mesmos. O processo de compra foi gradual, uma vez que a etapa de projeto foi bastante iterativa e várias vezes componentes previamente escolhidos foram modificados em função da disponibilidade do mercado ou mudanças no projeto. Inicialmente, baseados nos torques de acionamentos definidos por Silva (2018), foram adquiridos os motores de passo e o *spindle*. Em seguida, foi adquirida placa de controle CNC. O controlador é o principal elemento do sistema de controle e ligados a ele estão todos os dispositivos como mostrado na malha de controle da Figura 15.

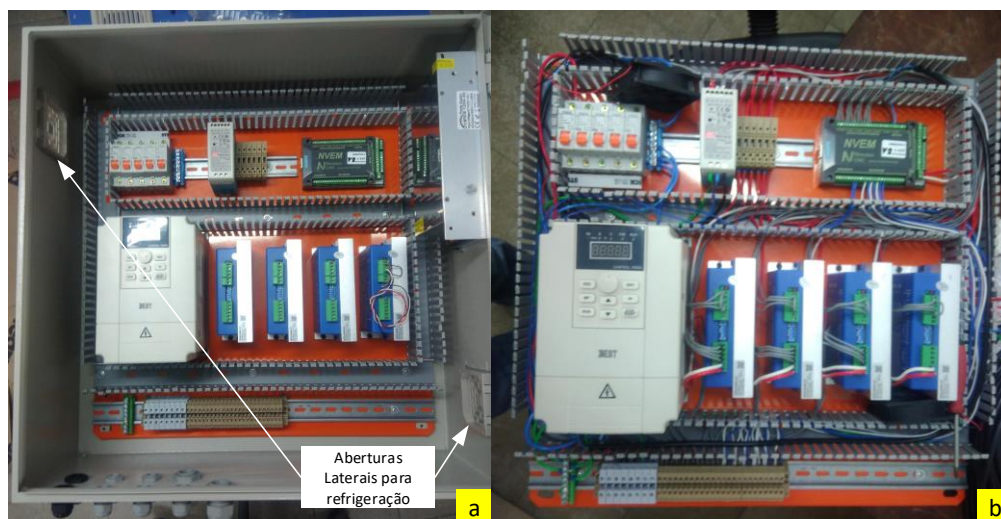
O processo de montagem foi inteiramente manual e realizado no LABMEC (Laboratório de Mecânica Aplicada) da UFPE. A montagem do sistema de controle pode ser dividida em três fases distintas. Na primeira fase, foi montado o quadro elétrico, na segunda fase, foram instalados os sensores e atuadores na *router*. Na terceira fase, o quadro elétrico foi fixado a mesa de apoio da máquina e os sensores e atuadores foram interligados. Finalizada a montagem do sistema de controle foram iniciados os testes de movimentação simples, apenas baseados na função de deslocamento rápido, invocada pelo o código G00. Nessas condições, foram ajustados os parâmetros dos *drivers* e dos motores de passo conforme apresentados na Tabela 4. A partir desse ponto, foram iniciados os ensaios de qualificação para avaliar o sistema de controle como um todo. Várias peças-testes foram usinadas, conforme as condições estabelecidas na Seção 3.3.1.

4.1.1 Quadro de Controle

O quadro de controle abriga os vários componentes do sistema e foi inteiramente montado a partir do modelo de quadro comercial fabricado pela Cemar,

seguindo o *layout* mostrado na perspectiva da Figura 20. A seguir na Figura 43, estão duas fotos do processo inicial de montagem do quadro.

Figura 43 - Montagem do quadro de comando



Fonte: O Autor (2021).

Na Figura 43a, pode-se observar todos os componentes montados sem cabearmentos. Foram realizados rasgos nas laterais do quadro para instalação do sistema de refrigeração. Na Figura 43b, pode-se observar o painel interno com o cabearmento antes de ser instalado definitivamente no quadro. Na Figura 44 está mostrado o quadro instalado na *router*.

Figura 44 - Quadro de comando instalado na *router*



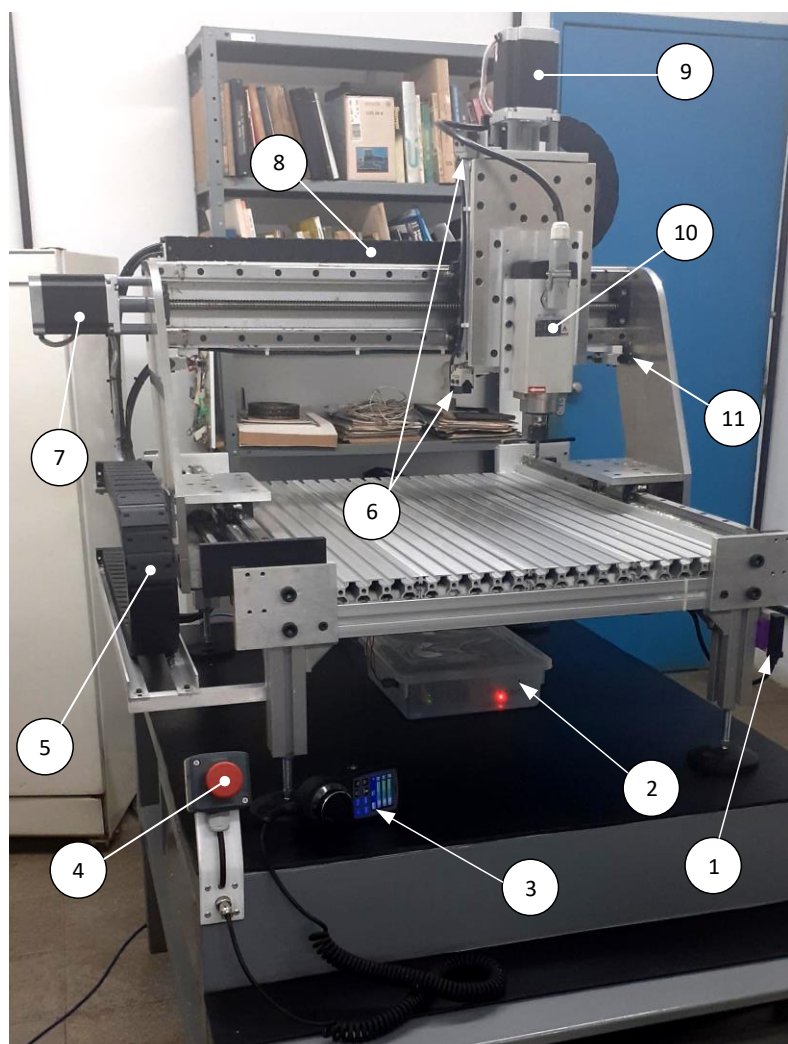
Fonte: O Autor (2021).

Na Figura 44a, é observado o quadro fixado à mesa de apoio da máquina-ferramenta. Na Figura 44b, está mostrado o interior do quadro de controle totalmente interligado aos sensores/atuadores da *router* em operação. Todos os cabos elétricos foram devidamente dimensionados considerando as cargas envolvidas e a condição de instalação de modo que durante os testes não foi observado nenhum superaquecimento.

4.1.2 Sensores e Atuadores Instalados na Router

Montado o quadro controle descrito na seção anterior, foram instalados os sensores e atuadores na *router*. Na Figura 45 estão numerados os demais componentes do sistema de controle CNC instalados na máquina.

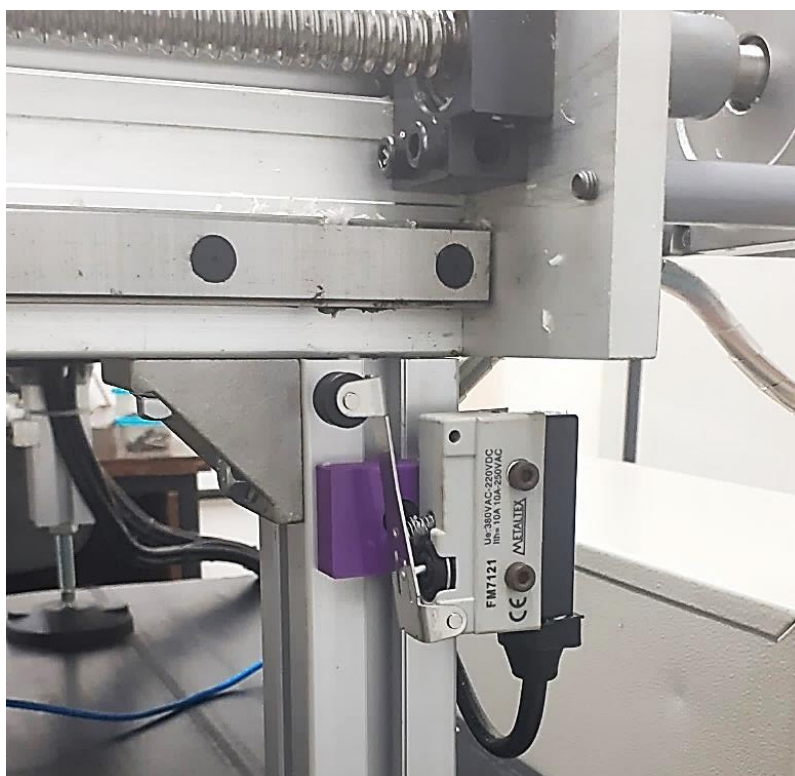
Figura 45 - Sensores e atuadores instalados na Router



Fonte: O Autor (2021).

Na Figura 45, vários componentes do sistema de controle CNC estão enumerados, são eles: chave fim-de-curso eixo Y (1), sistema de monitoramento das vibrações (2), Gerador de Pulsos Manual(3), botoeira de emergência (4), esteira porta cabos eixo Y (5), chaves fim-de-curso do eixo Z(6), motor de passo eixo X (7), esteira porta cabos eixo X (8), motor de passo eixo Z (9), *Spindle* (10) e chave de fim de curso eixo Y (11). Durante os testes o sistema de controle funcionou perfeitamente e no painel de controle do *software* MACH3 pode-se monitorar constantemente toda a malha de controle. As esteiras portas cabos foram fundamentais para proteger os cabos elétricos do cavaco assim como permitir os deslocamentos dos mesmos de forma segura. Para a montagem das chaves fim de curso do eixo X e Y, foram utilizados suportes impressos na impressora 3D conforme o modelo mostrado na Figura 21. Esses suportes se mostraram bastante versáteis devido à facilidade de fabricação, aplicação e o resultado final pode ser visto na Figura 46.

Figura 46 - Chave de fim de curso eixo Y



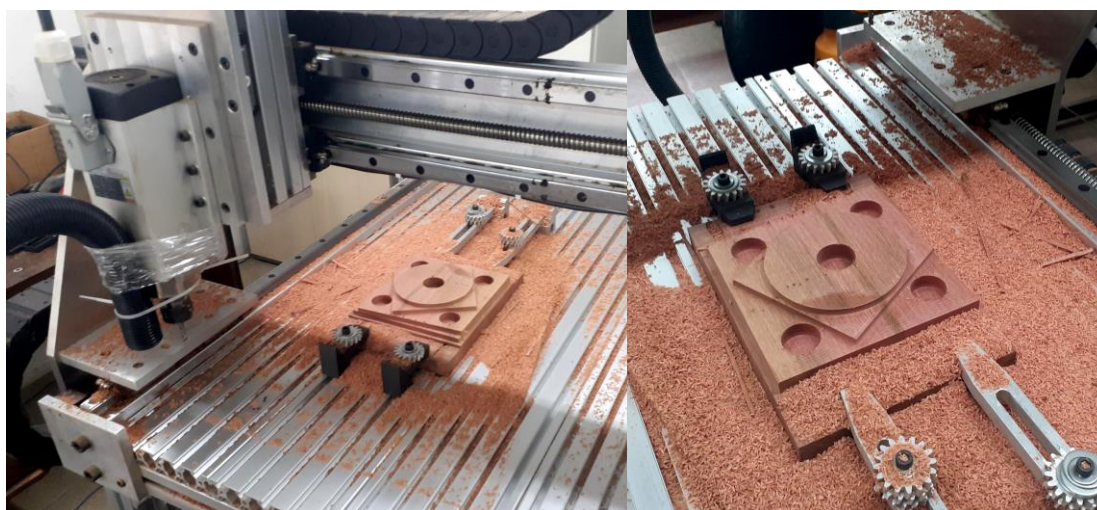
Fonte: O Autor (2021).

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE AVALIAÇÃO GEOMETRICA

Os ensaios foram fundamentais para definição da capacidade da máquina-ferramenta construída como um todo considerando a construção mecânica e sistema de controle CNC adotado.

Ao todo foram usinadas três peças-teste (Figura 26), doze parâmetros geométricos foram avaliados, em cada uma delas, conforme descrito no Quadro 5. O procedimento de medição obedeceu às etapas do fluxograma da Figura 38. Nas subseções seguintes, cada elemento geométrico e seus respectivos parâmetros tolerados estão mostrados para as três peças-teste. O tempo total de usinagem, para cada peça-teste, foi de aproximadamente 1 h e 50 min. Na Figura 47, pode-se observar uma peça-teste usinada fixada na mesa da *router*.

Figura 47 - Peça-teste usinada



Fonte: O Autor (2021).

Durante a usinagem das peças-teste, grande quantidade de cavaco foi gerada e acumulada. As peças usinadas apresentaram poucas rebarbas que foram removidas e toda a peça foi limpa para realização da medição dos parâmetros geométricos com a MMC. Todos os resultados das medições possuem 95,45% de confiança. Os dados completos utilizados para a plotagem dos gráficos nas subseções a seguir, para as três peças-teste, estão disponíveis no Apêndice C.

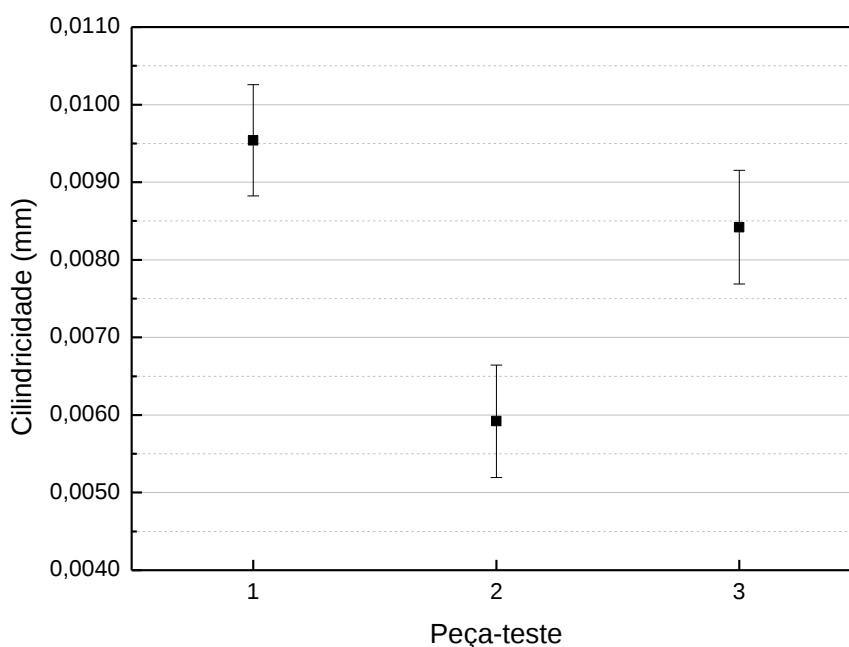
4.2.1 Furo Central

Todos os parâmetros geométricos avaliados no furo central (Quadro 5), estão apresentados nas subseções a seguir.

4.2.1.1 Cilindricidade

A cilindridade média do Furo Central para as três peças-teste está mostrada na Figura 48.

Figura 48 - Cilindridade do Furo Central das peças-teste 1, 2 e 3



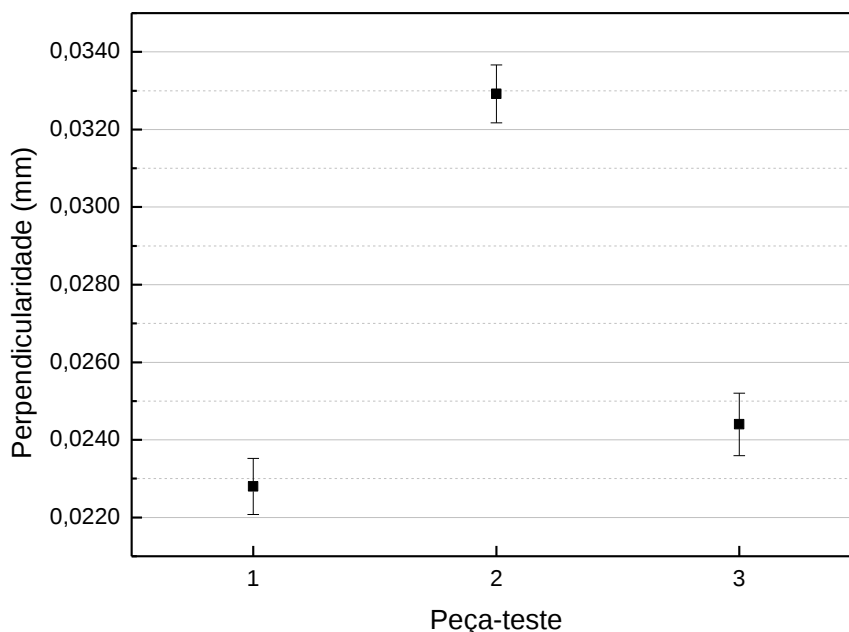
Fonte: O Autor (2021).

Os valores obtidos para a cilindridade demonstram uma pequena variação de 37,8% entre os valores médios mínimo e máximo, e no gráfico as incertezas para as peças-teste 1 e 3 se sobrepõem em uma pequena faixa. Dessa forma, esse erro geométrico apresentou variações nas diferentes posições de usinagem conforme ilustrado na Figura 34. O valor máximo do erro de cilindridade obtido foi de $(0,0095 \pm 0,0007)$ mm na peça-teste 1 e o valor mínimo foi de $(0,0059 \pm 0,0007)$ mm na peça-teste 2.

4.2.1.2 Perpendicularidade da Linha de Centro do Furo Central com a Base A

A perpendicularidade média no plano YZ entre a linha de centro do Furo Central e a Base A, para as três peças-teste está mostrada na Figura 49.

Figura 49 – Perpendicularidade do Furo Central com Base A, no plano YZ, das peças-teste 1, 2 e 3

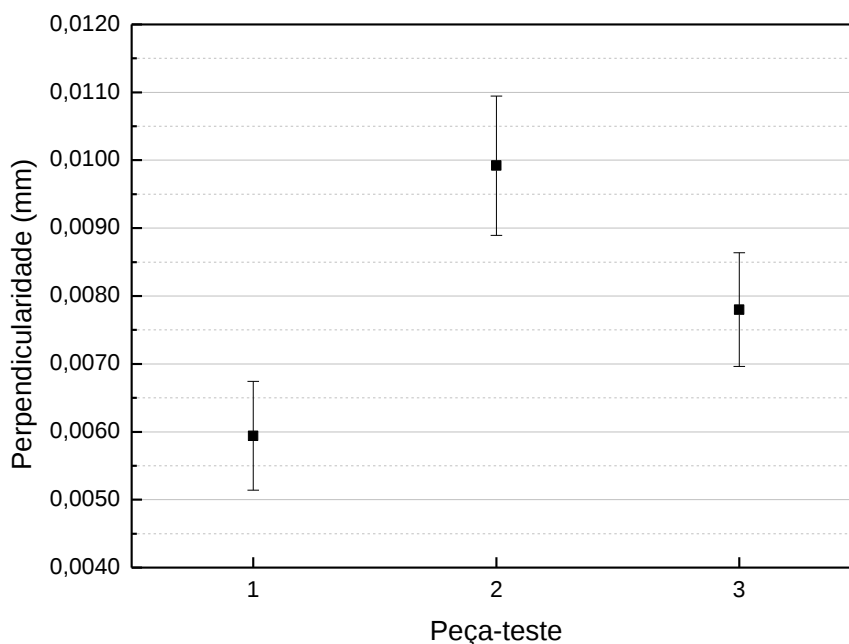


Fonte: O Autor (2021).

A perpendicularidade média entre o eixo do cilindro interno do Furo Central e plano da Base A fornece uma medida da perpendicularidade entre os eixos da *router*. Para a projeção no plano YZ, o valor máximo do erro geométrico de perpendicularidade foi de $(0,0329 \pm 0,0010)$ mm encontrado na peça-teste 2 mm e valor mínimo foi $(0,0228 \pm 0,0008)$ mm encontrado na peça-teste 1. Os resultados obtidos para as diferentes posições de usinagem demonstram variações do erro no volume de trabalho analisado.

O erro geométrico da perpendicularidade no plano ZX está mostrado na Figura 50.

Figura 50 - Perpendicularidade do Furo central com a Base A, no plano ZX, das peças-teste 1, 2 e 3



Fonte: O Autor (2021).

Da análise do gráfico da Figura 50, nota-se uma variação dos valores médios da perpendicularidade para as três posições de usinagem das peças-teste. O maior erro geométrico de perpendicularidade foi $(0,0099 \pm 0,0010)$ mm localizado na peça-teste 2 e o valor mínimo de foi de $(0,0059 \pm 0,0008)$ mm localizado na peça teste 1.

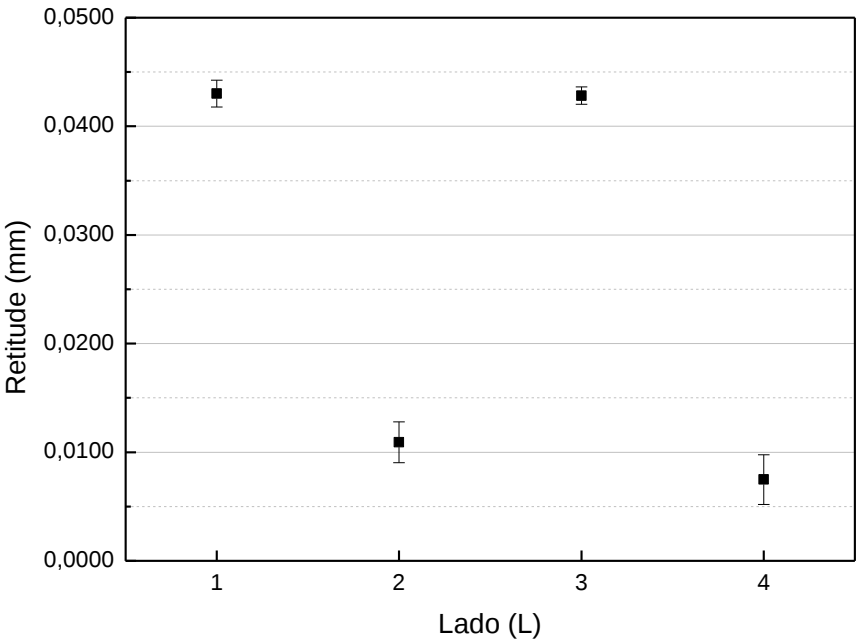
4.2.2 Quadrado

Todos os parâmetros geométricos avaliados no quadrado (Quadro 5), estão apresentados nas subseções a seguir.

4.2.2.1 Retitude dos Lados L1, L2, L3 e L4

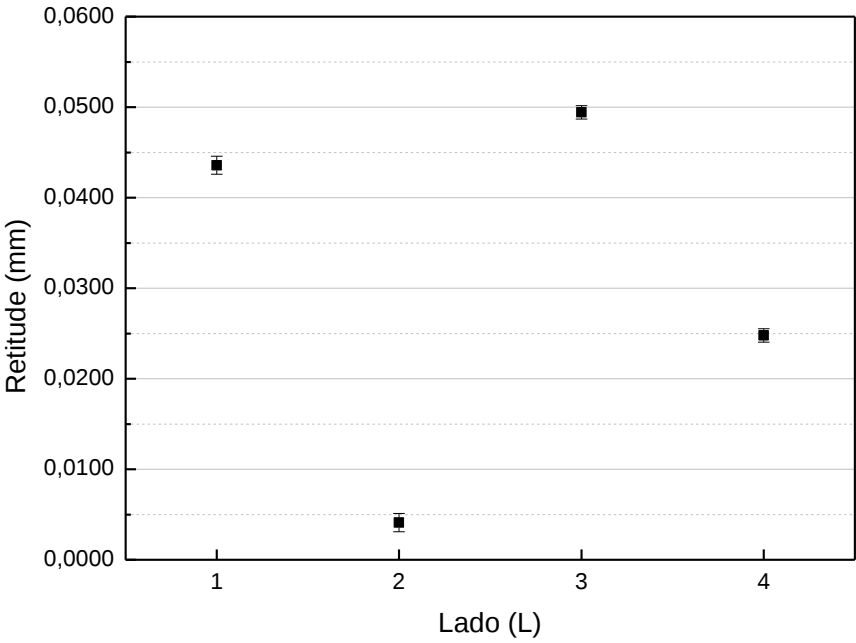
Antes de analisar os gráficos, deve-se notar que os lados L1 e L3 são paralelos entre si (Figura 37) e devido a posição de usinagem das peças-teste (Figura 32 e Figura 34) são paralelos ao eixo X da *router*. De forma análoga, os lados L2 e L4 são paralelos ao eixo Y da máquina-ferramenta. Dessa forma, pode-se associar os erros encontrados na peças-teste aos eixos da máquina. A retitude média dos lados L1 (Base B), L2, L3 e L4, que formam um quadrado para as três peças-teste usinadas estão mostradas nas Figura 51, Figura 52, Figura 53 e Figura 54.

Figura 51 - Retitude dos Lados L1, L2, L3 e L4 da peça-teste 1



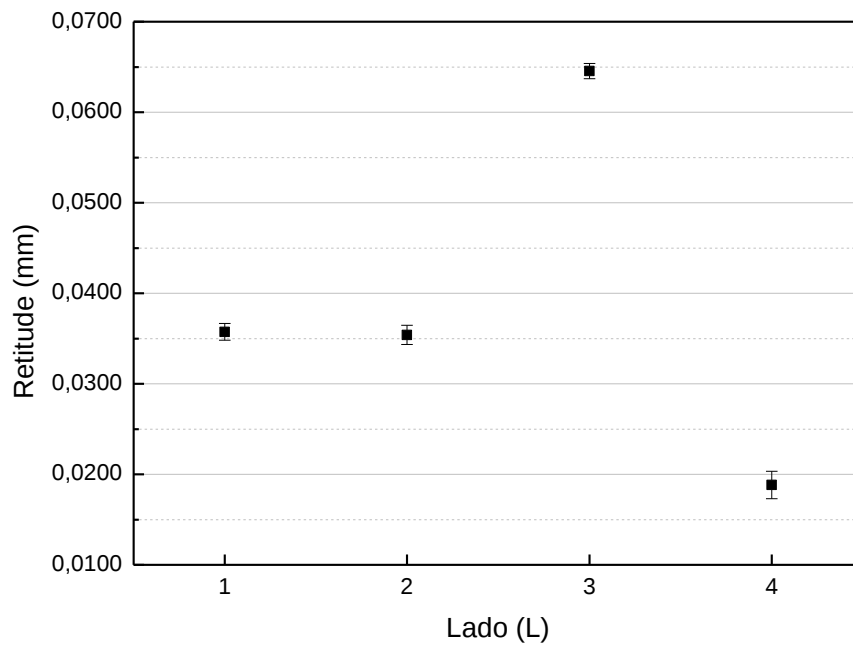
Fonte: O Autor (2021).

Figura 52 - Retitude dos Lados L1, L2, L3 e L4 da peça-teste 2



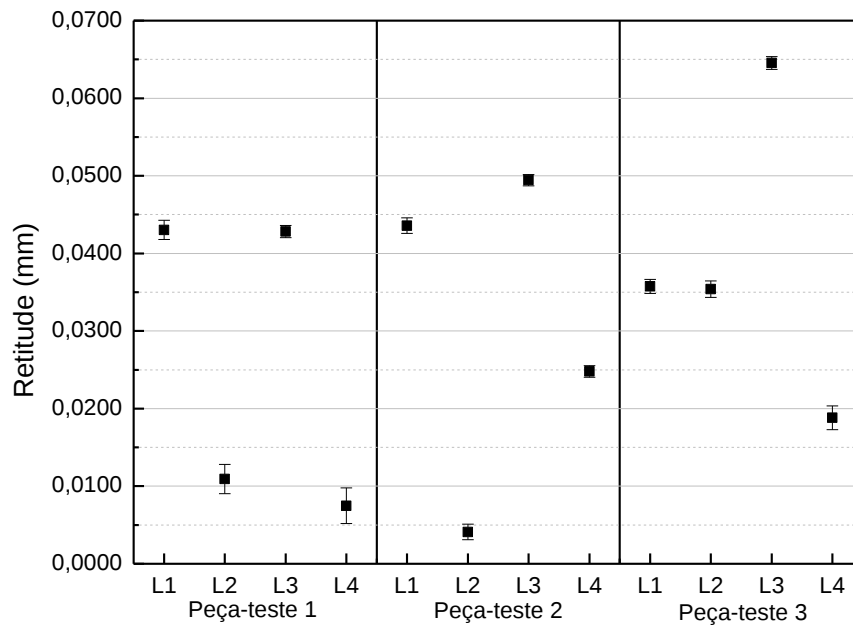
Fonte: O Autor (2021).

Figura 53 - Retitude dos lados L1, L2, L3 e L4 da peça-teste 3



Fonte: O Autor (2021).

Figura 54 - Retitude dos Lados L1, L2, L3 e L4 das peças-teste 1, 2 e 3



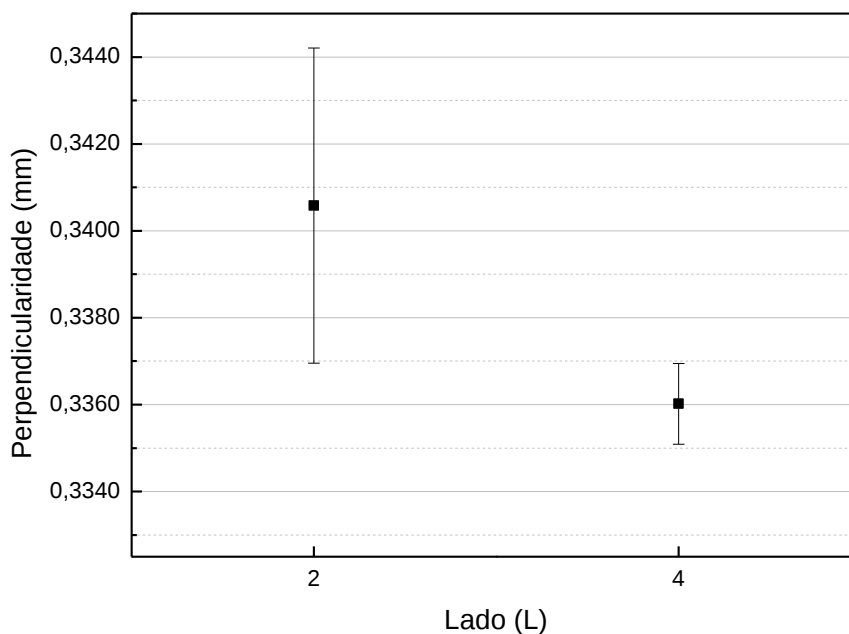
Fonte: O Autor (2021).

Da análise dos gráficos das Figura 51, Figura 52, Figura 53 e Figura 54 pode-se observar que o erro de retitude não apresenta grandes variações ao longo das posições de usinagem das peças-testes 1, 2 e 3. No geral, os erros de retitude para as linhas L1 e L3 são maiores e isso pode indicar algum problema na movimentação do eixo X da *router*. O valor máximo do erro geométrico de retitude encontrado foi de $(0,0645 \pm 0,0008)$ mm, localizado na linha L3 da peça-teste 3, e o valor mínimo foi de $(0,0041 \pm 0,0010)$ mm localizado no lado L2 da peça-teste 2.

4.2.2.2 Perpendicularidade dos Lados Adjacentes L2 e L4 em Relação à L1 (Base B)

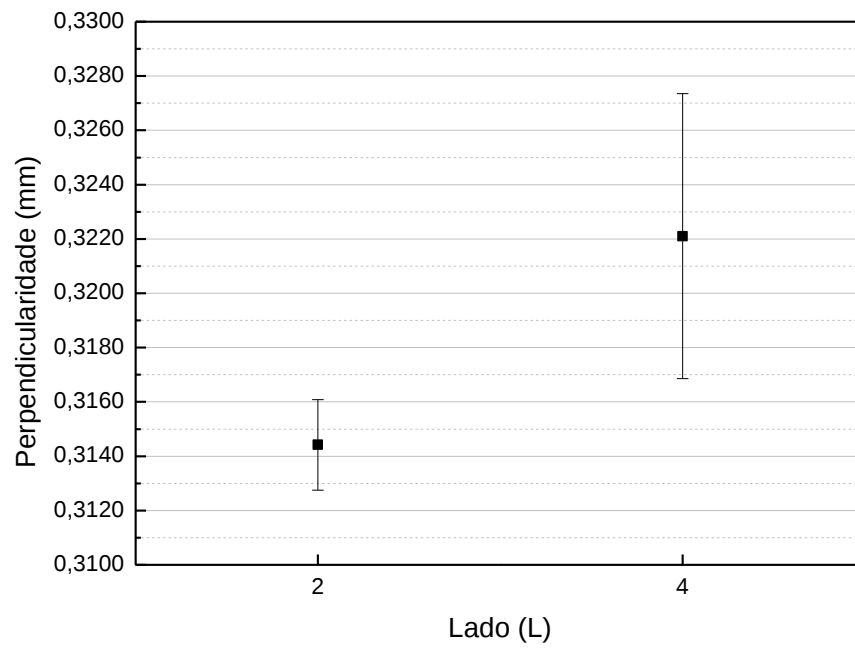
Devido à montagem feita para a usinagem das peças-teste, a ortogonalidade entre os eixos X e Y da *router* está refletida na ortogonalidade entre os lados L2 e L4 (alinhados ao eixo Y) e o lado L1 (alinhado ao eixo X). A perpendicularidade média dos lados L2 e L4 em relação à L1 (Base B) para as três peças-teste estão mostradas nas Figura 55, Figura 56, Figura 57 e Figura 58.

Figura 55 - Perpendicularidade entre L2, L4 e L1 da peça-teste 1



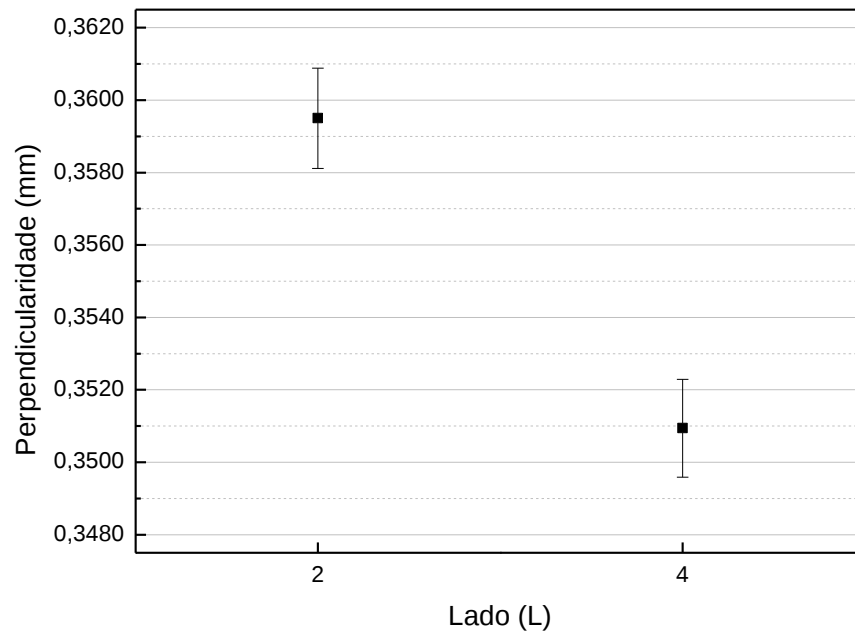
Fonte: O Autor (2021).

Figura 56 - Perpendicularidade entre L2, L4 e L1 da peça-teste 2



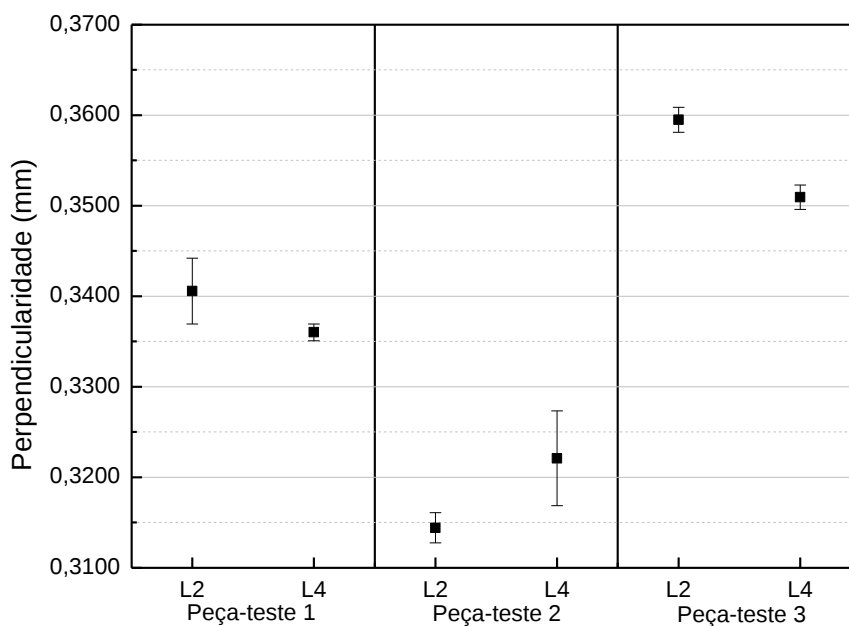
Fonte: O Autor (2021).

Figura 57 - Perpendicularidade entre L2, L4 e L1 da peça-teste 3



Fonte: O Autor (2021).

Figura 58 - Perpendicularidade entre L2, L4 e L1 das peças-teste 1, 2 e 3



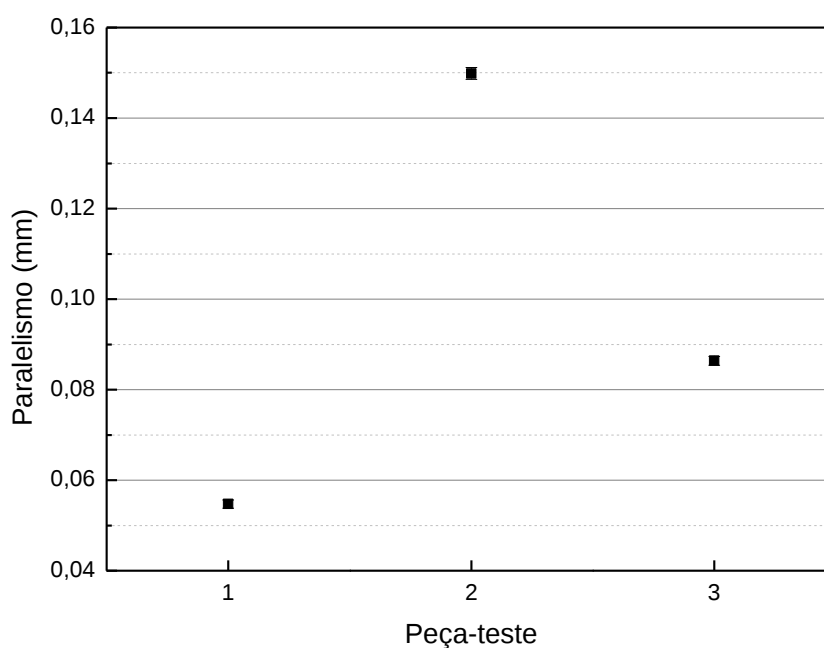
Fonte: O Autor (2021).

Da análise dos gráficos das Figura 55, Figura 56, Figura 57 e Figura 58 observa-se que o erro geométrico da perpendicularidade têm valores médios diferentes ao longo dos pontos de usinagem das peças. O maior erro de perpendicularidade foi de $(0,3595 \pm 0,0014)$ mm localizado no lado L2 da peça-teste 3 e o menor erro foi de $(0,3144 \pm 0,0017)$ mm localizado no lado L2 da peça-teste 2.

4.2.2.3 Paralelismo do Lado Oposto L3 e L1 (Base B)

O gráfico da Figura 59 mostra o valor médio do paralelismo entre o lado L1 e seu lado oposto L3 para as três peças-teste usinadas.

Figura 59 - Paralelismo entre L3 e L1 para as peças-teste 1,2 e 3



Fonte: O Autor (2021).

Observa-se no gráfico da Figura 59 diferentes erros médios de paralelismo ao longo das posições de usinagem. O maior erro de paralelismo entre os lados L3 e L1 foi de $(0,1499 \pm 0,0012)$ mm localizado na peça-teste 2 e o menor erro foi de $(0,0547 \pm 0,0009)$ mm localizado na peça teste 1.

4.2.3 Quadrado Inclinado

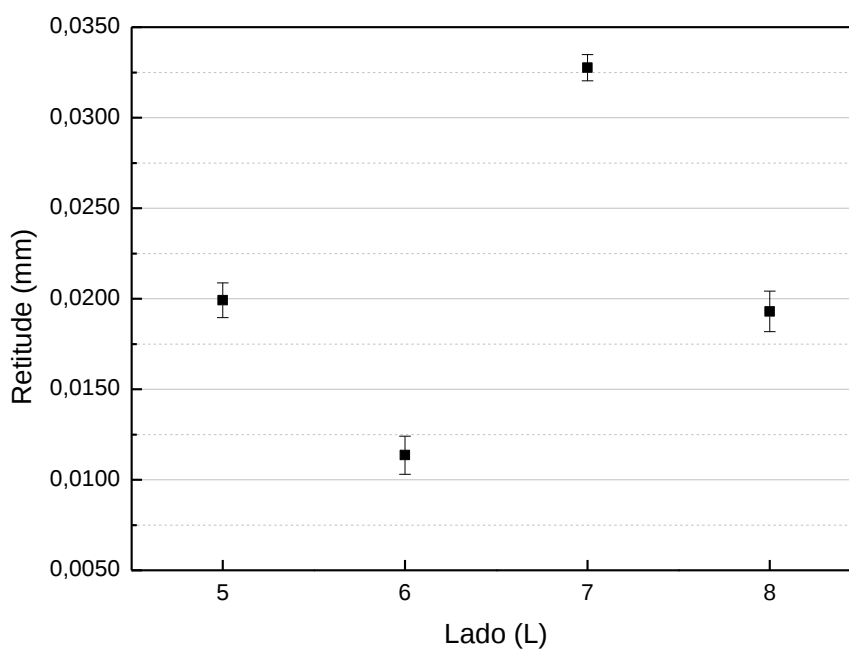
Todos os parâmetros geométricos avaliados no quadrado inclinado (Quadro 5), estão apresentados nas subseções a seguir.

4.2.3.1 Retitude dos Lados L5, L6, L7 e L8

Devido ao posicionamento das peças-teste (Figura 34), observa-se que para usinagem dos lados inclinados é necessário o movimento concomitante dos eixos X e Y, de modo que o valor da retitude obtida reflete também a capacidade do controle CNC em interpolar os pontos em linhas diagonais. Os lados L5, L6, L7 e L8 são oblíquos aos eixos X e Y e refletem o erro geométrico de retitude devido ao acionamento concomitante dos eixos X e Y da *router*. A retitude média dos lados L5,

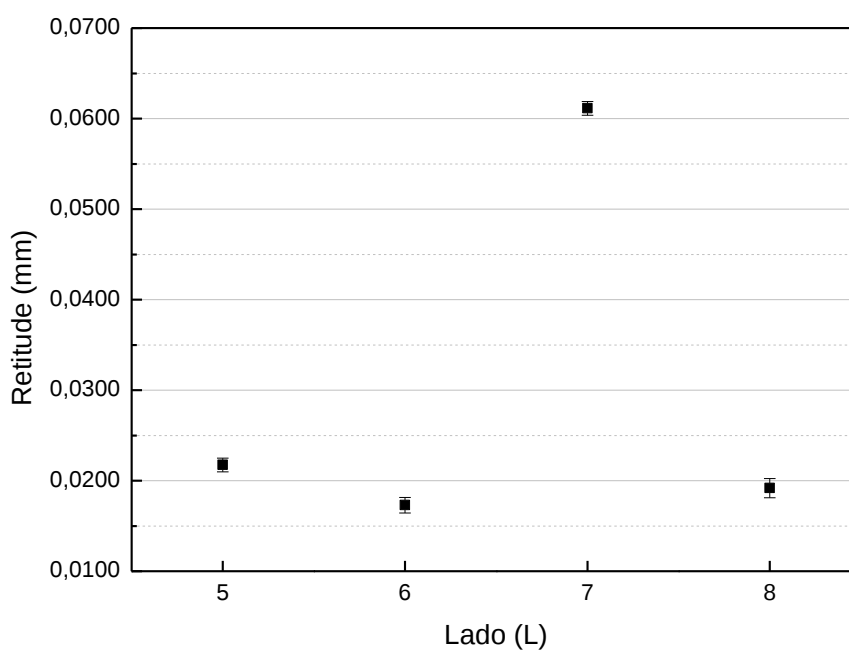
L6, L7 e L8 para as três peças-teste estão mostradas nos gráficos da Figura 60, Figura 61, Figura 62, e Figura 63.

Figura 60 - Retitude dos lados L5, L6, L7 e L8 da peça-teste 1



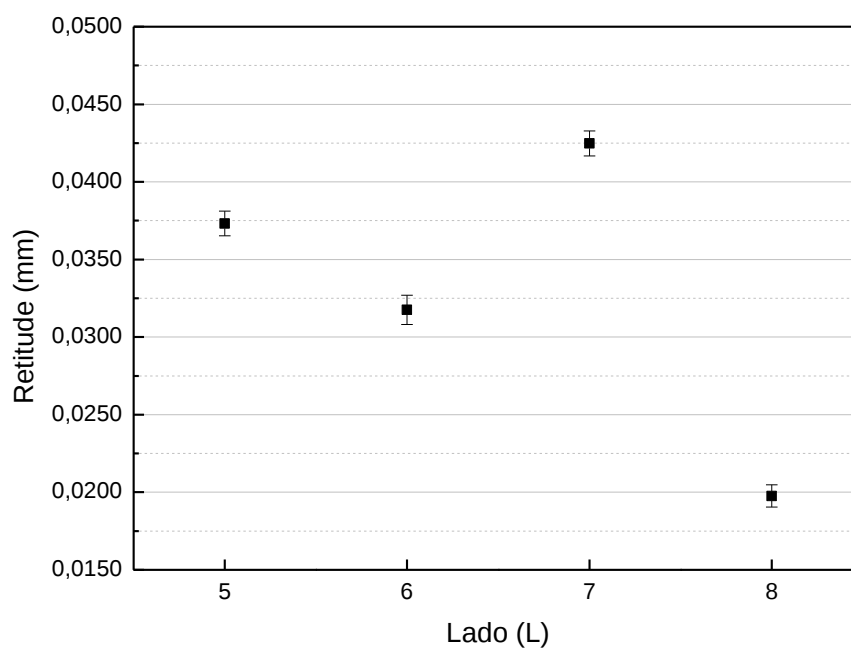
Fonte: O Autor (2021).

Figura 61 - Retitude dos lados L5, L6, L7 e L8 da peça-teste 2



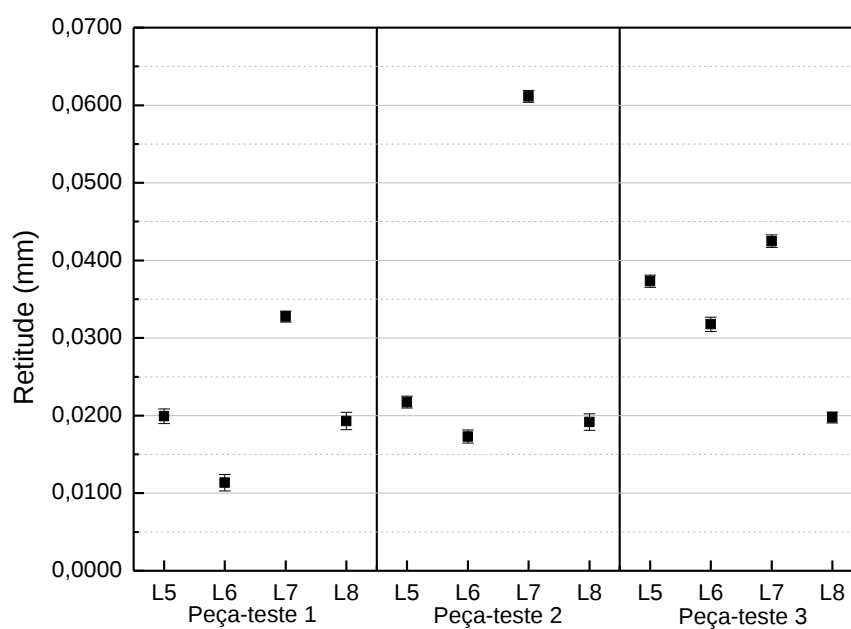
Fonte: O Autor (2021).

Figura 62 - Retitude dos lados L5, L6, L7 e L8 da peça-teste 3



Fonte: O Autor (2021).

Figura 63 - Retitude dos lados L5, L6, L7 e L8 das peças-teste 1, 2 e 3



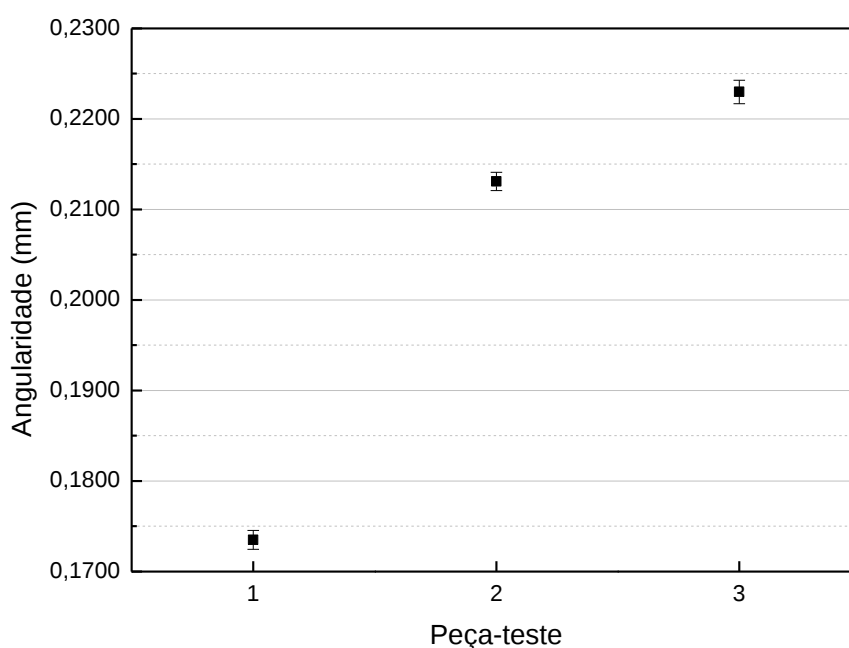
Fonte: O Autor (2021).

Os valores dos erros geométricos de retitude encontrados para o quadrado inclinado (Figura 63) são semelhantes aos valores encontrados para o quadrado (Figura 59). Esse é um indicativo de um funcionamento uniforme do tanto na usinagem de planos diagonais como planos paralelos ao eixo da máquina. O valor máximo encontrado foi de $(0,0611 \pm 0,0008)$ mm localizado no lado L7 da peça-teste 2 e o menor foi de $(0,0113 \pm 0,0009)$ mm localizado no lado L6 da peça-teste 1.

4.2.3.2 Angularidade do Ângulo de 75° (L9) em Relação à L1 (Base B)

A angularidade média entre o ângulo de 75° formado entre a linha L9 e L1 medida para as três peças-teste usinadas estão mostradas no gráfico da Figura 64.

Figura 64 - Angularidade do ângulo de 75° (L9) em relação à L1 (Base B) das peças-teste 1, 2 e 3



Fonte: O Autor (2021).

Da análise do gráfico da Figura 64, o erro geométrico de angularidade do ângulo de 75° tem um valor máximo de $(0,2230 \pm 0,0013)$ mm localizado na peça-teste 3 e um valor mínimo de $(0,1735 \pm 0,0010)$ mm localizado na peça-teste 2. Observa-se também uma diferença entre os valores obtidos nos diferentes pontos de usinagem.

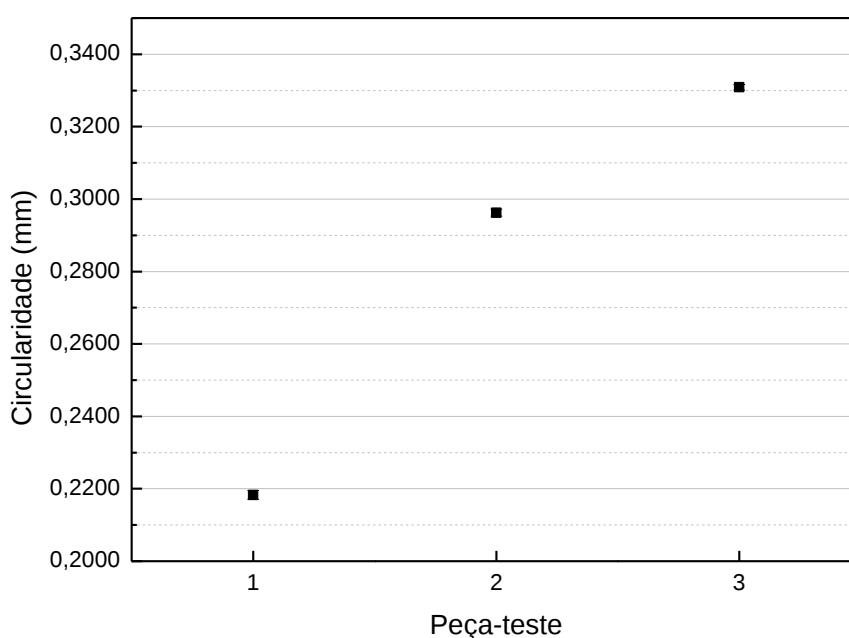
4.2.4 Círculo

Todos os parâmetros geométricos avaliados no círculo (Quadro 5), estão apresentados nas subseções a seguir.

4.2.4.1 Circularidade

A Circularidade média do Círculo Externo para as três peças-teste está mostrada no gráfico da Figura 65.

Figura 65 - Circularidade dos Círculos Externos das peças-teste 1, 2 e 3



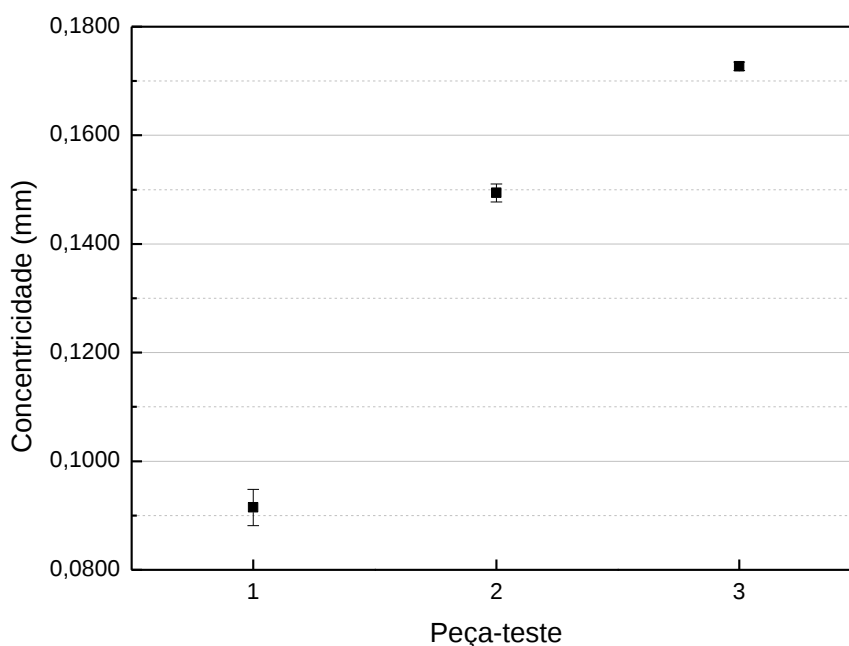
Fonte: O Autor (2021).

Da análise do gráfico da Figura 65, verifica-se que o erro de circularidade média apresentou valores distintos para os diferentes pontos de usinagem das peças-teste 1, 2 e 3. O erro máximo de circularidade encontrado foi de $(0,3309 \pm 0,0007)$ mm, localizado na peça-teste 3, e o erro mínimo encontrado foi de $(0,2183 \pm 0,0012)$ mm, localizado na peça-teste 1.

4.2.4.2 Concentricidade do Círculo Externo e o Furo Central

A concentricidade média medida entre o Círculo Externo e o Furo Central para as três peças-teste está apresentada no gráfico da Figura 66.

Figura 66 - Concentricidade do Círculo Externo e o Furo Central das peças-teste 1, 2 e 3



Fonte: O Autor (2021).

Da análise do gráfico da Figura 66, o erro geométrico de concentricidade apresentou valores médios distintos para as posições de usinagem das peças-teste 1, 2 e 3. O valor máximo do erro de concentricidade encontrado foi de $(0,1727 \pm 0,0008)$ mm medido na peça-teste 3 e o valor mínimo de foi de $(0,0915 \pm 0,0033)$ mm medido na peça-teste 1.

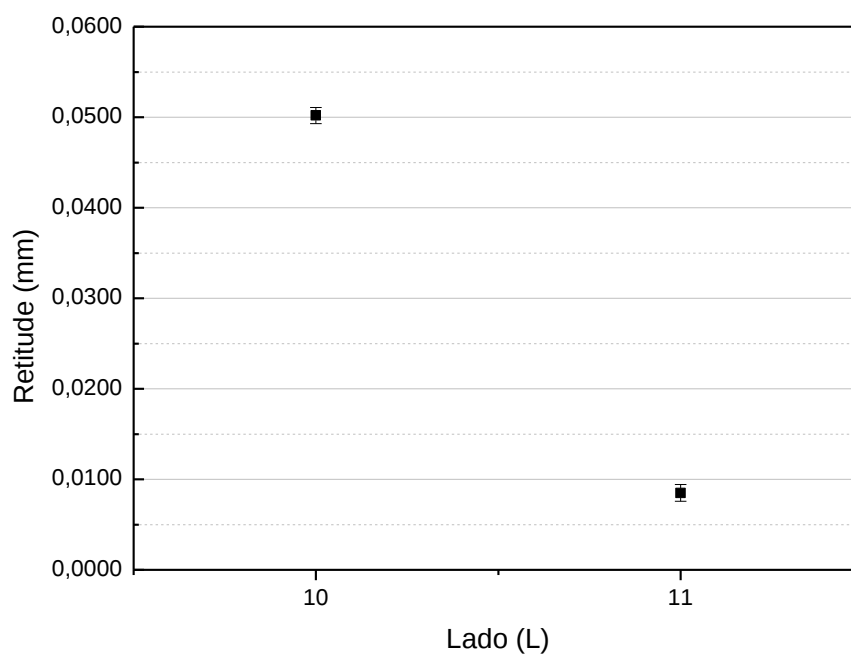
4.2.5 Faces Inclinadas

Todos os parâmetros geométricos avaliados nas faces inclinadas (Quadro 5), estão apresentados nas subseções a seguir.

4.2.5.1 Retitude das Faces L10 e L11

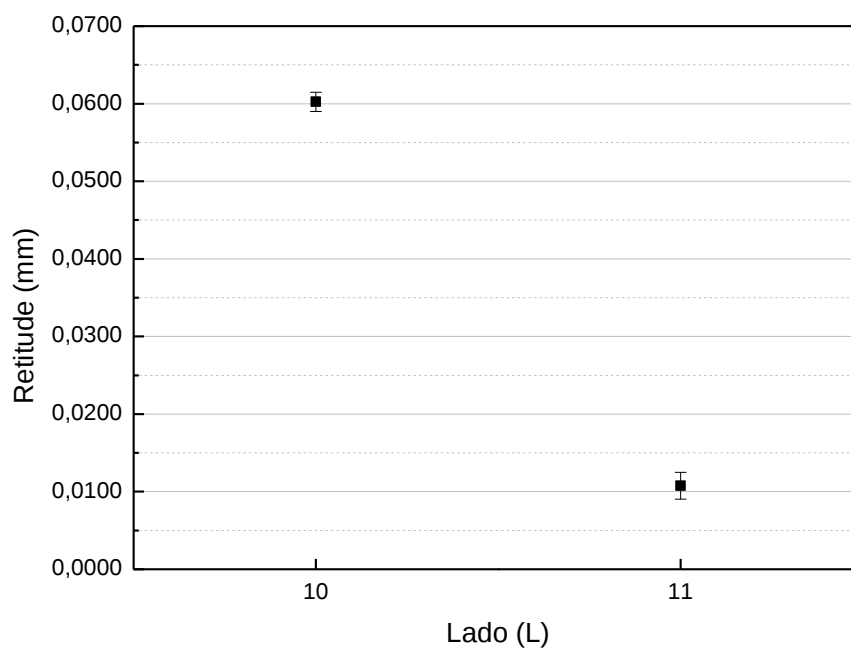
A retitude média dos lados L10 e L11 para as três peças-teste está mostrada nas Figura 67, Figura 68, Figura 69 e Figura 70.

Figura 67 - Retitude dos lados L10 e L11 da peça-teste 1



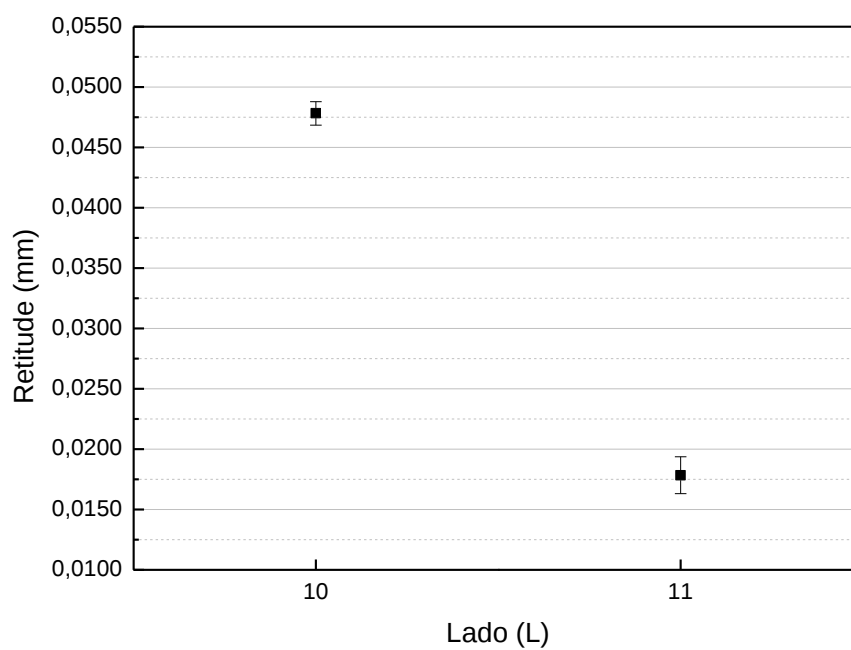
Fonte: O Autor (2021).

Figura 68 - Retitude dos lados L10 e L11 da peça-teste 2



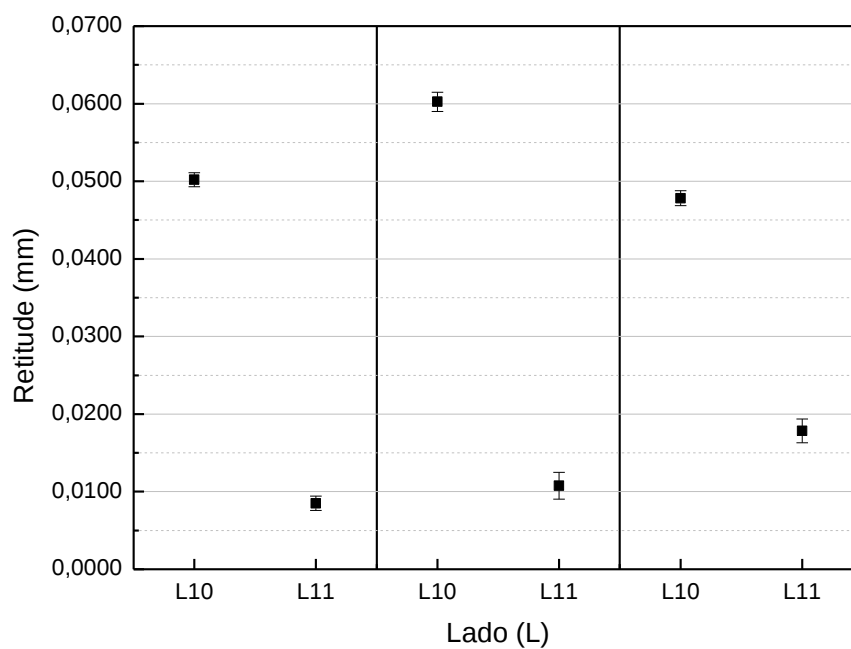
Fonte: O Autor (2021).

Figura 69 - Retitude dos lados L10 e L11 da peça-teste 3



Fonte: O Autor (2021).

Figura 70 - Retitude dos lados L10 e L11 das peças-teste 1, 2 e 3



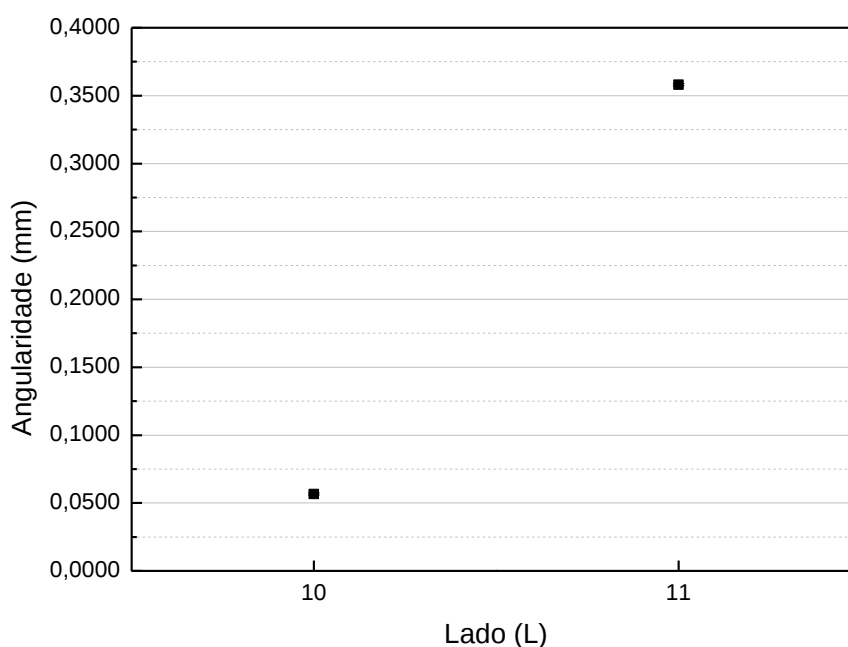
Fonte: O Autor (2021).

Da análise dos gráficos das Figura 67, Figura 68, Figura 69 e Figura 70, verifica-se que o erro de retitude entre os lados L10 e L11 apresentam patamares distintos entre si nas três posições de usinagem. O valor máximo foi de $(0,0602 \pm 0,0012)$ mm localizado no L10 da peça-teste 2, e o valor mínimo encontrado foi de $(0,0085 \pm 0,0009)$ mm localizado no lado L11 da peça-teste 1. No geral, a retitude dos lados L10 apresentou valores em média 5 vezes maiores que os lados L11, o que pode indicar um maior erro do acionamento eixo X da *router*, uma vez que a usinagem do lado L10 demanda de uma maior deslocamento desse mesmo eixo.

4.2.5.2 Angularidade da L10 e L11 em Relação à L1 (Base B)

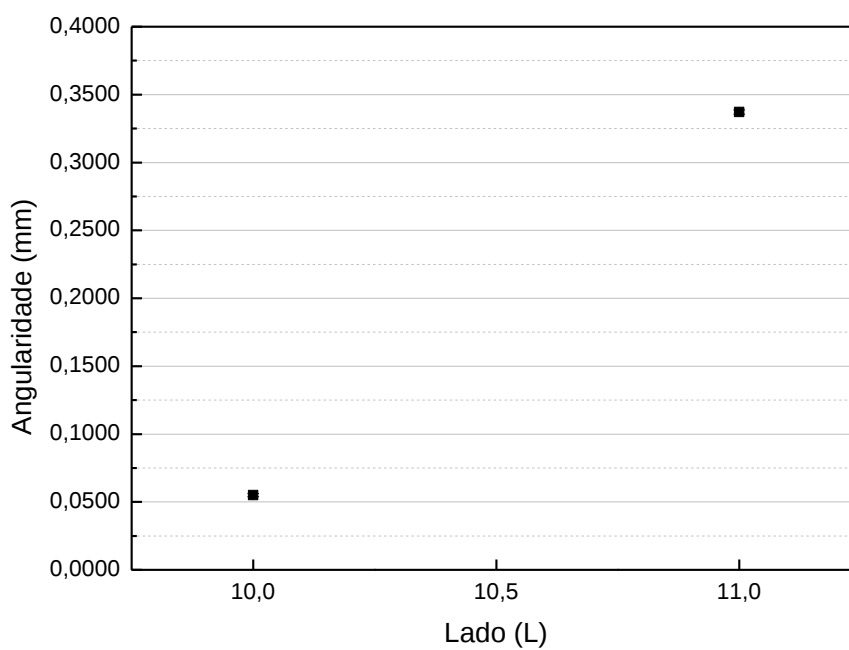
As linhas medidas L10 formam um ângulo de 3° em relação à linha medida L1 e as linhas medidas L11 formam um ângulo de 93° em relação à linha L1 (ver Figura 26). A angularidade média dos lados L10 e L11 em relação à Base B para as três peças-teste estão mostradas nos gráficos da Figura 71, Figura 72, Figura 73 e Figura 74.

Figura 71 - Angularidade dos lados L10 e L11 em relação à L1 da peça-teste 1



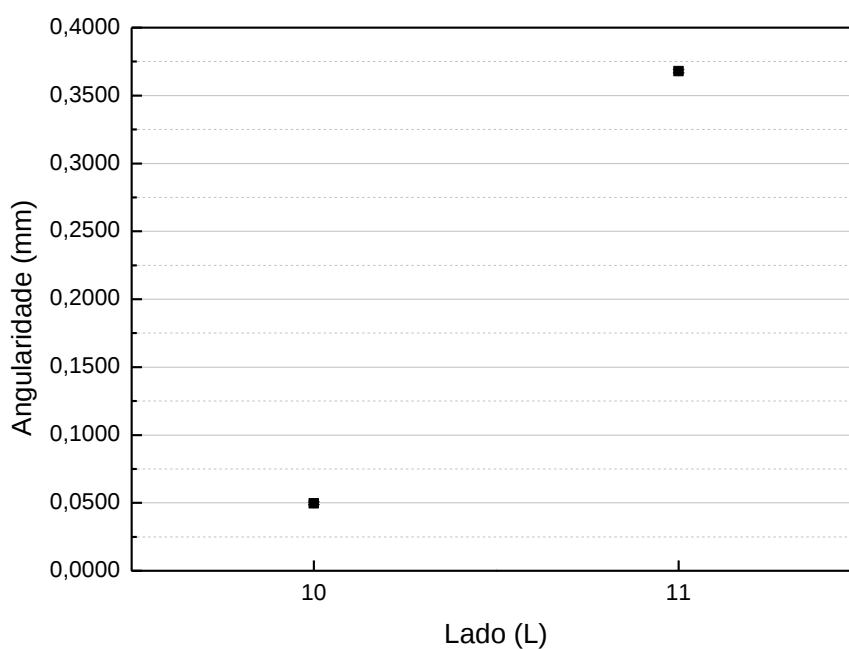
Fonte: O Autor (2021).

Figura 72 - Angularidade dos lados L10 e L11 em relação à L1 da peça-teste 2



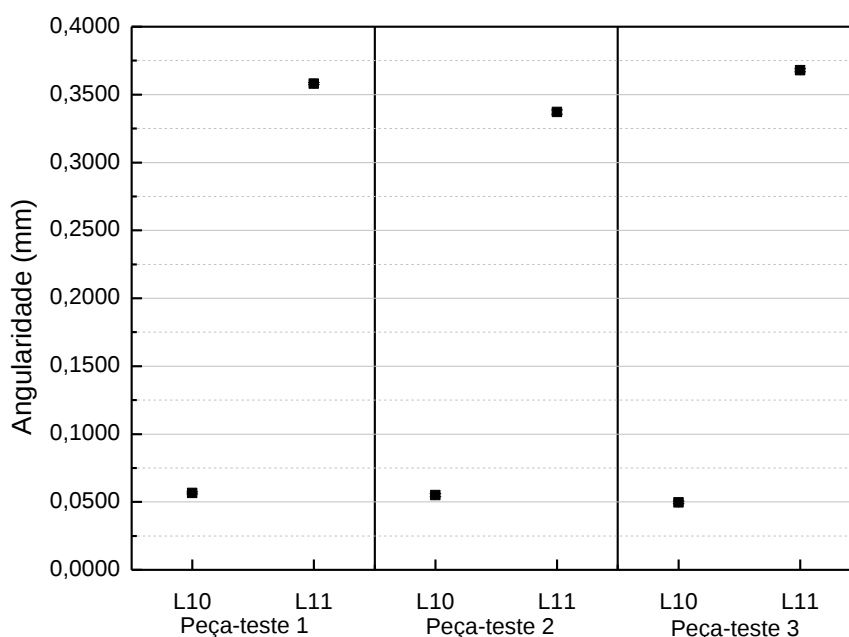
Fonte: O Autor (2021).

Figura 73 - Angularidade dos lados L10 e L11 em relação à L1 da peça-teste 3



Fonte: O Autor (2021).

Figura 74 - Angularidade dos lados L10 e L11 em relação à L1 das peças-teste 1, 2 e 3



Fonte: O Autor (2021).

Da análise dos gráficos das Figura 71, Figura 72, Figura 73 e Figura 74 observa-se um comportamento similar para o erro de angularidade nas três posições de usinagem. O valor máximo medido foi de $(0,3679 \pm 0,0012)$ mm localizado na linha L11 da peça-teste 3. O erro mínimo encontrado foi de $(0,0497 \pm 0,0010)$ mm localizado no lado L10 da peça-teste 3.

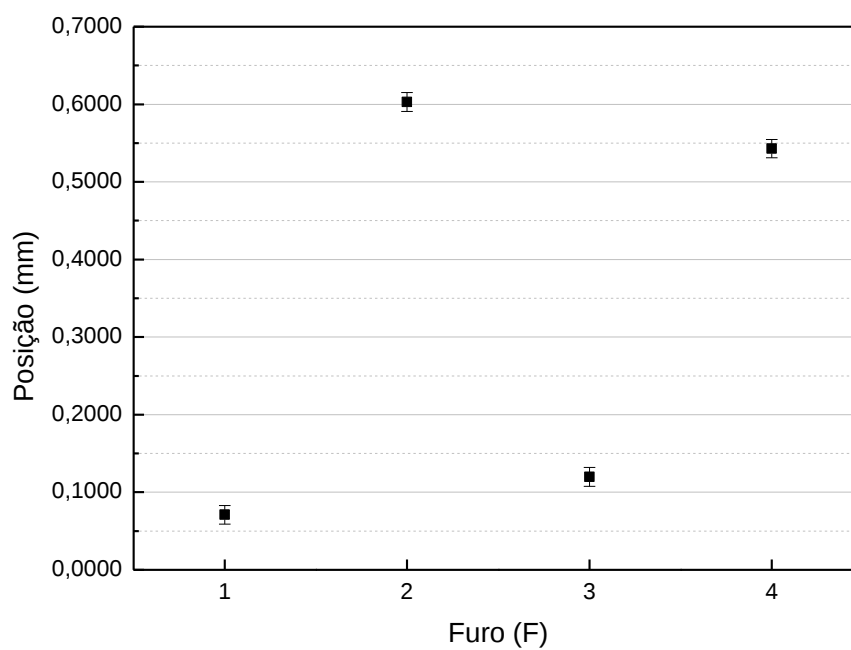
4.2.6 Furos Fresados

Todos os parâmetros geométricos avaliados nos furos fresados (Quadro 5), estão apresentados nas subseções a seguir.

4.2.6.1 Posição dos Furos F1, F2, F3 e F4 em Relação ao Furo Central

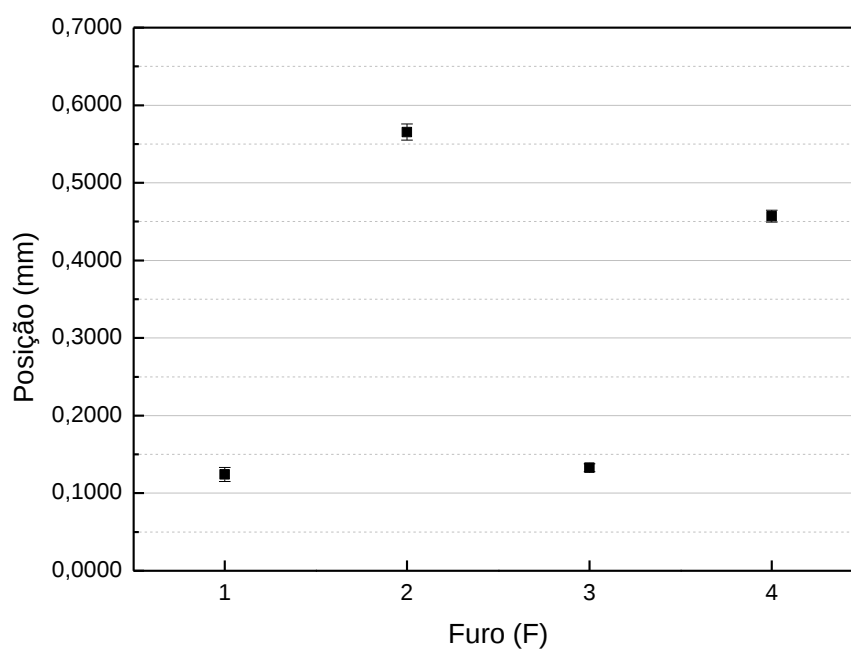
O erro de posicionamento médio dos furos F1, F2, F3 e F4 em relação ao Furo Central estão mostrados graficamente para as três peças-teste na Figura 75, Figura 76, Figura 77 e Figura 78.

Figura 75 - Posição dos Furos F1, F2, F3 e F4 em relação ao Furo Central da peça-teste 1



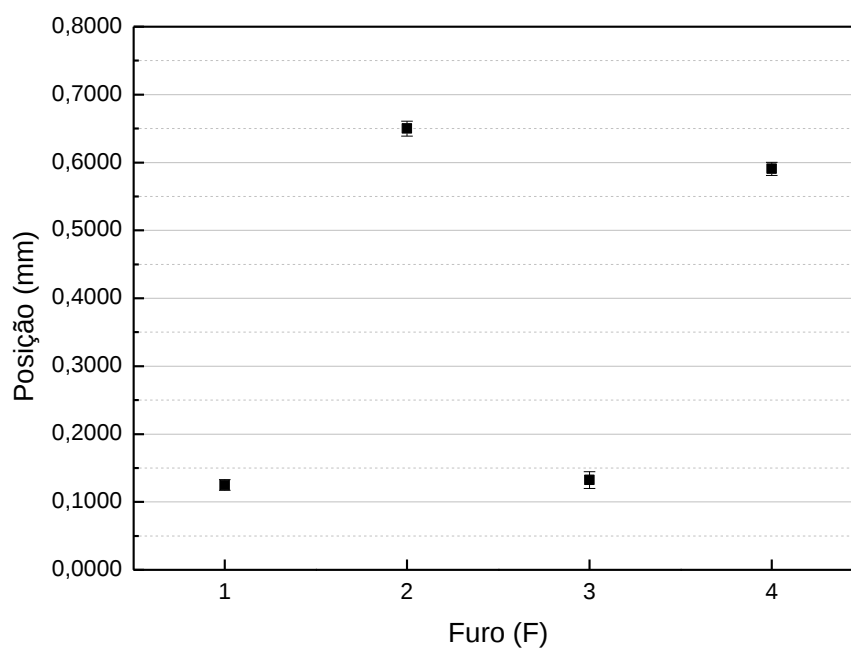
Fonte: O Autor (2021).

Figura 76 - Posição dos Furos F1, F2, F3 e F4 em relação ao Furo Central da peça-teste 2



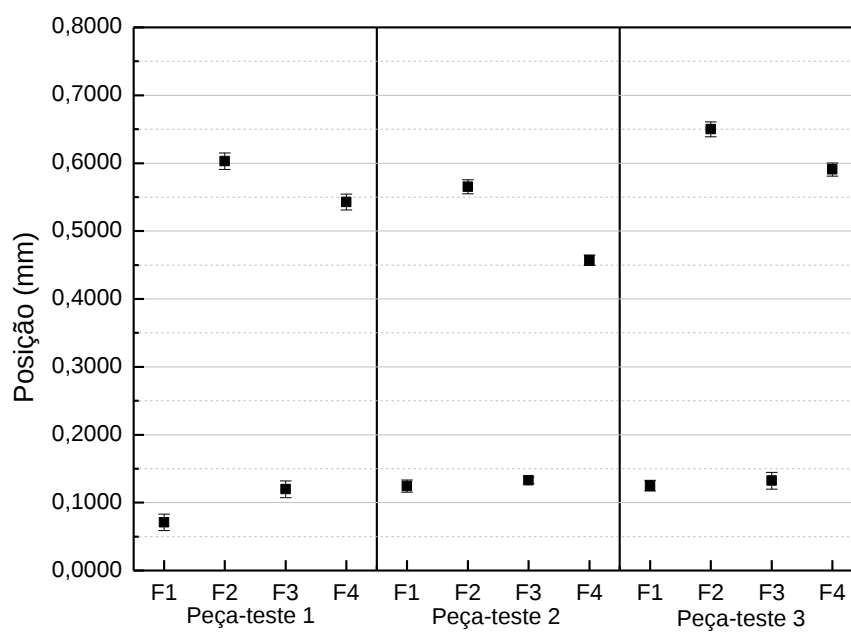
Fonte: O Autor (2021).

Figura 77 - Posição dos Furos F1, F2, F3 e F4 em relação ao Furo Central da peça-teste 3



Fonte: O Autor (2021).

Figura 78 - Posição dos Furos F1, F2, F3 e F4 em relação ao Furo Central das peças-teste 1, 2 e 3



Fonte: O Autor (2021).

Da análise dos gráficos das Figura 75, Figura 76, Figura 77 e Figura 78 verifica-se um padrão de comportamento similar para as três posições de usinagem. No geral, os furos F2 e F4 apresentaram os maiores erros de posicionamento. Ao cruzar essa informação com a cinemática da usinagem dos furos gerada pelo CAM, observou-se que para a usinagem de F2 e F4 a ferramenta de corte foi deslocada no eixo X da *router*. O maior erro geométrico de posição de $(0,6498 \pm 0,0108)$ mm localizado no furo F2 da peça-teste 3 e o menor erro foi de $(0,0709 \pm 0,0119)$ mm localizado no furo F1 da peça-teste 1.

4.3 SUMARIZAÇÃO DOS ERROS GEOMÉTRICOS DA ROUTER

De posse dos resultados dos 12 parâmetros geométricos medidos por meio dos ensaios de avaliação de usinagem das peças-teste e demonstrados Seção 4.2, foram criadas duas tabelas de especificações com os erros geométricos máximos e mínimos obtidos. O objetivo dessas tabelas é determinar a capacidade de *router*, em termos de parâmetros geométricos, na usinagem de peças dentro das condições propostas e facilitar a comparação entre os valores.

Na Tabela 10 estão expressos os erros máximos e na Tabela 11 erros mínimos dos parâmetros geométricos. Todos os parâmetros a seguir especificados na Tabela 10 e Tabela 11 estão expressos por seus valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%.

Tabela 10 – Máximos erros geométricos da *router*

Parâmetro Geométrico	Valor (mm)	Localização
Cilindricidade	$0,0095 \pm 0,0007$	Furo Central; peça-teste 1
Perpendicularidade YZ	$0,0329 \pm 0,0010$	Furo Central; peça-teste 1
Perpendicularidade ZX	$0,0099 \pm 0,0010$	Furo Central; peça-teste 2
Perpendicularidade XY	$0,3595 \pm 0,0014$	L2; peça-teste 3
Paralelismo	$0,1499 \pm 0,0013$	L3; peça-teste 2
Retitude	$0,0645 \pm 0,0008$	L3; peça-teste 3
Angularidade	$0,3679 \pm 0,0012$	L11; peça-teste 3
Circularidade	$0,3309 \pm 0,0007$	Círculo Externo; peça-teste 3
Concentricidade	$0,1727 \pm 0,0008$	Círculo Externo; peça-teste 3
Posição	$0,6498 \pm 0,0108$	F2; peça-teste 3

Fonte: O Autor (2021).

Tabela 11 - Mínimos erros geométricos da *router*

Parâmetro Geométrico	Valor (mm)	Localização
Cilindricidade	$0,0059 \pm 0,0007$	Furo Central; peça-teste 2
Perpendicularidade YZ	$0,0228 \pm 0,0008$	Furo Central; peça-teste 1
Perpendicularidade ZX	$0,0059 \pm 0,0008$	Furo Central; peça-teste 1
Perpendicularidade XY	$0,3144 \pm 0,0017$	L2; peça-teste 2
Paralelismo	$0,0547 \pm 0,0009$	L3; peça-teste 1
Retitude	$0,0041 \pm 0,0010$	L2; peça-teste 2
Angularidade	$0,0497 \pm 0,0010$	L10; peça-teste 3
Circularidade	$0,2183 \pm 0,0012$	Círculo Externo; peça-teste 1
Concentricidade	$0,0915 \pm 0,0033$	Círculo Externo; peça-teste 1
Posição	$0,0709 \pm 0,0119$	F1; peça-teste 1

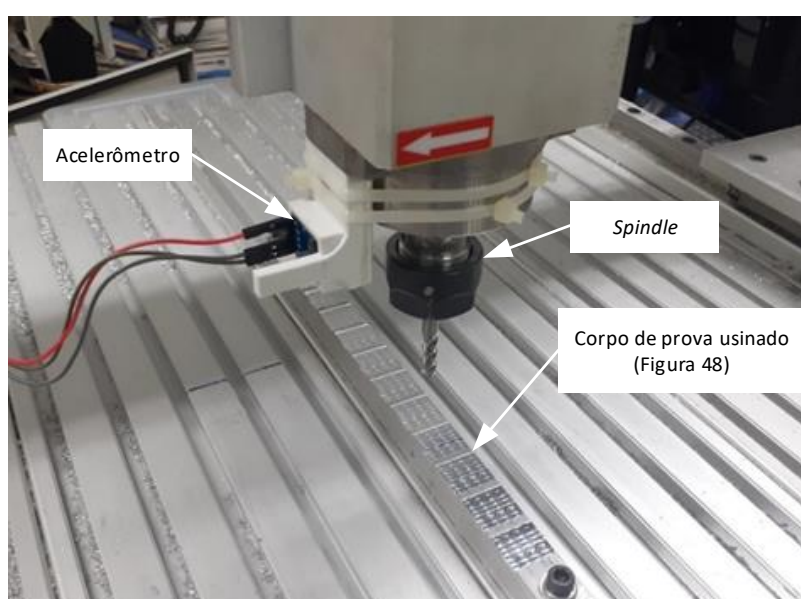
Fonte: O Autor (2021).

Esses são os erros geométricos atuais da *router* para usinagem da madeira do tipo maçaranduba no volume de trabalho analisado.

4.4 ENSAIOS DO SISTEMA DE MONITORAMENTO

A usinagem do corpo de prova (Figura 42) para a validação do sistema de monitoramento foi realizada conforme o planejamento da Tabela 9 e o resultado final da peça fabricada está mostrado na Figura 79.

Figura 79 - Corpo de prova usinado



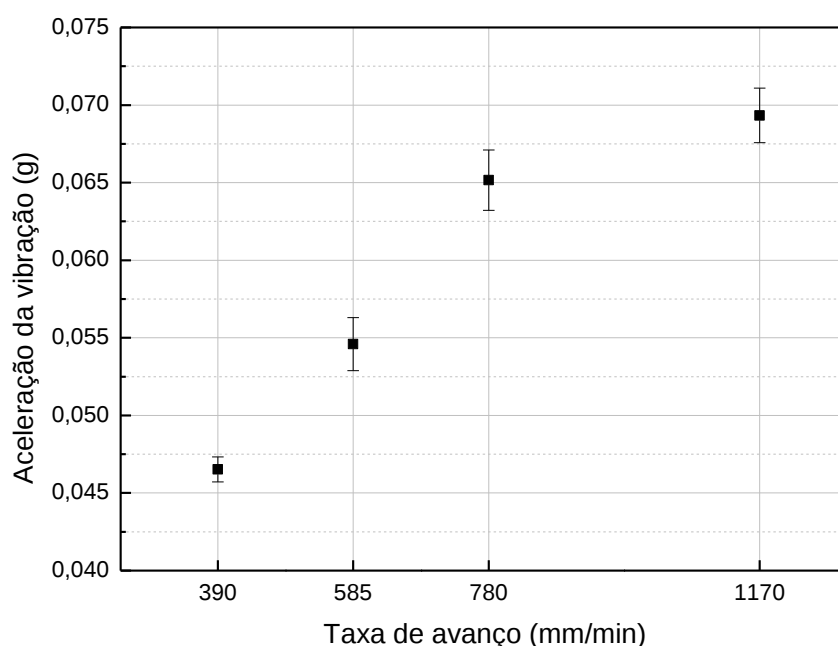
Fonte: O Autor (2021).

Nas subseções a seguir serão mostrados os resultados da análise dos dados obtidos pelo sistema de aquisição durante a usinagem dos rebaixos. Os dados completos das medições de rugosidade e vibração, utilizados para a plotagem dos gráficos a seguir, estão no apêndice D.

4.4.1 Taxa de Avanço versus Aceleração da Vibração

Realizados os experimentos descritos na Tabela 9 foi gerado o gráfico da velocidade de avanço (mm/min) *versus* aceleração da vibração (g) conforme mostrado no gráfico da Figura 80.

Figura 80 – Taxa de avanço versus aceleração da vibração



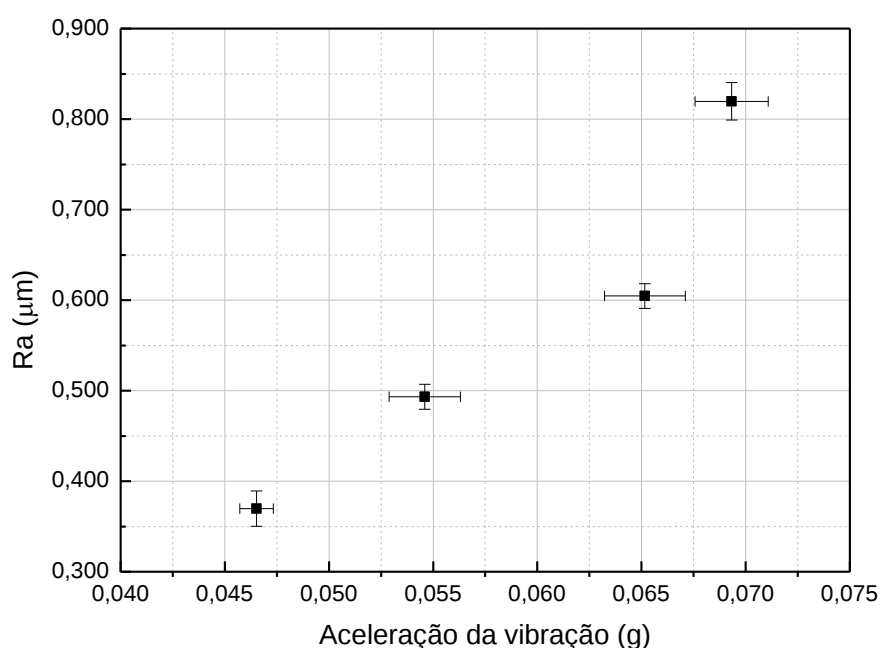
Fonte: O Autor (2021).

O gráfico da Figura 80 mostra um crescimento da aceleração da vibração com o aumento da taxa de avanço. Esse comportamento é clássico e previsível (BENARDOS; VOSNIAKOS, 2003; KORZENIEWSKI; ZNOJKIEWICZ, 2017; ALONSO; MARCELO, 2009). Isso demonstra um correto funcionamento do sistema de aquisição proposto uma vez que foi possível detectar um comportamento conhecido na literatura. Todas as quatro acelerações medidas são distintas e não se sobrepõem na faixa analisada.

4.4.2 Aceleração da Vibração versus Rugosidade Superficial

Após realizada a usinagem do corpo de prova foi medida a rugosidade média (R_a), em cada rebaixo, para a criação do gráfico da aceleração da vibração (g) versus R_a (μm) mostrado na Figura 81.

Figura 81 - Aceleração da vibração versus rugosidade superficial



Fonte: O Autor (2021).

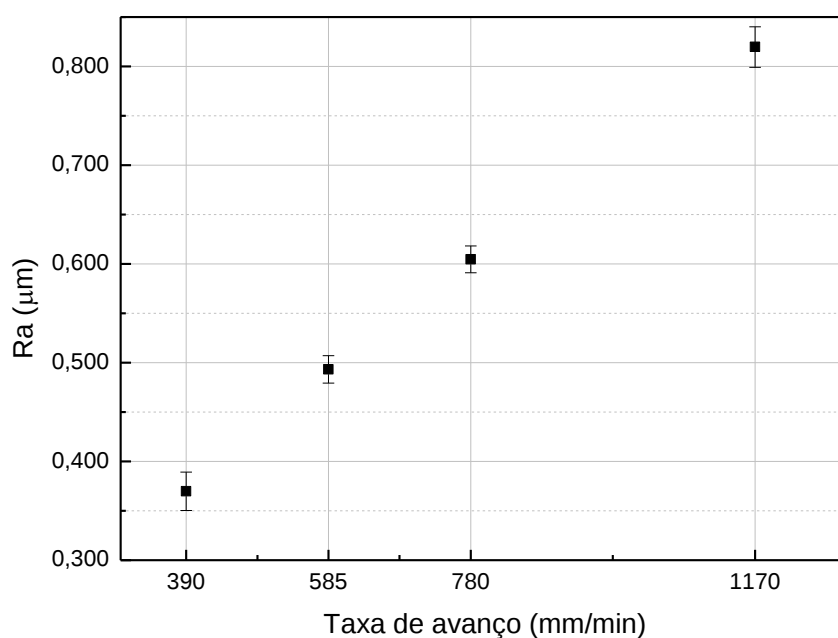
Da análise do gráfico da Figura 81, nota-se um aumento da rugosidade média juntamente com o aumento da velocidade de vibração semelhante ao comportamento apresentado no gráfico da Figura 80. Os experimentos foram realizados a uma velocidade de corte fixa de 245 m/min e variando-se apenas a taxa de avanço. Dessa forma os efeitos gerados foram o aumento da rugosidade superficial e da aceleração da vibração e esses são efeitos clássicos (PATEL; PATNI, 2014; BHOGAL *et al.*, 2015; JANG *et al.*, 1996; ALONSO; MARCELO, 2009). De posse desses dados, por exemplo, alarmes podem ser criados no sistema de monitoramento para informar ao usuário estimativas da rugosidade em tempo real e até interromper o processo de usinagem caso o valor da vibração exceda o limite desejado. São inúmeras as possibilidades de se trabalhar com os dados do sistema de aquisição, uma vez que o Arduino capta o sinal do acelerômetro constantemente através de sua entrada

analógica. O *Raspberry Pi* possibilita a criação de um sistema *IoT* onde os dados do acelerômetro podem ser processados paralelamente em diferentes algoritmos e de qualquer lugar por meio da *internet*.

4.4.3 Taxa de Avanço versus Rugosidade Superficial

A variação da rugosidade superficial em função da taxa de avanço está apresentada graficamente na Figura 82.

Figura 82 –Taxa de avanço versus rugosidade superficial



Fonte: O Autor (2021).

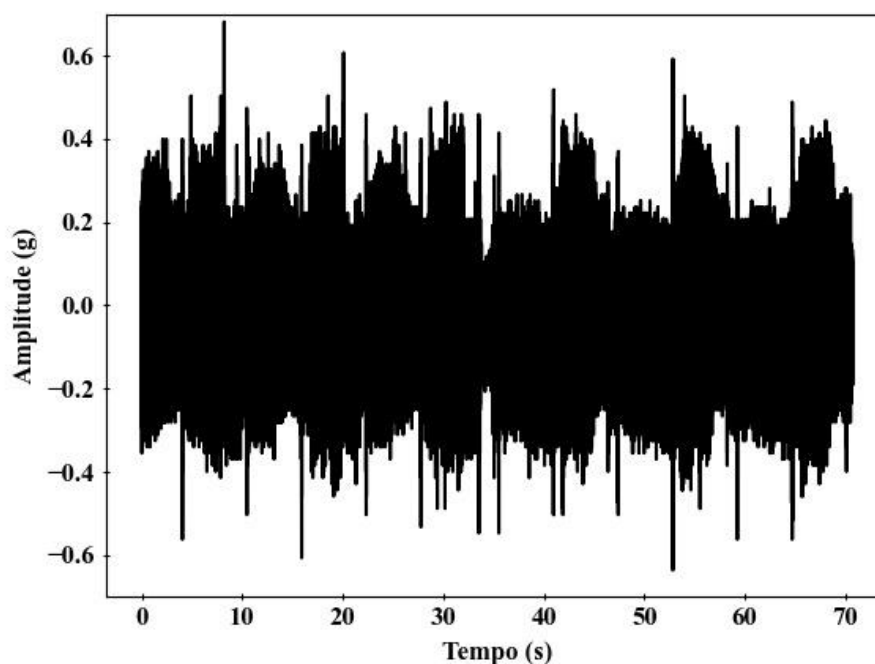
Da análise do gráfico da Figura 82, foi observado o comportamento esperado que confirma o aumento da rugosidade média com o aumento da taxa de avanço (SEIREG; LINDBERG, 1976; LU, 2007; BENARDOS; VOSNIAKOS, 2003; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

4.4.4 Vibração no Domínio da Frequência

Os sinais das vibrações mecânicas originalmente adquiridos estão no domínio do tempo e não fornecem informações precisas sobre a sua composição (AMBHORE et al., 2015). Como exemplo de um sinal no domínio no tempo tem-se na Figura 83

um gráfico que representa a aquisição feita para a usinagem do corpo de prova com avanço por dente de 0,01 mm/rot conforme a condição de corte 1 (Tabela 9).

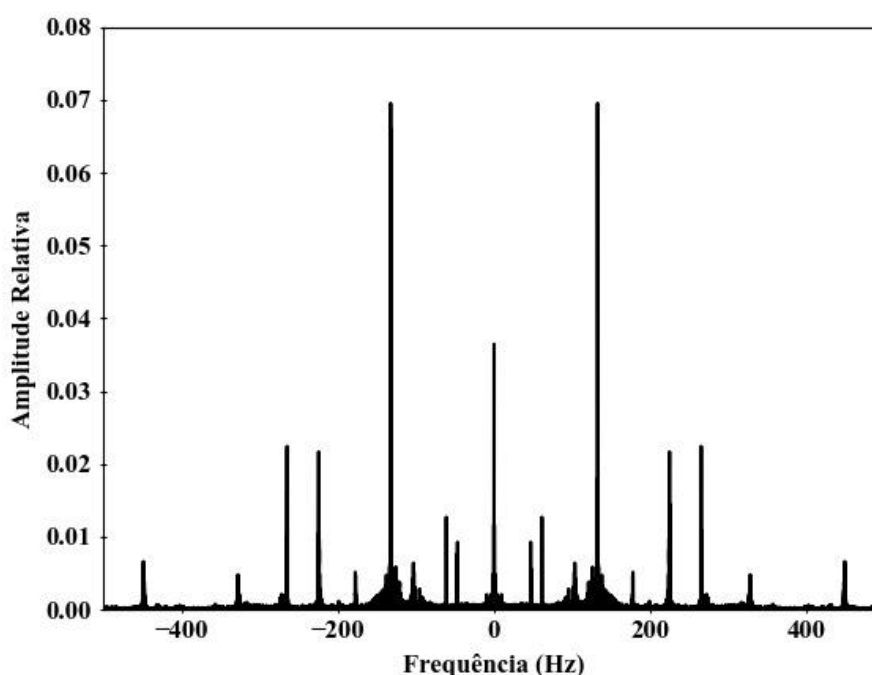
Figura 83 - Vibração no domínio do tempo



Fonte: O Autor (2021).

Do gráfico da Figura 83, obtido durante o processo de usinagem, é possível notar claramente a diferença dos níveis de vibração para o corte concordante e discordante. O tempo de aquisição total durou um pouco mais que 70 segundos e ao longo dele é perceptível um padrão de oscilação com picos maiores e menores. A descontinuidade central no gráfico da Figura 83 representa um longo tempo de deslocamento, sem corte de material, que ocorreu entre a usinagem de duas áreas iguais para formar o rasgo. Esse gráfico da oscilação no tempo foi utilizado para calcular a oscilação da aceleração da vibração média das seções anteriores. Porém na análise das vibrações, a principal vantagem do é a natureza repetitiva do sinal e são claramente distribuídos como picos, no espectro da frequência, onde a repetição acontece (LAURO *et al.*, 2014). Por meio da aplicação da Transformada Discreta de Fourier (DFT) tem-se o sinal da aceleração no domínio da frequência mostrado em Figura 84 para a mesma condição de teste mostra no gráfico da Figura 83.

Figura 84 - Vibração no domínio da frequência



Fonte: O Autor (2021).

No sinal do domínio da frequência tem-se um pico na frequência de giro e vários outros picos harmônicos são observados ao longo do espectro. A análise desse espectro no domínio da frequência pode fornecer informações importantes para o estudo do Monitoramento da Condição de Máquina (MCM) e Monitoramento da Condição de Ferramenta (TCM) (AMBHORE *et al.*, 2015; BOMBIŃSKI *et al.*, 2016; CARDEN, 2004; CASTELBAJAC *et al.*, 2014; GOYAL; PABLA, 2015). Conhecidas as frequência básicas da *router* referente à parâmetros como: número de polos dos motores, rotação, número de dentes da ferramenta de corte, características dos mancais de rolamento, por exemplo, pode-se mitigar a origem de cada pico do gráfico (Figura 84). Assim, pode-se destacar a capacidade computacional do sistema de monitoramento criado, devido a utilização da *Raspberry Pi*, nos estudos de MCM e TCM.

5 CONCLUSÃO

O sistema de controle CNC da *router* foi instalado com sucesso. Toda a malha de controle projetada, montada e testada promoveu o controle e automação da *router* com um funcionamento muito satisfatório.

Os ensaios de avaliação geométrica atestaram a capacidade da máquina-ferramenta no volume analisado. Foram obtidos os erros geométricos de cilindricidade, perpendicularidade, retitude, paralelismo, angularidade, circularidade, concentricidade e posição pela a usinagem de peças-teste em madeira, desse modo fica então determinada a capacidade da máquina para atingir as tolerâncias na ordem de grandeza dos valores medidos. Alguns erros geométricos medidos indicam a provável origem de suas causas na máquina. Os erros de posição, medidos nos furos F2 e F4, apresentaram valores elevados, provavelmente, devido ao posicionamento da ferramenta de corte em deslocamentos no eixo X. Os erros de retitude, medidos nas linhas L1, L3 e L10, apresentam valores elevados na usinagem ao longo do eixo X. Os erros de perpendicularidade entre os planos XY, YZ e ZX indicam a necessidade de ajustes físicos na *router*.

O sistema de monitoramento das vibrações mecânicas desenvolvido mostrou-se sensível o suficiente para detectar variações nas vibrações provocadas por variações nas condições de usinagem. Dessa forma, é possível prever a rugosidade superficial de peças usinadas em diferentes condições. Adicionalmente, o sistema de monitoramento das condições de usinagem oferece suporte a aplicações de MCM e TCM. Além do mais os *hardwares*, empregados no sistema de controle e monitoramento são de baixo custo e oferecem recursos tecnológicos para aplicações da indústria 4.0.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar aprimorados ensaios de qualificação na *router* a fim de conhecer/reduzir os erros geométricos;
- Fazer mais ensaios para avaliar os erros geométricos em todo volume de trabalho da *router*;
- Avaliar a repetibilidade da máquina;
- Fazer ensaios para avaliação de tolerâncias dimensionais;
- Elaborar aplicações de TCM e MCM;
- Instalar o *software* controlador MACH3 na *Rapsberry Pi* e assim reduzir a quantidade de computadores necessários e facilitar a comunicação entre os sistemas;
- Desenvolver aplicações de monitoramento com multisensores;
- Criar curvas de correlação e modelos matemáticos da rugosidade superficial e a aceleração da vibração mecânica para diversos materiais.

REFERÊNCIAS

- ABOUELATTA, O B; MA, J. Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations. v. 118 , 2001.
- ALBERT, A. **Understanding CNC routers**. 1st ed. ed. Vancouver BC: FP Innovations/Forintek, 2011. 116 p. Disponível em: <http://www.worldcat.org/title/understanding-cnc-routers/oclc/760981837&referer=brief_results>. Acesso em: 27 jun. 2018. .
- ALONSO, D R Salgado F J; MARCELO, I Cambero A. In-process surface roughness prediction system using cutting vibrations in turning. p. 40–51 , 2009.
- ALVARES, Alberto J *et al*. RETROFITTING OF ASEA IRB2-S6 INDUSTRIAL ROBOT USING NUMERIC CONTROL TECHNOLOGIES BASED ON LINUXCNC AND MACH3-MATLAB. p. 2148–2153 , 2017.9781538637425.
- AMBHORE, Nitin *et al*. Tool condition monitoring system: A review. **Materials Today: Proceedings** v. 2, n. 4–5, p. 3419–3428 , 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.317>>.
- ARAÚJO, Rogério Pontes. **PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DE ERROS GEOMÉTRICOS EM CENTROS DE USINAGEM COM AUXÍLIO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL DEDICADA**. UFPE, 2019. 190 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. **A história das máquinas**. São Paulo: [s.n.], 2006. Disponível em: <<http://www.abimaq.org.br/Arquivos/Html/Publicações/Livro-A-historia-das-maquinas-70-anos-Abimaq.pdf>>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM-ISO 10791-7: Condições de ensaio para centros de usinagem Parte 7: Exatidão da peça-teste acabada**. Rio de Janeiro: ABNT, 1999a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM-ISO 230-1: Código de ensaio de máquinas-ferramenta Parte 1: Exatidão geométrica de máquinas-ferramenta operando sem carga ou em condições de acabamento**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1999b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM-ISO 10791-2: Condições de ensaio para centros de usinagem Parte 2: Ensaios geométricos para máquinas com eixo árvore vertical ou com cabeçotes universais com eixo rotativo primário vertical (eixo Z - vertical)**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2003.
- BENARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G. C. Predicting surface roughness in machining: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** v. 43, n. 8, p. 833–844 , 2003.
- BENARDOS, P G; VOSNIAKOS, G. Internet of Things and Industrial Applications for Precision Machining. v. 261, p. 440–447 , 2017.

BENAVENTE, Júlio César. **UM SISTEMA PARA O PROJETO E FABRICAÇÃO DE PEÇAS MECÂNICAS A DISTÂNCIA VIA INTERNET ADERENTE À NORMA ISO 14649 (STEP-NC)**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2011. 239 p.

BERTASSO, Beatriz Freire. **Relatório de Acompanhamento Setorial Máquinas-Ferramentas**. [S.l: s.n.], 2013.9788586215735.

BHOGAL, Sukhdev S. *et al.* Minimization of Surface Roughness and Tool Vibration in CNC Milling Operation. **Journal of Optimization** v. 2015, n. January, p. 1–13 , 2015.

BOHEZ, E L J. Compensating for systematic errors in 5-axis NC machining. v. 34 , 2002.

BOMBIŃSKI, Sebastian *et al.* Sensor Signal Segmentation for Tool Condition Monitoring. **Procedia CIRP** v. 46, p. 155–160 , 2016.

BRINGMANN, B; KNAPP, W. Machine tool calibration : Geometric test uncertainty depends on machine tool performance. v. 33, p. 524–529 , 2009.

CARDEN, E Peter. Vibration Based Condition Monitoring: A Review. **Structural Health Monitoring** v. 3, n. 4, p. 355–377 , 2004.9780470977668.

CASTELBAJAC, C De *et al.* Monitoring of distributed defects on HSM spindle bearings. **Applied Acoustics** v. 77, p. 159–168 , 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.07.008>>.

CORREA, Jorge E.; TOOMBS, Nicholas; FERREIRA, Placid M. A modular-architecture controller for CNC systems based on open-source electronics. **Journal of Manufacturing Systems** v. 44, p. 317–323 , 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.04.013>>.9780791850527.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **TECNOLOGIA DA USINAGEM DOS MATERIAIS**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2014. 261 p. .

DU, R; ELBESTAWI, M A; WU, S M. Automated Monitoring of Manufacturing Processes, Part 1: Monitoring Methods. **Journal of Engineering for Industry** v. 117, n. May 1995, p. 121–132 , 1995.

DURO, João A. *et al.* Multi-sensor data fusion framework for CNC machining monitoring. **Mechanical Systems and Signal Processing** v. 66–67, p. 505–520 , 2016.

ERTELL, G. G. **Numerical Control**. 1. ed. New York: Wiley, 1969. 160 p. .0471244325.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1970. 751 p. .9788521208594.

FERREIRA, Placid M.; LIU, C. Richard. An analytical quadratic model for the geometric error of a machine tool. **Journal of Manufacturing Systems** v. 5, n. 1, p. 51–63 , 1986.

FOX, Stephen. Third Wave Do-It-Yourself (DIY): Potential for prosumption, innovation, and entrepreneurship by local populations in regions without industrial manufacturing infrastructure. **Technology in Society** v. 39, p. 18–30 , 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.techsoc.2014.07.001>>.0160-791X.

GADALLA, Moustafa; XUE, Deyi. Recent advances in research on reconfigurable machine tools: a literature review. **International Journal of Production Research** v. 55, n. 5, p. 1440–1454 , 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2016.1237795>>.

GOYAL, Deepam; PABLA, B. S. Condition based maintenance of machine tools-A review. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology** v. 10, p. 24–35 , 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.05.004>>.17555817.

GROOVER, Mikell P. **Introdução aos Processos de Fabricação**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 737 p. .

GUO, Ruifeng *et al.* ScienceDirect ScienceDirect From Open CNC Systems to Cyber-Physical Machine Tools : A Case Study From Open CNC Systems to Cyber-Physical Machine Tools : assembly oriented product family identification new methodology to analyze functional and physical arc. **Procedia CIRP** v. 72, p. 1270–1276 , 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.110>>.6499231584.

HENNING, KAGERMANN WOLFGANG. Wahlster; JOHANNES. Helbig. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 WG** [S.l: s.n.], 2013.9783831644933.

HUI, E. *et al.* A design of CNC architecture based on cloud computing. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture** p. 1–9 , 2018.

IEEE. IEEE Guide to the POSIX Open System Environment (OSE). **IEEE Std 1003.0-1995** p. 1–206 , 1994.

INMETRO. **GUM 2008 - Guia para a expressão de incerteza de medição**. 1. ed. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012. 141 p. 1 v. .9788586920134.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10303-1: Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 1: Overview and fundamental principles**. Genebra: [s.n.], 1994.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1101: Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out**. Genebra: [s.n.], 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14649-1: Industrial automation systems and integration — Physical device control — Data model for computerized numerical controllers — Part 1: Overview and fundamental principles**. Genebra: [s.n.], 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6983-1:**

Automation systems and integration — Numerical control of machines — Program format and definitions of address words — Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems. Genebra: [s.n.], 2009.

ISKRA, Piotr; HERNA, Roger E. Toward a process monitoring of CNC wood router . p. 115–128 , 2012.

JANG, Dong Young *et al.* Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** v. 36, n. 4, p. 453–464 , 1 abr. 1996.

KALATEC. *Catalogo de motores de passo* . [S.l: s.n.]. Disponível em: <<https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms/files/10774/1586457700Catalogo-Motores-de-Passo-Kalatec-100420.pdf>>. , 2019

KOC, Küçük Hüseyin *et al.* Effect of CNC Application Parameters on Wooden Surface Quality. **Measurement** n. May , 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.001>>.

KORZENIEWSKI, Dariusz; ZNOJKIEWICZ, Natalia. The influence of vibrations on surface roughness formed during precision boring. **Archives of Mechanical Technology and Materials** v. 37, n. 1, p. 1–5 , 2017.

LAURO, C. H. *et al.* Monitoring and processing signal applied in machining processes - A review. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation** v. 58, p. 73–86 , 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.035>>.0263-2241.

LEE, Gil-Yong *et al.* Machine health management in smart factory: A review. **Journal of Mechanical Science and Technology** v. 32, n. 3, p. 987–1009 , 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12206-018-0201-1>>.1220601802011.

LEE, Jay; BAGHERI, Behrad; KAO, Hung An. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters** v. 3, p. 18–23 , 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>>.22138463 (ISSN).

LIANG, Steven Y.; HECKER, Rogelio L.; LANDERS, Robert G. Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art. **Journal of Manufacturing Science and Engineering** v. 126, n. 2, p. 297 , 2004. Disponível em: <<http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1448689>>.1087-1357.

LIU, Chao; XU, Xun. Cyber-physical Machine Tool - The Era of Machine Tool 4.0. **Procedia CIRP** v. 63, p. 70–75 , 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.078>>.22128271 (ISSN).

LU, Chen. Study on prediction of surface quality in machining process. v. 5, p. 439–450 , 2007.

MAJDA, Paweł. Modeling of geometric errors of linear guideway and their influence on

RAJPUT, Rajendra; SARATHE, Ajay. CNC Controllers and its Related Parameter : A Review. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering** v. 5, n. 12, p. 78–83 , 2015.

RAMESH, R.; JYOTHIRMAI, S.; LAVANYA, K. Intelligent automation of design and manufacturing in machine tools using an open architecture motion controller. **Journal of Manufacturing Systems** v. 32, n. 1, p. 248–259 , 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.11.004>>.0278-6125.

RAMESH, R.; MANNAN, M. A.; POO, A. N. Error compensation in machine tools - a review. Part I: Geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** v. 40, n. 9, p. 1235–1256 , 2000.

RAUCH, Matthieu *et al.* An advanced STEP-NC controller for intelligent machining processes. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing** v. 28, n. 3, p. 375–384 , 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2011.11.001>>.

RIVERO, A.; LÓPEZ DE LACALLE, L. N.; PENALVA, Ma Luz. Tool wear detection in dry high-speed milling based upon the analysis of machine internal signals. **Mechatronics** v. 18, n. 10, p. 627–633 , 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2008.06.008>>.0957-4158.

SARTORI, S.; ZHANG, G.X. Geometric Error Measurement and Compensation of Machines. **Annals of the CIRP** v. 44, n. 2, p. 599–609 , 1995.

SEIREG, M Hasegawa A; LINDBERG, R A. Surface roughness model for turning. n. 0, p. 285–289 , 1976.

SILVA, José Carlos Albuquerque. **PROJETO MECÂNICO, FABRICAÇÃO, MONTAGEM E TESTES DE UMA “ROUTER” COM QUATRO EIXOS PARA USO COM COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO**. Universidade Federal de Pernambuco, 2018. 88 p.

SMID, Peter. **CNC Programming Handbook**. 3. ed. New York: Industrial Press Inc., 2008. 540 p. .

SOUSA, André Roberto. **PADRÕES CORPORIFICADOS E A TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS INOVANDO A QUALIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DE CENTROS DE USINAGEM**. UFSC, 2000. 210 p.

SOUZA, André João. **Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte em Torneamento**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. 226 p.

TARAMAN, K. Multi machining output—multi independent variable turning research by response surface methodology. **International Journal of Production Research** v. 12, n. 2, p. 233–245 , 1974. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00207547408919552>>.

TETI, R. *et al.* Advanced monitoring of machining operations. **CIRP Annals - Manufacturing Technology** v. 59, n. 2, p. 717–739 , 2010.0007-8506.

TRAPET, E; WÄLDELE, F. A reference object based method to determine the parametric error components of coordinate measuring machines and machine tools. v. 9, n. 1, p. 17–22 , 1991.

UPADHYE, Manish Y; BOROLE, P B; SHARMA, Ashok K. Real-time wireless vibration monitoring system using LabVIEW. **2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC)** n. Icic, p. 925–928 , 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7150876>>.978-1-4799-7165-7.

VARANIS, Marcus *et al.* Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform. v. 38, p. 1–10 , 2016.

WANG, Lihui Wang; GAO, Robert X. **Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing - (Springer series in advanced manufacturing)**. 1. ed. London: Springer, 2006. 410 p. .1846282683.

WANG, Wei *et al.* Open CNC Machine Tool's State Data Acquisition and Application Based on OPC Specification. **Procedia CIRP** v. 56, p. 384–388 , 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.10.061>>.

WECK, Manfred. **Handbook of machine tools, Vol. 4. Metrological analysis and performance tests**. [S.l: s.n.], 1984. .

WILSON, Peter R. A Short History of CAD Data Transfer Standards. **IEEE Computer Graphics and Applications** v. 7, n. 6, p. 64–67 , 1987.

XING, Kanglin *et al.* Comparison of Direct and Indirect Methods for Five-axis Machine Tools Geometric Error Measurement. **Procedia CIRP** v. 78, p. 231–236 , 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.310>>.9781510875692.

XU, X. W. *et al.* STEP-compliant NC research: The search for intelligent CAD/CAPP/CAM/CNC integration. **International Journal of Production Research** v. 43, n. 17, p. 3703–3743 , 2005.0020-7543.

XU, X. W.; HE, Q. Striving for a total integration of CAD, CAPP, CAM and CNC. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing** v. 20, n. 2, p. 101–109 , 2004.

XU, X. W.; NEWMAN, S. T. Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent - A review of the technologies. **Computers in Industry** v. 57, n. 2, p. 141–152 , 2006.0166-3615.

YAMAZAKI, Taku. Development of A Hybrid Multi-tasking Machine Tool : Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining. **Procedia CIRP** v. 42, n. Isem Xviii, p. 81–86 , 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.193>>.

YUSOF, Yusri. ISO 14649 (STEP-NC): New Standards for CNC Machining. **International Journal of Integrated Engineering** v. 2, n. 1, p. 1–8 , 2010.

YUSOF, Yusri; LATIF, Kamran. New technique for the interpretation of ISO 14649 and 6983 based on open CNC technology. **International Journal of Computer Integrated**

Manufacturing v. 29, n. 2, p. 136–148 , 2016.

ZEZULKA, F. *et al.* Industry 4.0 – An Introduction in the phenomenon. **IFAC-PapersOnLine** v. 49, n. 25, p. 8–12 , 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.002>>.22128271 (ISSN).

ZHANG, G. *et al.* A Displacement Method for Machine Geometry Calibration. **CIRP Annals - Manufacturing Technology** v. 37, n. 1, p. 515–518 , 1988.

ZHONG, R Y; GE, W. Internet of things enabled manufacturing: A review. **International Journal of Agile Systems and Management** v. 11, n. 2, p. 126–154 , 2018. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85049085657&doi=10.1504%2FIJASM.2018.092545&partnerID=40&md5=b11dcfc235a856e18b2a55015836ded6>>.

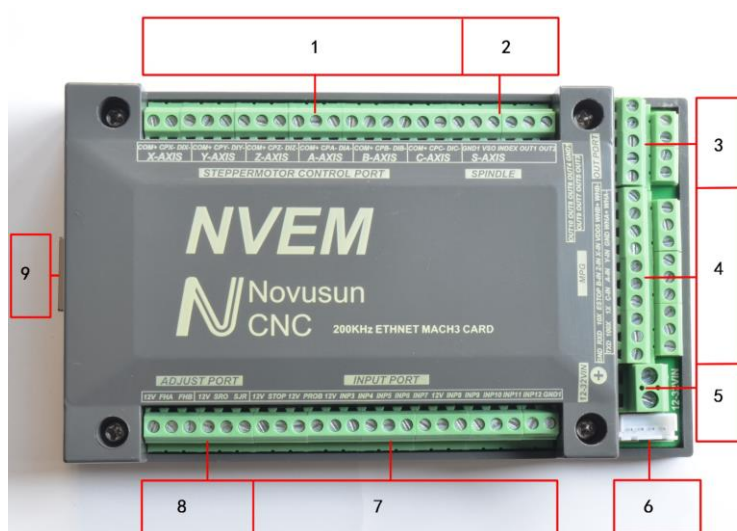
ZHU, N. *et al.* Automatic detection of a damaged router bit during cutting. **Holz als Roh - und Werkstoff** v. 62, n. 2, p. 126–130 , 2004.0010700404.

APÊNDICE A – CONFIGURAÇÕES DO MACH3/PLACA DE CONTROLE

1 Conexões da Placa de Controle CNC

A ligação física da placa de controle CNC NVEM com os sensores e atuadores da *router* acontece por meio de suas portas analógicas e digitais. Essa ligação é estabelecida por interfaces de entrada/saída de sinais customizáveis e outras interfaces com configurações pré-definidas. A Figura 85 mostra o controlador e suas portas.

Figura 85 - Portas do controlador CNC



Fonte: O Autor (2021).

Na Figura 85, os bornes indicados pelos os números 1, 2, 4, 5, 6 e 8 possuem funções exclusivas e não podem ser modificadas. Os bornes (1) são destinados para a ligação com os *drivers* dos motores de passo. Os bornes (2) são para a ligação do *spindle*. Os bornes (4) são para a ligação do MPG. Os bornes (5) são para a alimentação principal do controlador. Os bornes (6) são para conexão com interfaces externas. Os bornes (8) são utilizados para ligação de um potenciômetro externo com a finalidade de ajuste da frequência de giro do *spindle*. Os bornes indicados pelos números 3 e 7 são para a saída e entrada de sinais digitais respectivamente. Esses últimos bornes não possuem funções exclusivas são, apenas, portas digitais multiuso. Por exemplo, as chaves de fim de curso do eixo X podem ser ligadas em qualquer entrada digital, bastando apenas indicar qual porta foi utilizada para essa função na etapa de configuração do programa MACH3. Como sinais de entrada digitais existem as chaves de fim de curso e o botão de emergência. Como sinais digitais de saída

estão postos os sinais de controle liga e desliga do inversor. Ainda na Figura 85, para o ajuste da frequência de giro do *spindle* existe um borne exclusivo (8). A porta indicada em (9) é o local de conexão do cabo de rede *ethernet*. Em resumo, as características das portas e o tipo de sensores conectados à placa de controle estão descritos no Quadro 6.

Quadro 6 - Configuração de portas digitais da placa de controle NVEM

Nº do pino	Tipo de porta	Sensor
1	Entrada	Botão de emergência
3	Entrada	Chave fim de curso X+
4	Entrada	Chave fim de curso X-
4	Entrada	Home eixo X
5	Entrada	Chave fim de curso Y+
6	Entrada	Chave fim de curso Y-
6	Entrada	Home eixo Y
7	Entrada	Chave fim de curso Z+
8	Entrada	Chave fim de curso Z-
8	Entrada	Home eixo Z
1	Saída	Ligar <i>spindle</i> sentido +
2	Saída	Ligar <i>spindle</i> sentido -

Fonte: O Autor (2021).

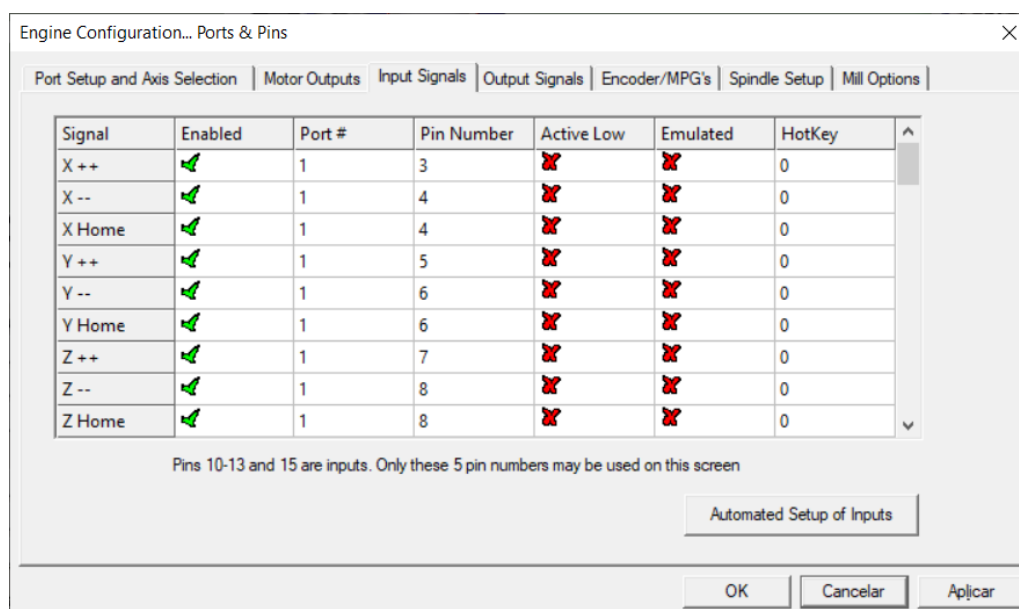
Cada pino representa uma entrada de sinal diferente. Os pinos 4, 6 e 8 possuem duas funções, por isso o valor seu valor é repetido no Quadro 6. Essa dupla função dos pinos ocorre devido ao compartilhamento da chave fim de curso para duas funções. Uma função da chave é funcionar como fim de curso quando uma peça é usinada. A outra função é funcionar como referência para o sistema de coordenadas da máquina-ferramenta, ou seja, a função *home*. Uma vez ligados os sensores às portas e estabelecidos os números de pino pode-se configurar o *software* MACH3.

2 Configuração de Portas Digitais no MACH3

Após instalar o MACH3, no sistema operacional *Windows*, a próxima etapa é adicionar o *plugin* do controlador NVEM e configurar o programa. Para estabelecer a comunicação entre o programa de computador e a placa de controle é preciso ajustar o endereço de Protocolo de *Internet* (IP) do adaptador de rede no computador. O IP do computador deve estar na mesma subrede que a placa de controle que é

192.168.1.X sendo que X pode variar de 10 a 99. Seguindo a numeração dos pinos estabelecida no Quadro 6, deve-se configurar as portas de entrada e saída de sinais conforme mostrado na Figura 86.

Figura 86 - Configurações de sinais de entrada no MACH3



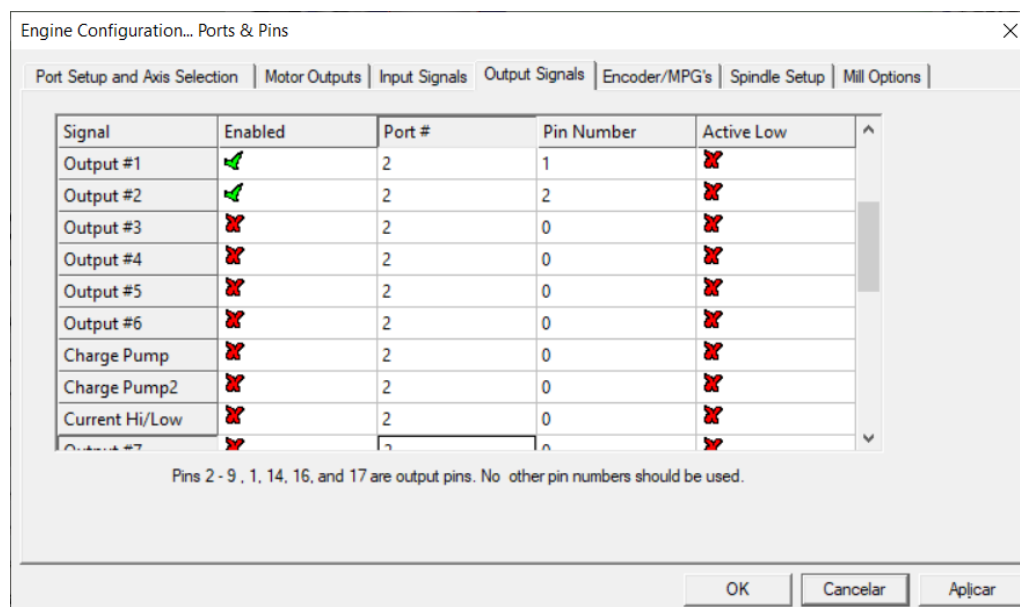
Fonte: O Autor (2021).

Na Figura 5, tem-se a tela de configuração de portas e pinos do MACH3. A coluna "Port#" está ajustada para o valor de 1, isso quer dizer que todas as portas são de entrada. Na coluna "Pin Number" têm-se os números dos pinos definidos no Quadro 6. Como pode-se observar todas as portas utilizadas estão ativas, ou seja, todas estão marcadas em "v" na coluna "Enabled". A coluna "Active Low" é utilizada para inverter o valor da variável binária associada à porta de entrada. Como todas as chaves de fim de curso estão interligadas com a placa de controle CNC por meio de seu contato Normalmente Fechado (NF) o valor da variável apenas se modificará caso o circuito seja aberto. Assim o MACH3 identifica alguma mudança no estado da chave de fim de curso caso a mesma seja acionada. Ligando-se a chave de fim de curso em seu contato Normalmente Aberto (NA) é necessário ativar a função "Active Low" caso contrário o controlador detectará constantemente um sinal de entrada. Essa última configuração é necessária quando a chave fim de curso tem apenas um contato NA. Como a chave escolhida para equipar o sistema de controle CNC da *router* dispõe dos dois contatos NA e NF utilizou-se o contato NF. Assim, todo o circuito é mantido

energizado até que a chave fim de curso seja acionada ou alguma falha aconteça no sistema, por exemplo, o rompimento de um cabo.

Os sinais de saída são configurados na aba denominada “*Output Signals*” como mostrado na Figura 87.

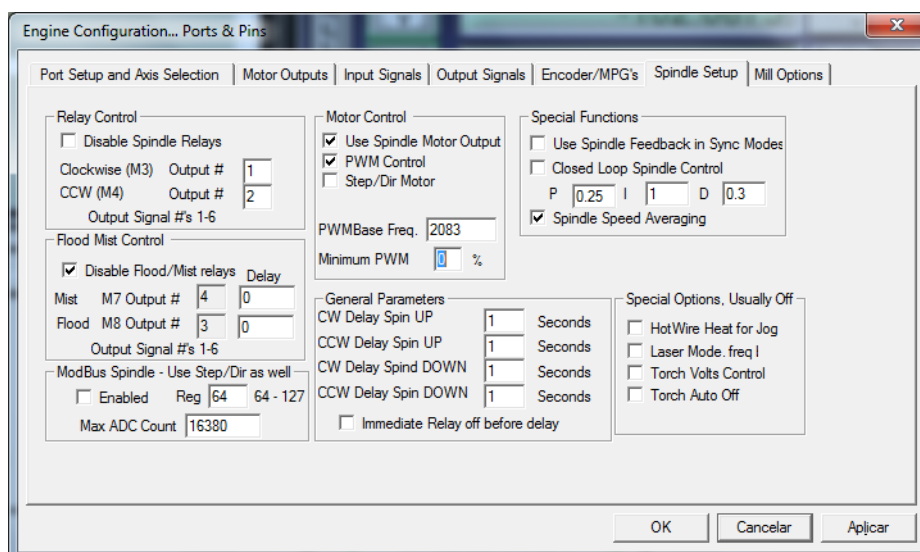
Figura 87 - Configuração dos sinais de saída no MACH3



Fonte: O Autor (2021).

A coluna “*Port#*” está ajustada para o valor de 2, isso quer dizer que todas as portas são de saída. Na coluna “*Pin Number*” têm-se os números dos pinos definidos no Quadro 6. Pode-se observar, ver coluna “*Enabled*”, que apenas os sinais de saída “*Output#1*” e “*Output#2*” estão ativados, e seus “*Pin Number*” são 1 e 2 respectivamente. Essas saídas de sinais são utilizadas para ligar o *spindle* em sentidos de rotação diferentes e estão fisicamente localizadas no conjunto de bornes (2) como indicado na Figura 85.

O *spindle* é controlado pelo inversor de frequência que por sua vez está ligado à placa de controle CNC através de portas digitais e analógica. Além das configurações de saída mostradas na Figura 87, para que aconteça a comunicação entre o inversor e o controlador foi configurado no MACH3 qual saídas foram utilizadas para girar o *spindle* no sentido horário e anti-horário. Essa configuração é realizada na aba “*Spindle setup*” da janela mostrada na Figura 88.

Figura 88 - Ajuste do *spindle*

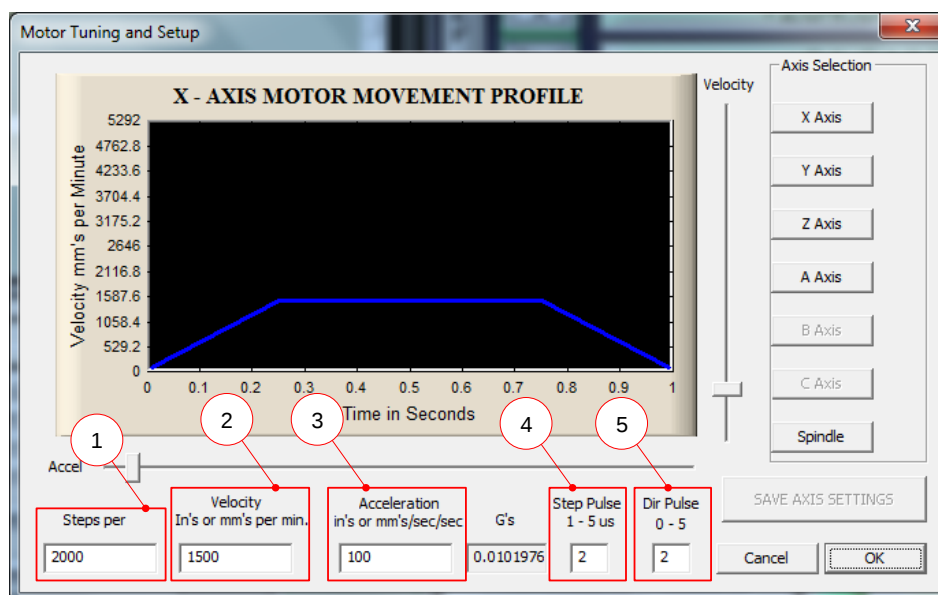
Fonte: O Autor (2021).

Nessa janela de configuração do *spindle*, várias são as possibilidades de ajustes, pois, o MACH3 pode funcionar com diversos tipos de máquinas-ferramenta. Para a configuração do MACH3 o “*spindle*” representa uma “*ferramenta de corte*” podendo ser uma tocha de plasma, um LASER, um motor de acionamento de uma ferramenta de corte etc. No presente trabalho o *spindle* funciona como o eixo-árvore da máquina-ferramenta. Então no campo “*Relay Control*” a saída 1 foi configurada para que *spindle* gire no sentido horário. O comando em código G dado para que o eixo-árvore gire no sentido horário é o M3. De forma análoga, a saída 2 foi configurada para que o *spindle* gire no sentido anti-horário. O comando em código G dado para que o eixo-árvore gire no sentido anti-horário é o M4.

3 Ajuste dos Parâmetros de Operação dos Motores

Os motores de passo instalados na *router* possuem características específicas como tensão de operação, corrente e momento de inércia do rotor. Esses motores podem ter suas bobinas internas ligadas em série ou paralelo produzindo diferentes torques e velocidades. Além desses fatores intrínsecos ao motor, tem-se as características dos eixos da máquina-ferramenta. Cada eixo possui uma massa inercial própria, resultando em diferentes necessidades de torque e aceleração para sua movimentação. No MACH3, os eixos X, Y e Z são configurados separadamente através de janelas de configuração específicas. Na Figura 89 está exibida a janela de configuração do motor no eixo X.

Figura 89 - Configuração do motor no eixo X



Fonte: O Autor (2021).

Na janela de ajuste e configuração do eixo X, cinco parâmetros são responsáveis pela característica do sinal de controle do *driver* do motor de passo. O parâmetro indicado em (1) é número de passos necessários para que o eixo X seja transladado em 1 milímetro. Para calcular esse parâmetro é preciso conhecer a configuração do número de passos por revolução do motor de passo e o passo linear do fuso de esferas recirculantes. Baseando-se nas informações da Tabela 4, e sabendo que o passo linear do fuso de esferas são 5 mm, tem-se o valor do parâmetro “Steps per” determinado pela Equação (7).

$$P_{mm} = \frac{\text{Passos por revolução}}{\text{Passo do fuso}} = \frac{10.000 \text{ passos/rev}}{5 \text{ mm/rev}} = 2.000 \text{ passos/mm} \quad (7)$$

O valor de 2.000 obtido para o parâmetro “Steps per” é o mesmo para os eixos X, Y e Z da *router*, pois, os fusos em todos os eixos possuem o mesmo passo linear. Dessa forma, o controlador CNC consegue movimentar os eixos precisamente com um controle de malha aberta. O parâmetro indicado por (2) é responsável pela configuração da velocidade de rotação do motor de passo que aciona o eixo X. O parâmetro mostrado em (3) determina a aceleração do eixo X. A escolha de valores otimizados para os parâmetros de velocidade e aceleração é uma tarefa complexa, pois, o resultado final é resultante da união do motor como eixo de acionamento. Para esses parâmetros deve-se considerar valores que não gerem uma frequência em

ressonância com a frequência natural de vibração da *router*. É possível que durante a aceleração alguma frequência natural da máquina seja excitada, porém, o importante é que essa condição não seja mantida. Os valores atribuídos para o campo (2) denominado por “*Velocity*” foi de 1500 mm/min e para o campo (3) denominado por “*Acceleration*” foi de 100 mm/s², conforme recomendações iniciais do manual do controlador. O gráfico mostrado na janela de configuração é justamente a curva de resposta do eixo em função dos valores de velocidade e aceleração definidos. Nessa curva tem-se a rampa de aceleração, em seguida uma região de velocidade constante e finalmente existe uma rampa de desaceleração que culmina com a parada do movimento. Os últimos parâmetros configurados, mostrados na Figura 89, foram a largura de pulso do passo e da direção que estão indicados por (4) e (5) respectivamente. Na prática, quando todos os parâmetros marcados na Figura 89 são definidos, os sinais de passo e direção na saída do controlador CNC são Modulados em Largura de Pulso (PWM) para o controle dos *drivers* dos motores de passo.

Na Tabela 12 estão apresentados de forma resumida a configuração dos parâmetros para cada eixo da máquina.

Tabela 12 - Parâmetros de configuração dos motores

Eixo	Passos/mm	Velocidade (mm/s)	Aceleração (mm/s ²)	Pulso de passo (μs)	Pulso de direção (μs)
X	2.000	1500	100	2	2
Y	2.000	1500	200	2	2
Z	2.000	1000,2	100	2	2
4	27,74°*	1500	200	2	2

Fonte: O Autor (2021).

Como o 4º Eixo é um dispositivo que realiza deslocamentos angulares, a unidade fundamental para o cálculo desse parâmetro é o grau. A quantidade de passos para que o 4º Eixo rotacione de um grau é determinada pela Equação (8).

$$P_{angular} = \frac{\text{Passos por revolução}}{\text{ângulo de rotação}} = \frac{10.000 \text{ passos/rev}}{360 \text{ graus/rev}} = 27,78 \text{ passos/grau} \quad (8)$$

4 Soft Limits da Máquina-Ferramenta

Antes de iniciar qualquer operação de usinagem na *router*, o operador necessita encontrar o ponto zero máquina por meio de uma função do MACH3. Uma

vez ativada essa função os eixos da máquina são transladados até que as chaves de fim de curso localizadas na posição de *home* de cada eixo sejam acionadas. Nesse processo de referenciamento, uma vez acionada a chave fim de curso o eixo gira em sentido contrário até que o sensor seja liberado. Dessa forma é encontrado o ponto zero máquina nos eixos X, Y e Z e o controlador CNC pode saber exatamente onde se encontram os eixos. Por se tratar de um sistema de controle em malha aberta, o controlador determina o volume de trabalho da máquina a partir de deslocamentos em relação ao ponto zero. Os *soft limits* são valores de deslocamentos máximos e mínimos admissíveis para cada eixo da *router* tomados em relação ao ponto zero máquina. Na Figura 90 estão mostradas as configurações dos limites no MACH3.

Figura 90 - *Soft limits* do MACH3

Motor Home/SoftLimits

Entries are in setup units.

Axis	Reversed	Soft Max	Soft Min	Slow Zone	Home Off.	Home N...	Auto Zero	Speed %
X		492.00	0.00	0.00	0.0000			50
Y		535.00	0.00	0.00	0.0000			20
Z		0.00	-92.00	0.00	0.0000			50
A		720.00	-720.00	1.00	0.0000			20
B		100.00	-100.00	1.00	0.0000			20
C		100.00	-100.00	1.00	0.0000			20

G28 home location coordinates

X A
Y B
Z C

OK

Fonte: O Autor (2021).

Da Figura 90, pode-se verificar que os eixos possuem limites de deslocamentos diferentes. O eixo X, por exemplo, tem um limite máximo de 492 mm e o limite mínimo de 0 mm. O eixo Y, possui comprimento útil de deslocamento de 535 mm. O eixo Z, possui um limite máximo de zero e um limite mínimo de -92 mm. Nesse caso os limites estão invertidos em comparação aos eixos X e Y, pois, o avanço do eixo Z na direção da mesa é convencionalmente tomado como negativo. Por isso, no eixo Z a função “*Home negative*” está ativa, o que determina que o ponto zero desse eixo esteja localizado na chave fim de curso superior. Uma vez ativos os *soft limits* no MACH3, durante a execução de um programa em código G o controlador CNC verifica

constantemente se alguma linha de programação contém alguma coordenada que extrapole o volume de trabalho da *router*. Essa função também monitora movimentos através do MPG e da linha de comando. O *soft limits* é uma ferramenta de segurança importantíssima na prevenção de acidentes com possíveis danos à máquina e à saúde do operador.

APÊNDICE B – CÓDIGO EM *PHYTON* DO DAQ

```

1 import serial
2 import csv
3 import re
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 import time
6 import statistics as st
7 from scipy import constants as c
8 import numpy as np
9 from scipy.fft import fft, fftfreq, fftshift
10 import math as m
11 from threading import Thread
12
13 running_thread = True
14 final_date = 0
15 initial_date = 0
16 #import pandas as pd
17
18 portPath = "/dev/ttyACM0" # Must match value shown on Arduino IDE
19 baud = 115200 # Must match Arduino baud rate
20 timeout = 5 # Seconds
21
22
23 filename = (input("Insira o nome do arquivo bestão: \n") + ".txt")
24
25
26
27 input("Pressione ENTER para iniciar as medições")
28 num_signals = 1
29 #definindo constantes
30 g = c.g
31
32
33 rest = 341.63416805787426 # tempo de repouso
34 pi = c.pi
35 def create_serial_obj(portPath, baud_rate, tout):
36     """
37     Given the port path, baud rate, and timeout value, creates
38     and returns a pyserial object.
39     """
40     return serial.Serial(portPath, baud_rate, timeout = tout)
41
42 def read_serial_data(serial):
43     """
44     Given a pyserial object (serial). Outputs a list of lines read in
45     from the serial port
46     """
47     serial.flushInput()
48     global running_thread
49     serial_data = []
50     readings_left = True
51     timeout_reached = False
52     start_time = time.time()
53     while running_thread and not timeout_reached:
54         serial_line = serial.read(3)
55         if serial_line == "":
56             timeout_reached = True
57             print("\n Erro na serial!")
58         else:

```

```

59 if(serial_line.isdigit()):
60     serial_data.append(serial_line.decode('latin1'))
61     return serial_data
62
63 def is_number(string):
64     """
65     Given a string returns True if the string represents a number.
66     Returns False otherwise.
67     """
68     try:
69         float(string)
70         return True
71     except ValueError:
72         return False
73
74     return clean_data
75
76 def save_to_csv(data, filename, Taq):
77     #text_file = open(filename, "a")
78     #text_file.write(data)
79     #text_file.close()
80     f = open(filename, 'a')
81     for element in data:
82         f.write(element)
83         f.write("\n")
84         f.write("\n--- Tempo de aquisição: " + str(Taq))
85     f.close()
86
87 def gen_col_list(num_signals):
88     """
89     Given the number of signals returns
90     a list of columns for the data.
91     E.g. 3 signals returns the list: ['Time', 'Signal1', 'Signal2', 'Signal3']
92     """
93     col_list = ['Time']
94     for i in range(1, num_signals+1):
95         col = 'Signal'+str(i)
96         col_list.append(col)
97
98     return col_list
99
100 def map_value(csv_file):
101     f = open(csv_file, "r");
102     texto_dados = f.read()
103     f.close()
104
105     texto_extraido = "
106
107     dados = []
108     counter = 0
109     for i in range(len(texto_dados) - 1):
110         if(i > 0):
111             if(texto_dados[i - 1] == '\n'):
112                 counter = counter+1
113             if( texto_extraido.isdigit()):
114
115                 dados.append(float(re.sub('ð', "", re.sub('þ', "", re.sub('ö', "", re.sub(
116                     b("\n", "", re.sub('ü', "", re.sub('ñ', "", texto_extraido)))))))

```

```

117 texto_extraido = texto_extraido + texto_dados[i]
118 stdev = st.stdev(dados) / rest
119 for i in range(len(dados)):
120 dados[i] = (dados[i] - rest) / 67.584
121 return dados
122
123
124 def simple_plot(csv_file, columns, headers):
125 plt.clf()
126 plt.close()
127 plt.plotfile(csv_file, columns, names=headers, newfig=True)
128 plt.show()
129
130 def calculate_rms(dados):
131 sum_ = 0
132 t = []
133 #ruído_branco = np.random.rand(len(dados))
134 #ruído_branco = ruído_branco - np.mean(ruído_branco)
135 #ruído_branco = ruído_branco*0.06
136 #plt.plot(ruído_branco)
137 #plt.show()
138 for i in range(len(dados)):
139 #dados[i] = m.cos(2*pi*i/1000) + ruído_branco[i]
140 sum_ = sum_ + dados[i]**2
141 t.append(i*0.01)
142 rms = np.sqrt(sum_ / len(dados))
143 return rms,dados,t
144
145 def plot(t,dados):
146 plt.plot(t,dados)
147 plt.xlabel("Tempo (s)")
148 plt.ylabel("Amplitude")
149 plt.show()
150
151
152 def plotf(t,dados):
153 plt.plot(t,dados)
154 plt.xlabel("Frequência (Hz)")
155 plt.ylabel("Amplitude")
156 plt.show()
157
158 def take_input():
159 global running_thread
160 input("aperte ENTER para encerrar")
161 running_thread = False
162
163
164
165 print ("Criando objeto...")
166 serial_obj = create_serial_obj(portPath, baud, timeout)
167
168 print ("Lendo dados...")
169 start_time = time.time()
170
171 Thread(target=take_input).start()
172 serial_data = read_serial_data(serial_obj)
173 print("Número de dados adquiridos: ")
174 print (len(serial_data))
175 Taq = time.time() - start_time
176

```

```

177
178 #print(serial_data)
179
180 print("\n--- Tempo de aquisição: " + str(Taq))
181 dados = serial_data
182
183 print ("Salvando para o arquivo...")
184 save_to_csv(serial_data,filename, Taq)
185
186
187
188 print("Dados salvos\n")
189
190
191 """
192 A parte abaixo é uma lógica dedicada a decisão do usuário
193 """
194
195 plot_data = 4
196 while(plot_data > 1 or plot_data < 0):
197 input_ = input(" Tratar os dados? (1 - sim; 0 - não)")
198 if(input_.isdigit()):
199 input_ = int(input_)
200 if (input_ > 1 or plot_data < 0):
201 print("input inválido! Tente novamente\n")
202 else:
203 plot_data = int(input_)
204 else:
205 print("input inválido! Tente novamente\n")
206 pass
207
208 """
209 A parte abaixo é dedicada ao tratamento de dados
210 """
211 if(int(plot_data)):
212 print ("Plotando dados...")
213 #dados = map_value(filename)
214 i = 0
215 for element in dados:
216 dados[i] = int(element)
217 i = i + 1
218 for i in range(len(dados)):
219 dados[i] = (dados[i] - rest) / 67.584
220
221 #simple_plot(filename, (0,1,2), ['time (s)', 'voltage1', 'voltage2'])
222 #simple_plot(filename, (0,1), ['time (s)', 'voltage1'])
223
224 t = []
225
226 #Taq = 10
227 Ts = Taq/len(dados)
228
229 for i in range(len(dados)):
230 t.append(i*Ts)
231
232 plot(t, dados)
233
234 print("A frequência de aquisição é de: " + str(1/Ts) + " Hz")
235 print("A média é de:" + str(st.mean(dados)))
236

```

```
237
238 print("Calculando rms...")
239 rms,dados,t = calculate_rms(dados)
240 t = []
241 #Ts = 1/1000
242 for i in range(len(dados)):
243     t.append(i*Ts)
244 #plot(t,dados)
245 print("O rms é de: "+str(rms))
246
247 print("Calculando a fft...")
248 fft = fft(dados)
249 fft = fftshift(abs(fft))
250 xf = fftfreq(len(dados), 0.001)
251 xf = fftshift(xf)
252
253 print("Plotando a fft...")
254 plotf(xf,fft)
```

APÊNDICE C – MEDIÇÕES DAS PEÇAS-TESTE

Resultados das medições para a peça-teste 1 estão mostrados na Tabela 13. Os valores tabelados abaixo representam um valor médio de três medida com incerteza expandida calculada com confiabilidade de 94,45%. Esses dados foram utilizados para plotagem dos gráficos da Seção 4.2.

Tabela 13 - Resultados completos das medições para a peça-teste 1

Elemento geométrico	Parâmetro tolerado	Valor médio (mm)	Plano de referência
Furo central	Cilindricidade	0,0095 ± 0,0007	*XY
	Perpendicularidade entre a linha de centro do furo central e a base A	0,0228 ± 0,0008	*YZ
		0,0059 ± 0,0008	*ZX
Quadrado	Retitude dos lados	L1 0,0430 ± 0,0012	*XY
		L2 0,0109 ± 0,0018	
		L3 0,0428 ± 0,0008	
		L4 0,0075 ± 0,0013	
	Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação à base B	L2 0,3406 ± 0,0036 L4 0,3360 ± 0,0009	*XY
	Paralelismo do lado oposto à base B	0,0547 ± 0,0009	*XY
Quadrado inclinado	Retitude dos lados	L5 0,0199 ± 0,0009	*XY
		L6 0,0114 ± 0,0010	
		L7 0,0328 ± 0,0007	
		L8 0,0193 ± 0,0011	
	Angularidade do ângulo de 75°(L9) em relação à base B	0,1735 ± 0,0010	*XY
Círculo	Circularidade	0,2183 ± 0,0012	*XY
	Concentricidade do círculo externo e o furo central	0,0915 ± 0,0033	*XY
FACES inclinadas	Retitude das faces	L10 0,0502 ± 0,0008	*XY
		L11 0,0085 ± 0,0009	
	Angularidade dos ângulos em relação à base B	L10 0,0566 ± 0,0009	*XY
		L11 0,3581 ± 0,0008	
Furos fresados	Posição dos furos com relação ao furo central	F1 0,0709 ± 0,0119	*XY
		F2 0,6029 ± 0,0122	
		F3 0,1196 ± 0,0121	
		F4 0,5428 ± 0,0118	

Fonte: O Autor (2021).

Resultados das medições para a peça-teste 2 estão mostrados na Tabela 14. Os valores tabelados abaixo representam um valor médio de três medida com incerteza expandida calculada com confiabilidade de 94,45%. Esses dados foram utilizados para plotagem dos gráficos da Seção 4.2.

Tabela 14 - Resultados completos das medições para a peça-teste 2

Elemento geométrico	Parâmetro tolerado	Valor médio (mm)		Plano de referência
Furo central	Cilindricidade		0,0059 ± 0,0007	*XY
	Perpendicularidade entre a linha de centro do furo central e a base A		0,0329 ± 0,0010	*YZ
			0,0099 ± 0,0010	*ZX
Quadrado	Retitude dos lados	L1	0,0435 ± 0,0010	*XY
		L2	0,0041 ± 0,0010	
		L3	0,0494 ± 0,0007	
		L4	0,0248 ± 0,0007	
	Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação à base B	L2	0,3144 ± 0,0017	*XY
L4		0,3221 ± 0,0052		
	Paralelismo do lado oposto à base B		0,1499 ± 0,0013	*XY
Quadrado inclinado	Retitude dos lados	L5	0,0217 ± 0,0007	*XY
		L6	0,0173 ± 0,0008	
		L7	0,0611 ± 0,0008	
		L8	0,0192 ± 0,0011	
	Angularidade do ângulo de 75° (L9) em relação à base B		0,2131 ± 0,0010	*XY
Círculo	Circularidade		0,2962 ± 0,0009	*XY
	Concentricidade do círculo externo e o furo central		0,1494 ± 0,0016	*XY
Fases inclinadas	Retitude das faces	L10	0,0602 ± 0,0012	*XY
		L11	0,0108 ± 0,0017	
	Angularidade dos ângulos em relação à base B	L10	0,0550 ± 0,0010	*XY
		L11	0,3372 ± 0,0016	
Furos fresados	Posição dos furos com relação ao furo central	F1	0,1241 ± 0,0089	*XY
		F2	0,5653 ± 0,0050	
		F3	0,1328 ± 0,0050	
		F4	0,4570 ± 0,0077	

Fonte: O Autor (2021).

Resultados das medições para a peça-teste 3 estão mostrados na Tabela 15. Os valores tabelados abaixo representam um valor médio de três medida com incerteza expandida calculada com confiabilidade de 94,45%. Esses dados foram utilizados para plotagem dos gráficos da Seção 4.2.

Tabela 15 - Resultados completos das medições para a peça-teste 3

Elemento geométrico	Parâmetro tolerado	Valor médio (mm)		Plano de referência
Furo central	Cilindricidade		0,0084 ± 0,0007	*XY
	Perpendicularidade entre a linha de centro do furo central e a base A		0,0244 ± 0,0008	*YZ
			0,0078 ± 0,0008	*ZX
Quadrado	Retitude dos lados	L1	0,0357 ± 0,0009	*XY
		L2	0,0354 ± 0,0010	
		L3	0,0645 ± 0,0008	
		L4	0,0188 ± 0,0015	
	Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação à base B	L2	0,3595 ± 0,0014	*XY
L4		0,3509 ± 0,0013		
	Paralelismo do lado oposto à base B		0,0864 ± 0,0010	*XY
Quadrado inclinado	Retitude dos lados	L5	0,0373 ± 0,0008	*XY
		L6	0,0318 ± 0,0009	
		L7	0,0425 ± 0,0008	
		L8	0,0198 ± 0,0007	
	Angularidade do ângulo de 75° (L9) em relação à base B		0,2230 ± 0,0013	*XY
Círculo	Circularidade		0,3309 ± 0,0007	*XY
	Concentricidade do círculo externo e o furo central		0,1727 ± 0,0008	*XY
Fases inclinadas	Retitude das faces	L10	0,0478 ± 0,0010	*XY
		L11	0,0178 ± 0,0015	
	Angularidade dos ângulos em relação à base B	L10	0,0497 ± 0,0010	*XY
		L11	0,3680 ± 0,0012	
Furos fresados	Posição dos furos com relação ao furo central	F1	0,1250 ± 0,0080	*XY
		F2	0,6498 ± 0,0108	
		F3	0,1322 ± 0,0121	
		F4	0,5906 ± 0,0097	

Fonte: O Autor (2021).

APÊNDICE D – MEDIDAS DE VIBRAÇÕES E RUGOSIDADES

Considerando a fonte de incerteza tipo A, os dados utilizados para a plotagem dos gráficos da Seção 4.4 estão apresentados na Tabela 16. A aceleração média e a rugosidade R_a foram calculadas a partir de 3 medidas.

Tabela 16 - Medidas de Vibrações e Rugosidades

Condição de Corte	Taxa de Avanço (mm/mim)	Aceleração média (g)	Desv. Padrão (g)	Rugosidade R_a (μm)	Desv. Padrão R_a (μm)
1	390	0,046529	0,000805	0,36967	0,01943
2	585	0,054597	0,001711	0,49333	0,01387
3	780	0,065162	0,001940	0,60467	0,01361
4	1170	0,069329	0,001757	0,81967	0,02060

Fonte: O Autor (2021).