



Mestrado em Engenharia Mecânica

Caracterização de um Centro de Maquinagem a 5 Eixos e Implementação de um Sistema de Aquisição de Vibração

Trabalho de Projeto apresentado para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica, Especialização em Equipamentos e Sistemas Mecânicos

Autor

Adriano Vieira Mendes

Orientação

Prof. Doutor Fernando António Gaspar Simões

Prof. Doutor Pedro Miguel Soares Ferreira

Professores do Departamento de Engenharia Mecânica
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, Abril de 2017

Agradecimentos

Quero agradecer a todos aqueles que contribuíram e tornaram possível a realização da presente dissertação de mestrado. Em especial:

Aos meus orientadores, Professor Fernando Simões e ao Professor Pedro Ferreira, pelo seu incessável empenho, inesgotável dedicação, pelo vasto conhecimento transmitido e a constante motivação que me transmitiram ao longo do meu percurso académico.

Ao Paulo Amaro, pelo conhecimento transmitido e ideias sugeridas.

Ao Professor Carlos Alcobia pelo empenho e conhecimentos transmitidos na parte das vibrações e instalação do acelerómetro.

A minha família, pelo constante apoio, compreensão e amor transmitidos ao longo desta importante etapa da minha vida.

Por fim, não poderia deixar de agradecer aos meus amigos e colegas por toda a sua amizade, companheirismo, solidariedade e espírito de entreajuda que se estabeleceu entre nós, ajudando à conclusão do curso.

Resumo

Tendo como suporte o conhecimento anteriormente adquirido em diversas unidades curriculares da Licenciatura e Mestrado em Engenharia Mecânica do ISEC, as quais estão relacionadas com máquinas-ferramenta CNC, programação e fabrico de componentes mecânicos com sistemas CAD/CAM, o trabalho de projeto desenvolvido e agora apresentado no âmbito do mestrado em Engenharia Mecânica, está focado num centro de maquinagem de 5 eixos recentemente adquirido pelo ISEC.

Neste trabalho foram delineados dois grandes objetivos. O primeiro objetivo diz respeito a conhecer os constituintes de um moderno centro de maquinagem de 5 eixos equipado com as tecnologias mais recentes e saber operar com o equipamento. Para tal, foi decisivo explorar o princípio de funcionamento, as potencialidades e o modo de operação dos sistemas de sondas intuitivos sem fios que equipam o centro de maquinagem. O segundo objetivo deste trabalho está relacionado com a implementação de um sistema independente do equipamento para aquisição da vibração durante as operações de maquinagem. Para isso, foi necessário compreender os princípios de aquisição de sinal, associado ao centro de maquinagem, implementar o sistema de software e hardware para aquisição da vibração. No final desta etapa, durante o processo de maquinagem em diferentes condições, foi adquirido o sinal de vibração, de modo a demonstrar o potencial deste sistema em trabalhos futuros.

Palavras-chave:

Centro de maquinagem; 5 eixos; sonda sem fios; medição automática de ferramentas; aquisição de sinal; vibração; Transformada rápida de Fourier; Análise em oitavas.

Abstract

Supporting the knowledge previously acquired in several curricular units of the Degree and Masters in Mechanical Engineering of ISEC, which are related to CNC machine tools, programming and manufacturing of mechanical components with CAD/CAM systems, the work developed and now presented in the scope of the master's degree in Mechanical Engineering, is focused on a machining tool center of 5-axis recently acquired by ISEC.

Two major objectives were outlined in this project. The first one is to know the constituents of a modern 5-axis machining tool center equipped with the latest technologies and how to operate the equipment. For this, it was crucial to explore the principle of operation, the potentialities and the mode of operation of the intuitive wireless probes systems that equip the machining center. The second objective of this work is related to the implementation of an acquisition signal system, to acquire the vibration during machining operations. For this, it was necessary to understand the principles of signal acquisition and, associated with the machining tool center, implement the software and hardware system for vibration acquisition. At the end, during the machining process under different conditions, the vibration signal was acquired, in order to demonstrate the potential of this system in future work.

Keywords:

Machining tool center; 5-axis; wireless probe; Automatic tool measurement; signal acquisition; vibration; Fast Fourier Transform; Octaves analysis.

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE	IX
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XVII
LISTA DE EQUAÇÕES	XIX
ABREVIATURAS	XXI
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Enquadramento e objetivos do trabalho	1
1.2 - Organização do documento	2
CAPÍTULO 2 - PRINCIPAIS CONSTITUINTES DE UM CENTRO DE MAQUINAGEM CNC	5
2.1 - Nomenclatura dos Eixos de Maquinagem	5
2.2 - Estrutura de uma Máquina CNC	8
2.3 - Sistemas de Controlo em Anel Aberto e Anel Fechado	9
2.4 - Movimentos lineares	10
2.4.1 Guias Lineares	10
2.4.2 Fusos de Esferas	11
2.4.3 Componentes que controlam os movimentos lineares	13
2.4.4 Servomotor	15
2.4.5 Motor da Árvore	16
2.5 - Réguas Óticas de Controlo de Posicionamento	18

2.6 - Sistema Automático de Troca de Ferramentas	19
2.7 - Aplicação de Fluido de Corte	20
2.7.1 Refrigeração Externa	21
2.7.2 Refrigeração Interna	21
2.8 - Controlador	23
CAPÍTULO 3 - SISTEMA DE SONDAS INTUITO SEM FIOS	25
3.1 - Introdução	25
3.2 - Princípio de Funcionamento do Sistema de Registo de Coordenadas	26
3.3 - Sonda de Contacto	29
3.3.1 Sonda de funcionamento por Resistência Cinemática	29
3.3.2 Sonda de funcionamento por Extensometria	31
3.3.3 Ponteira de ligação	33
3.4 - Sonda de Medição de Ferramentas	33
3.4.1 Funcionamento por Resistência Cinemática	35
3.4.2 Funcionamento por Feixe Laser	36
3.5 - Sistema de Transmissão da Informação	38
3.5.1 Transmissão por cabo	38
3.5.2 Transmissão sem fios	39
3.6 - Demonstração de Operações Realizadas com o Sistema de Sondas	42
3.6.1 Determinação do zero-peça	42
3.6.2 Medição de Ferramentas	50
CAPÍTULO 4 - IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES	53
4.1 - Introdução	53
4.2 - Parâmetros das Vibrações	54
4.3 - Equipamento Experimental	65
4.4 - Procedimento Experimental	68
4.5 - Condições do Ensaio	71
CAPÍTULO 5 - AQUISIÇÃO DE VIBRAÇÃO E ANÁLISE DO SINAL	73
5.1 - Introdução	73
5.2 - Análises das Vibrações	75
5.2.1 Sinal em RMS	76
5.2.2 Sinal em FFT	78
5.2.3 Sinal em Oitavas	81
5.3 - Discussão dos Resultados	84
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO	87
CAPÍTULO 7 - BIBLIOGRAFIA	91

Lista de Figuras

Figura 2.1- Nomenclatura do Sistema de Eixos Lineares e Rotativos (Chocalheiro, 2012)	6
Figura 2.2- Centros de Maquinagem com 5 Eixos, (a) 3 Eixos Translação (X; Y; Z) + 2 Eixos Rotação (A e C); (b) 3 Eixos Translação (X; Y; Z) + 2 Eixos Rotação (B e C); (Apontamentos teóricos).....	7
Figura 2.3- Eixos do Centro Maquinagem da HAAS UMC750SS, (HAAS, 2014).....	7
Figura 2.4- Mesa da HAAS UMC 750SS com o Eixo B Inclinado e o Eixo C Rodado.....	8
Figura 2.5- Estudo de Rigidez do Centro de Maquinagem HAAS UMC 750 (HAAS, HAAS UMC-750SS, 2015).....	9
Figura 2.6- Configuração de um Sistema CNC em anel aberto e anel fechado (Apontamentos das aulas Teóricas)	10
Figura 2.7- (a) Guia Linear, (sferatech, 2012); (b) Detalhe do interior de uma Guia Linear, (avasistema, 2010).....	11
Figura 2.8- Fusos de Esferas Circulantes (Rexroth, 2002)	12
Figura 2.9- Guias Lineares e Fusos de Esferas (produto.mercadolivre.com.br, 2015)	12
Figura 2.10- Fusos e guias que dirigem o movimento dos eixos X e Z da HAAS UMC 750 SS	13
Figura 2.11- Configuração de um Sistema CNC em anel fechado (slideshare, 2015).....	14
Figura 2.12- Exemplo de um servomotor e respetivo motor que equipam uma máquina CNC (panasonic, 2015)	15
Figura 2.13- (a) Exemplo de um motor elétrico da árvore de uma máquina CNC (Fanuc, 2015), (b) motor elétrico da árvore da máquina CNC HAAS UMC 750 SS (HAAS, HAAS, 2016)	16
Figura 2.14- Curva de Binário e de Potência do motor HAAS UMC 750SS (HAAS, HAAS, 2017) .	17

Figura 2.15- Exemplo de funcionamento das réguas óticas: (a) Réguas óticas longitudinais; (b) Réguas óticas angulares (solucoesindustriais, s.d.).....	19
Figura 2.16- (a) Esquema funcionamento de troca de ferramenta, (b) Sistema trocador de Ferramenta.....	20
Figura 2.17- Refrigeração Externa com 4 bocais direcionais da HAAS UMC 750SS	21
Figura 2.18- Esquema Refrigeração Interna de uma broca (Apontamentos das aulas Teóricas) ...	22
Figura 2.19- Circuito de Refrigeração interna e externa (HAAS, HAAS, 2016)	22
Figura 2.20- Exemplos de controladores de máquinas CNC: (a) Fanuc (helmancnc.com, 2015); (b) Heidenhain (mori, 2016); (c) Siemens (Siemens, 2016); (d) HAAS (HAAS, HAAS UMC-750SS, 2015);	24
Figura 3.1- Exemplo de uma sonda de contacto (HEIDENHAIN, 2015)	27
Figura 3.2- Representação do Princípio de Funcionamento da sonda (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)	28
Figura 3.3- Número de pontos que descrevem as formas geométricas (Renishaw, Probing systems for CNC machine tools, 2014)	28
Figura 3.4- Princípio de funcionamento da sonda de resistência cinemática (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014).....	30
Figura 3.5- Etapas por que passa a ponteira durante a aproximação e contacto com uma peça (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)	31
Figura 3.6- Exemplo de utilização de uma sonda num trabalho de calibração realizado numa máquina de 5 eixos (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014).....	31
Figura 3.7- Esquema de funcionamento da sonda com funcionamento por extensometria (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014).....	32
Figura 3.8- Exemplos de diferentes modelos de ponteiras de ligação à sonda (HEIDENHAIN, 2015)	33
Figura 3.9- Sistema de medição de ferramentas: (a) por contacto; (b) sem contacto, lazer (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014).....	34
Figura 3.10- Avaliação da ferramenta num sistema de medição por contacto (a) e sem contacto, lazer (b) (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014).....	35
Figura 3.11- Princípio de funcionamento da sonda de medição de ferramentas por resistência cinemática (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)	36
Figura 3.12- Etapas por que passa a ponteira da sonda de medição no movimento de aproximação e contacto da ferramenta (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)	36

Figura 3.13- Esquema de funcionamento de um sistema laser para medir ferramentas (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)	37
Figura 3.14- Princípio de funcionamento de um sistema laser para medir ferramentas (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)	37
Figura 3.15- Princípio da Transmissão de Informação para o controlador CNC (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)	38
Figura 3.16- Transmissão de Informação por Cabo (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)	39
Figura 3.17- Reflexão do sinal de infravermelhos numa máquina-ferramenta com área de trabalho fechada (HEIDENHAIN, 2015)	40
Figura 3.18- Sistema transmissão por infravermelhos (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)	40
Figura 3.19- Sistemas Renishaw com transmissão do sinal por infravermelhos, incorporados no equipamento HAAS UMC 750SS: (a) Sonda de contacto OMP 40-2; (b) Sistema de medição de ferramentas OTS; (c) Recetor/Interface OMI-2H. (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014),	42
Figura 3.20- Bore	43
Figura 3.21- Boss	43
Figura 3.22- Rectangle Pocker	44
Figura 3.23- Rectangle Block	45
Figura 3.24- Web X Axis	45
Figura 3.25- Pocket X Axis	46
Figura 3.26- Web Y Axis	47
Figura 3.27– Pocket Y Axis	47
Figura 3.28- Outside Corner	48
Figura 3.29- Inner Corner	49
Figura 3.30- Single Surface	49
Figura 3.31- Variedades de ferramentas definidas no controlador do centro de maquinagem (HAAS, Manual do Operador , 2014)	50
Figura 3.32- Modo de determinação do comprimento aproximado da ferramenta (HAAS, Manual do Operador , 2014)	52

Figura 4.1- Representação de Pico, Pico a Pico e RMS de uma onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)	55
Figura 4.2- Primeiro estágio de uma onda para caracterizar fator de crista (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)	56
Figura 4.3- Segundo estágio de uma onda para caracterizar fator de crista (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)	57
Figura 4.4- Terceiro estágio de uma onda para caracterizar fator de crista (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)	57
Figura 4.5- Representação esquemática do comprimento de uma onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014).	58
Figura 4.6- Representação de uma onda com uma frequência de 1 Hz (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014).	58
Figura 4.7- Diferença entre alta e baixa frequência (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)	59
Figura 4.8- Decomposição de uma onda em harmônicos (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)	60
Figura 4.9- Junção dos vários harmônicos de uma onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)	60
Figura 4.10- Representação da amplitude de uma onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)	61
Figura 4.11- Representação espectral de uma onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)	62
Figura 4.12- Passagem de um sinal no domínio do tempo para o domínio de frequência (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)	62
Figura 4.13- Exemplo da conversão de um sinal para análise de oitavas (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)	63
Figura 4.14- Gráfico de uma análise em oitavas (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)	64

Figura 4.15- Gráfico de uma análise em 1/3 de oitavas (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)	64
Figura 4.16- <i>Layout</i> da aplicação desenvolvido para aquisição das vibrações induzidas pela árvore de rotação da fresadora a cinco eixos HAAS UMC 750SS num qualquer material.	65
Figura 4.17- Visualização do sistema de eixos do acelerómetro triaxial usado para aquisição das vibrações.	66
Figura 4.18- Placa de aquisição de dados NI 9234, com 4 entradas analógicas.	67
Figura 4.19- Chassi usado na interface de ligação entre o acelerómetro e o computador.	67
Figura 4.20- Acelerómetro colocado na parte superior do shaker para se proceder à sua calibração.	68
Figura 4.21- Visualização dos valores obtidos da calibração do acelerómetro segundo o eixo y. ..	69
Figura 4.22- Sensibilidade do acelerómetro no eixo y.....	69
Figura 4.23- Colocação do acelerómetro.....	70
Figura 4.24- Pormenor da orientação do sistema de eixos do acelerómetro na mesa de CNC e no equipamento.	71
Figura 4.25- Taxa de Aquisição e Amostragem	72
Figura 5.1- Amplitude da vibração segundo o eixo dos xx para o quinto ensaio	74
Figura 5.2- Amplitude da vibração segundo o eixo dos yy para o quinto ensaio	74
Figura 5.3- Amplitude da vibração segundo o eixo dos zz para o quinto ensaio	74
Figura 5.4- Valores Globais da Vibração em RMS.....	78
Figura 5.5- Aceleração em FFT segundo o eixo x (a), segundo o eixo yy (b) e segundo o eixo zz (c) para o ensaio número 5	79
Figura 5.6- Velocidade em FFT segundo o eixo x (a), segundo o eixo yy (b) e segundo o eixo zz (c) para o ensaio número 5	80
Figura 5.7- Deslocamento em FFT segundo o eixo x (a), segundo o eixo yy (b) e segundo o eixo zz (c) para o ensaio número 5	81
Figura 5.8- Aceleração em oitavas segundo o eixo x (a), segundo o eixo yy (b) e segundo o eixo zz (c) para o ensaio número 5	82
Figura 5.9- Velocidade em oitavas segundo o eixo x (a), segundo o eixo yy (b) e segundo o eixo zz (c) para o ensaio número 5	83
Figura 5.10- Deslocamento em oitavas segundo o eixo x (a), segundo o eixo yy (b) e segundo o eixo zz (c) para o ensaio número 5.....	84

Figura 6.1– Transporte e instalação (a) Movimentação no interior do edifício onde foi instalado o equipamento. (b) Vista posterior da máquina-ferramenta durante a instalação.88

Lista de Tabelas

Tabela 3.1- Tabela "Tool Offset"	51
Tabela 3.2- Tabela "Tool Info"	51
Tabela 3.3- Tabela "Probing"	52
Tabela 4.1- Parâmetros de corte usados na maquinagem do aço inoxidável duplex.	71
Tabela 5.1- Valores obtidos para os ensaios realizados.	77

Lista de Equações

Equação 4.1.....	54
Equação 4.2	54
Equação 5.1.....	75

Abreviaturas

CNC	Computer Numerical Control (comando numérico computadorizado)
ISEC	Instituto Superior de Engenharia de Coimbra
CAD	Computer-Aided Design (desenho assistido por computador)
CAM	Computer-Aided Manufacturing (fabrico assistido por computador)
DC Servomotor	Servomotor de corrente contínua
AC Servomotor	Servomotor de corrente alternada
HP	Horse power (cavalos de potência)
rpm	Rotações por minuto
TNC	Tool Numeric Control (controlo numérico de ferramenta)

ISO	International Organization for Standardization (Instituição Internacional para Padronização)
ATC	Automatic Tool Change (troca automática de ferramenta)
OTS	Optical Transmission Systems (sistema de transmissão ótico)
WIPS	Wireless Intuitive Probing System
OMP40-2	Optical Machining centre Probe (sonda de medição ótica)
FHSS	Spectrum Frequency Hopping Spread
RMS	Root Mean Square (valor médio quadrático)
FFT	Fast Fourier Transform (transformada rápida de Fourier).
Hz	Hertz

Capítulo 1

Enquadramento

1.1 - Enquadramento e objetivos do trabalho

O Departamento de Engenharia Mecânica tem realizado um longo da sua existência, formação académica e prestação de serviços na área da maquinagem por corte de arranque de aparas. Particularmente, nas últimas décadas, para responder aos desafios crescentes da sociedade, revelou-se de grande importância a programação e maquinagem CNC, conjuntamente com as tecnologias CAD/CAM.

O desenvolvimento de trabalhos na área da maquinagem tem sido baseado em máquinas-ferramentas CNC adquiridas à algumas décadas, sendo utilizado em grande escala um centro de maquinagem de 3 eixos. Neste seguimento, tendo em conta que muito recentemente surgiu a possibilidade de ser adquirido um moderno centro de maquinagem de 5 eixos da marca HAAS, modelo UMC 750SS, para o laboratório de Biomecânica Aplicada, tornou-se útil e necessário conhecer e explorar as potencialidades desta máquina-ferramenta, de modo a acompanhar a evolução tecnológica neste setor.

O Laboratório de Biomecânica Aplicada encontra-se sediado no Departamento de Engenharia Mecânica do ISEC, sendo parte integrante do Instituto de Investigação Aplicada do IPC.

Face ao enquadramento apresentado, no âmbito do mestrado em Engenharia Mecânica, foi proposta a realização de um trabalho de projeto, sendo os objetivos definidos para este trabalho os seguintes:

- Conhecer os constituintes de um centro de maquinagem, com ênfase nas máquinas-ferramentas de 5 eixos;
- Explorar os sistemas de sondas intuitivos sem fios que equipam os modernos centros de maquinagem, dando particularmente atenção aos sistemas de medição de zero-peça e medição de ferramentas que equipam o centro de maquinagem HAAS UMC 750SS adquirido recentemente;
- Operar o centro de maquinagem, executando a programação CAD/CAM para o fabrico de componentes mecânicos.
- Implementar um sistema independente do equipamento para aquisição da vibração durante as operações de maquinagem. Para esse efeito, é necessário compreender os princípios de aquisição de sinal e implementar o hardware e software de aquisição e tratamento do sinal. No final desta etapa, pretende-se adquirir e interpretar o sinal de vibração durante o processo de maquinagem para diferentes condições de corte, de modo a demonstrar o potencial deste sistema em trabalhos futuros.

1.2 - Organização do documento

O presente trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos. Após o capítulo introdutório, no segundo capítulo são abordados os constituintes de um centro de maquinagem, com ênfase nas máquinas-ferramentas de 5 eixos. Nos casos em que foi viável, foi apresentado como exemplo o centro de maquinagem HAAS UMC 750SS.

O Capítulo 3 é dedicado a explorar os sistemas de sondas intuitivos sem fios que equipam o centro de maquinagem HAAS UMC 750SS. Além de ser apresentado o princípio de funcionamento destes componentes, são apresentados exemplos concretos executados no equipamento adquirido.

Na parte inicial do Capítulo 4 são apresentados os conceitos fundamentais para interpretar e tratar um sinal adquirido. Posteriormente, é explicado o hardware e

software implementado, necessário para aquisição da vibração que ocorre durante as operações de maquinagem,

No capítulo 5 são apresentados os testes de aquisição de vibração realizados com diferentes condições de corte, bem como o tratamento e interpretação dos dados obtidos.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as principais conclusões retiradas do trabalho desenvolvido e sugestões de trabalhos futuros relacionados com o estudo aqui efetuado.

Capítulo 2

Principais Constituintes de um Centro de Maquinagem CNC de 5 Eixos

2.1 - Nomenclatura dos Eixos de Maquinagem

As máquinas-ferramentas CNC são usadas em diversas indústrias. Estas máquinas vieram possibilitar o fabrico de peças com geometrias mais complexas e de variadas formas, com uma maior precisão e melhores acabamentos, sendo os centros de maquinagem de 3 eixos, o mais comum, e os centros de maquinagem de 5 eixos os mais avançados, do ponto de vista de complexidade da geometria dos componentes mecânicos produzidos.

De forma a perceber os graus de liberdade duma máquina CNC, é necessário conhecer a terminologia básica dos eixos de maquinagem. Numa fresadora de 3 eixos, os eixos lineares que as definem são habitualmente designados por X, Y e Z. No caso da fresadora de 5 eixos, é necessário introduzir 2 eixos rotativos adicionais. Estes eixos rodam sobre dois dos três eixos lineares principais, tal como está ilustrado na figura 2.1.

- O eixo que roda em torno do eixo X é designado de eixo A.
- O eixo que roda em torno do eixo Y é designado de eixo B.
- O eixo que roda em torno do eixo Z é designado por C.

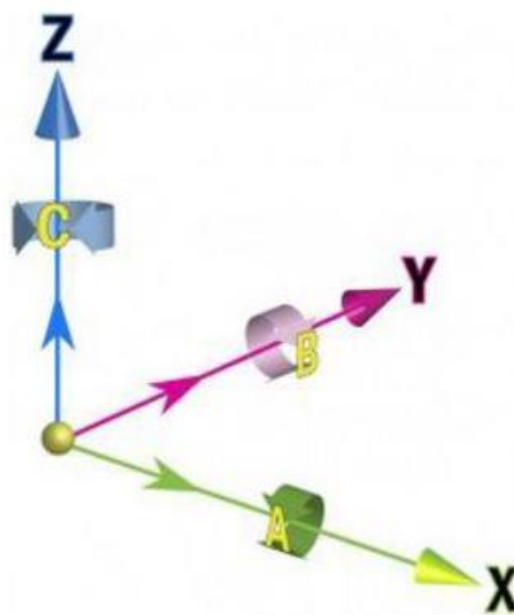


Figura 2.1- Nomenclatura do Sistema de Eixos Lineares e Rotativos (Chocalheiro, 2012)

Sistemas dos eixos rotativos

O sistema de rotação dos eixos A, B e C podem ser na árvore, ou na mesa, no caso da figura 2.2 (a), o eixo de rotação B está localizado na árvore, enquanto o eixo de rotação C, encontra-se na mesa. Por seu turno, no caso da figura 2.2 (b), ambos os eixos de rotação são acionados na mesa. Regra geral, as máquinas com esta última configuração, são vocacionadas para o fabrico de componentes de pequena ou média dimensão. Os componentes de grande dimensão, são melhor produzidos em máquinas com todos, ou pelo menos alguns dos eixos de rotação, na árvore.

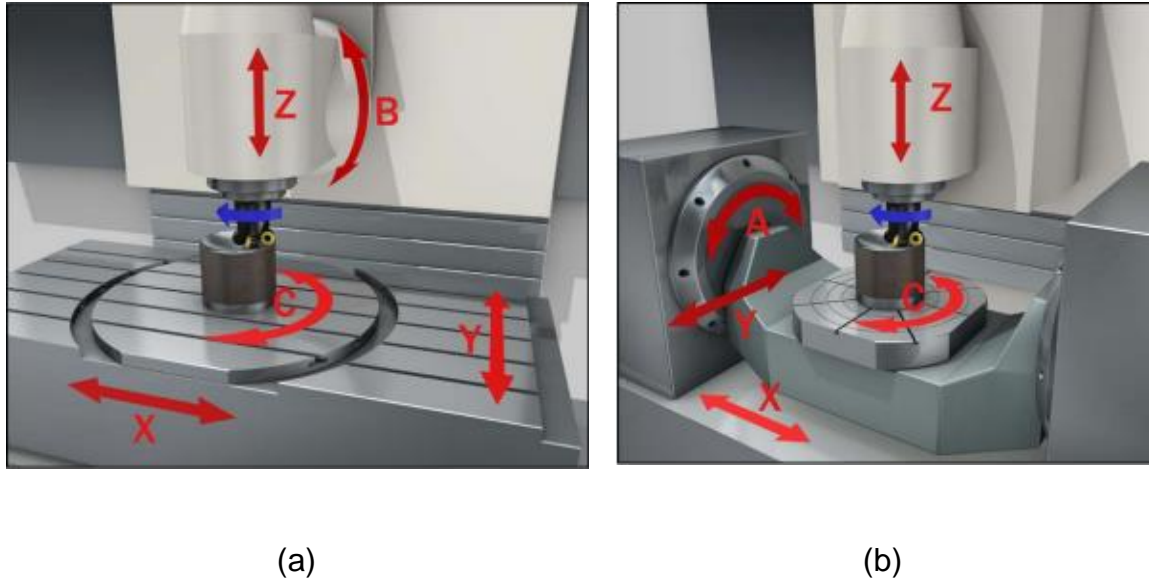


Figura 2.2- Centros de Maquinagem com 5 Eixos, (a) 3 Eixos Translação (X; Y; Z) + 2 Eixos Rotação (A e C); (b) 3 Eixos Translação (X; Y; Z) + 2 Eixos Rotação (B e C); (Apontamentos teóricos)

A figura 2.3 mostra os graus de liberdade do equipamento HAAS UMC 750SS adquirido pelo ISEC, sendo de notar o sentido positivo (+) e negativo (-) de cada um dos 5 eixos de acordo com a nomenclatura apresentada anteriormente.

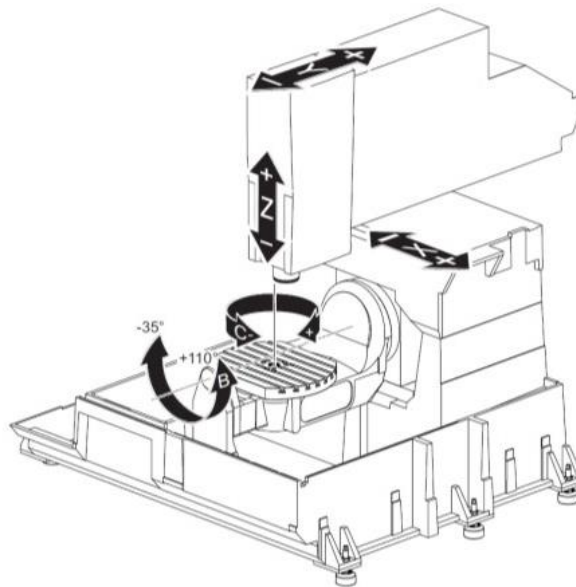


Figura 2.3- Eixos do Centro Maquinagem da HAAS UMC750SS, (HAAS, 2014)

A figura 2.4 mostra que esta máquina tem uma mesa integrada de dois eixos rotativos. O eixo B pode ser designado por eixo basculante em vez de rotativo, uma vez que apresenta uma rotação limitada a $+35^\circ$ e -110° . Já o eixo rotativo C roda 360° na mesa garantindo uma grande área disponível, graças às boas dimensões

da mesa de 630x500 mm e capacidade para suportar blocos com o máximo de 500 kg.

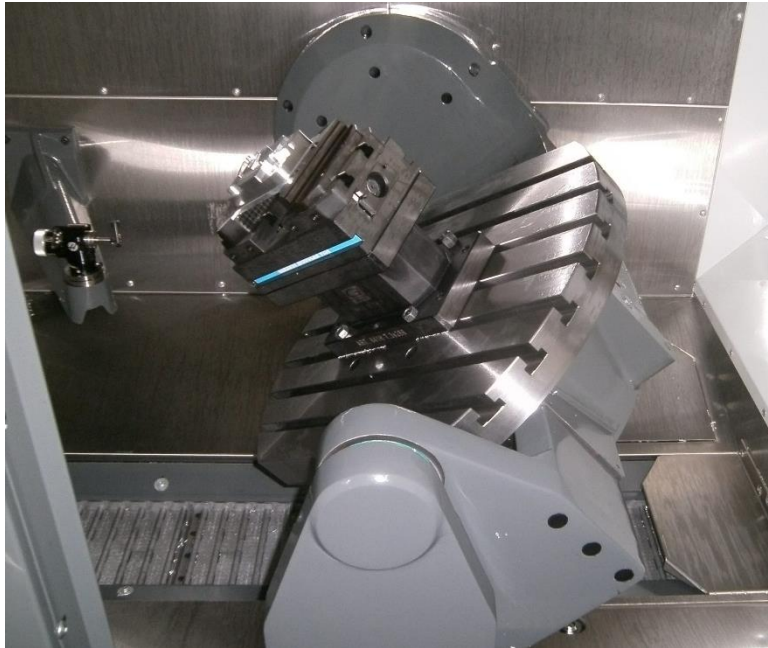


Figura 2.4- Mesa da HAAS UMC 750SS com o Eixo B Inclinado e o Eixo C Rodado

2.2 - Estrutura de uma Máquina CNC

A estrutura de uma máquina-ferramenta é usualmente designada de barramento. O barramento é a base de um centro de maquinagem CNC, pois sustenta a maioria de seus acessórios, como a mesa rotativa, árvore, o carrocel, etc.

A configuração da máquina com proteções, tem como objetivo isolar a área de trabalho, permitindo um bom controlo de pó e resíduos, baixo ruído e uma maior segurança do operador.

A estrutura de uma máquina de CNC deve ser de grande robustez, apresentando as seguintes vantagens: vibração reduzida; elevada rigidez e grande inércia térmica.

No caso do equipamento da HAAS UMC 750SS adquirida pelo ISEC, esta tem uma estrutura em ferro fundido cinzento, que garante estabilidade dez vezes maior que o aço. As peças fundidas deste equipamento são reforçadas internamente com inúmeras nervuras para resistirem às vibrações, flexões e impactos, e cada uma é inspecionada cuidadosamente durante o fabrico para garantir que não tem ocos.

A figura seguinte mostra o estudo de rigidez efetuado ao barramento do centro de maquinagem da HAAS UMC 750SS.

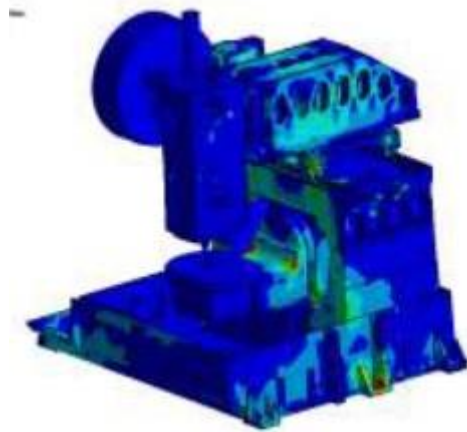


Figura 2.5- Estudo de Rigidez do Centro de Maquinagem HAAS UMC 750 (HAAS, HAAS UMC-750SS, 2015)

2.3 - Sistemas de Controlo em Anel Aberto e Anel Fechado

A figura 2.6 ilustra as diferenças entre os sistemas de controlo em anel aberto e anel fechado.

No sistema em anel aberto, o controlo do movimento dos eixos da máquina CNC é unidirecional. Uma vez que o posicionamento dos eixos não é confirmado após a movimentação, não ocorre uma correção imediata da ação do sistema, caso tenham existido perturbações, tais como folgas anómalas.

Num sistema de controlo em anel fechado, os dispositivos de realimentação de sinal acompanham de perto a saída do sinal. Assim, caso ocorra qualquer perturbação, é corrigido o sinal logo de seguida, implicando um ajuste no posicionamento dos eixos e, por conseguinte, uma maior precisão no movimento. O sistema em anel fechado é mais poderoso do que o sistema de controlo em anel aberto, sendo desejável aplica-lo quando o sinal de saída é sujeito a mudanças frequentes. Hoje em dia quase todas as máquinas de CNC usam este sistema de controlo. (slideshare, 2015), Adaptado.

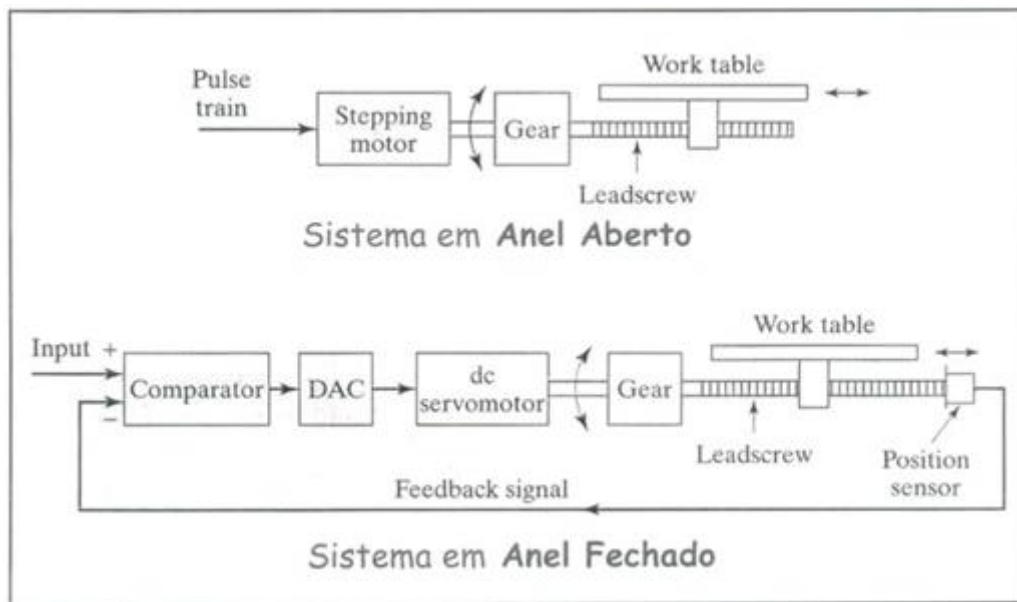


Figura 2.6- Configuração de um Sistema CNC em anel aberto e anel fechado (Apontamentos das aulas Teóricas)

2.4 - Movimentos lineares

Os movimentos realizados segundo os eixos X, Y e Z, pela mesa e pela árvore, são realizados baseados em sistemas de guiamento. Estes sistemas de guiamento têm que ser precisos, ou seja, sem folgas. Estes sistemas de movimento linear desempenham um papel vital em qualquer máquina CNC.

Este sistema é responsável por três tarefas principais:

- Suportar alguns componentes da mesa e da árvore;
- Orientar os eixos em um movimento linear preciso, sem folgas com o mínimo de atrito;
- Apoiar cargas secundárias (binário, cargas laterais);

Estes sistemas são compostos por guias lineares e fusos de esferas. Existem vários tipos de rolamentos e de guias, cada um com vantagens e desvantagens.

2.4.1 Guias Lineares

As guias lineares têm como objetivo proporcionar maior estabilidade do deslocamento, permitindo precisão no posicionamento de alguma parte, ou peça, de uma máquina ou mecanismos. Estas guias são superfícies, ranhuras, barras prismáticas, ou cilíndricas. (omicrom, 2015). As guias lineares com patins de esferas estão representadas na figura 2.7, sendo desenvolvidos especialmente

para as máquinas ferramentas e robôs industriais que requerem guias longitudinais compactas com rolamentos em várias classes de precisão, com capacidade de carga extremamente elevada e uma grande rigidez. Construídos em dimensões extremamente compactas, tem também uma elevada capacidade de carga nas quatro principais direções de carga. A maior parte dos equipamentos utiliza patins de aço. No entanto, no caso em que seja necessária uma redução de peso, é recomendado patins de alumínio.

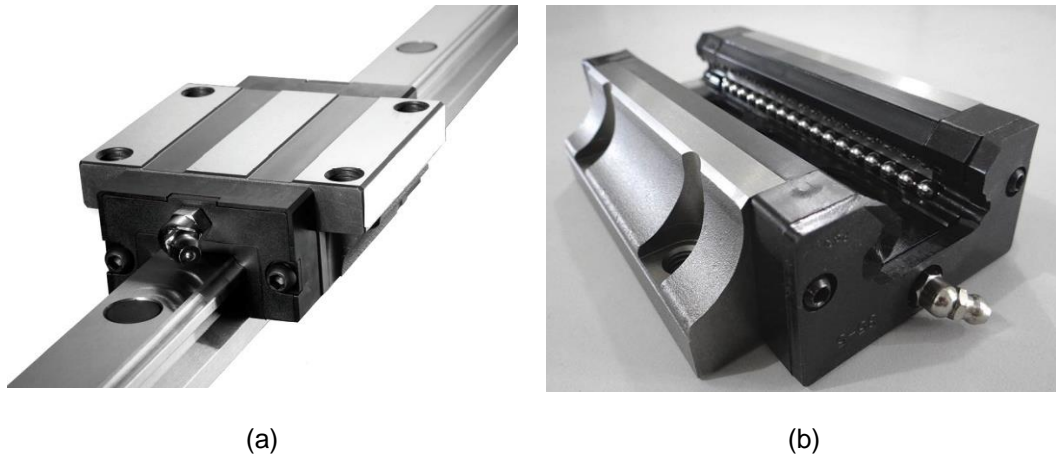


Figura 2.7- (a) Guia Linear, (sferatech, 2012); (b) Detalhe do interior de uma Guia Linear, (avasistema, 2010)

No caso do equipamento HAAS UMC 750SS do ISEC, a máquina usa conjuntos de patins de esferas em aço temperado, deslizando sobre guias lineares também em aço temperado. As guias são retificadas com a mesma precisão de retificação utilizada no fabrico de rolamentos, garantindo deste modo a minimização de folgas e cargas máximas em todas as direções.

2.4.2 Fusos de Esferas

Os fusos de esferas (figura 2.8) são responsáveis pela conversão de energia de rotação (gerada por um motor AC, servomotor, etc.) em movimentação linear. Na aplicação mais comum, um fuso, apoiado nas extremidades, recebe movimento giratório de um motor e, por contato direto com esferas de aço que se alojam entre a castanha e o fuso, provoca o deslocamento de uma castanha ou porca (onde está presa a carga a ser movimentada). As esferas metálicas são, por sua vez, guiadas e realimentadas por canais de recirculação na castanha ou porca, dando linearidade e suavidade ao movimento.

O fuso de esferas é um sistema de acionamento de alta eficiência, no qual a esfera realiza um movimento helicoidal com baixo atrito, entre o eixo do fuso e a castanha.

Comparado com fuso trapezoidal ou rosca quadrada convencional, o fuso de esferas necessita de um terço do binário de transmissão, tornando-o mais adequado para economizar a energia de trabalho.

Pelo facto dos fusos de esferas reduzirem o atrito, estes podem operar com pré-carga, eliminando efetivamente folga entre a entrada (rotação) e saída (movimento linear). (ebah, 2010)



Figura 2.8- Fusos de Esferas Circulantes (Rexroth, 2002)

Na figura seguinte estão apresentadas as guias lineares e os fusos de esferas habitualmente utilizados em máquinas CNC

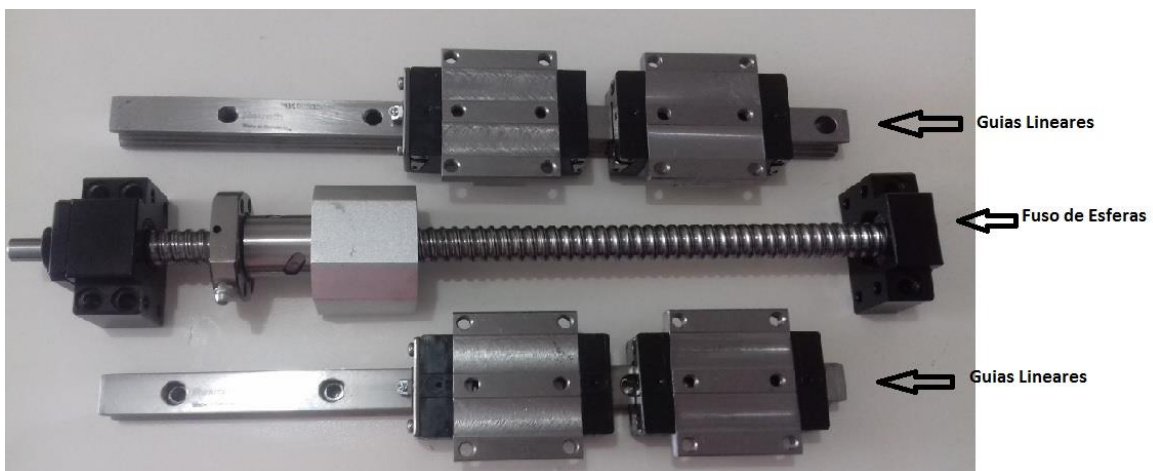


Figura 2.9- Guias Lineares e Fusos de Esferas (produto.mercadolivre.com.br, 2015)

No caso do equipamento HAAS 750SS do ISEC, os fusos de esferas HAAS estão apoiados nas duas extremidades, pré-tencionados e inspecionados para 100% de paralelismo às guias dos eixos na figura 2.10.

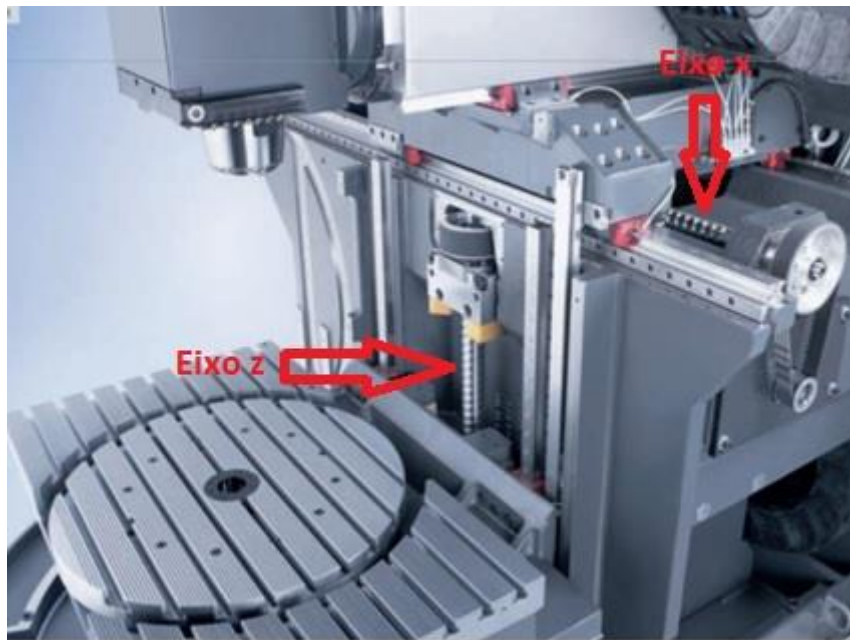


Figura 2.10- Fusos e guias que dirigem o movimento dos eixos X e Z da HAAS UMC 750 SS

2.4.3 Componentes que controlam os movimentos lineares

A figura 2.11 apresenta um esquema com os principais componentes que controlam os movimentos lineares de um Centro de Maquinagem CNC. São vários os sistemas ilustrados nesta figura, os quais estão descritos mais abaixo.

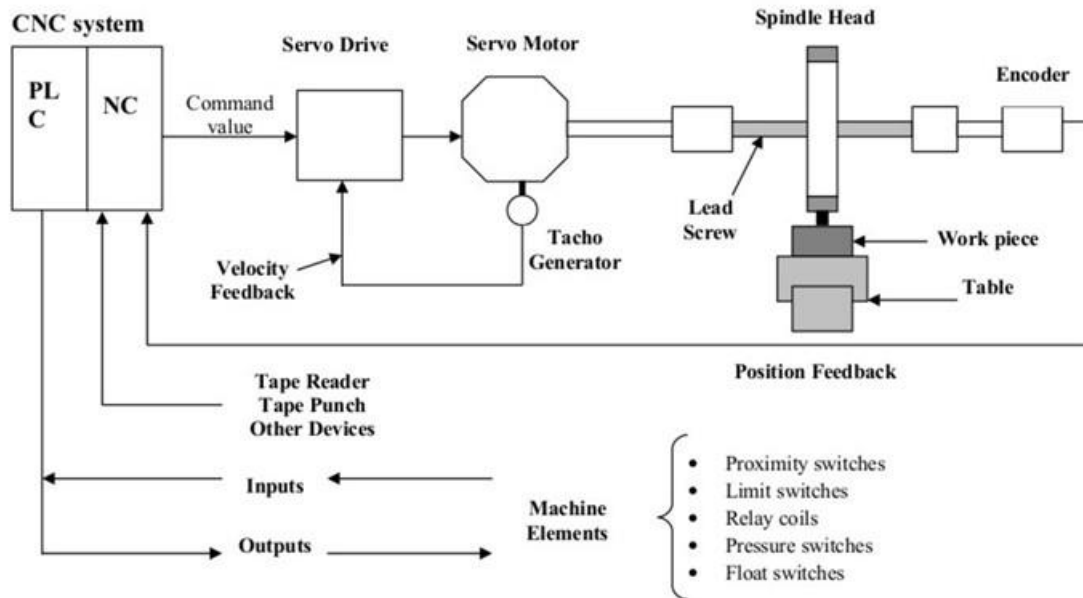


Figura 2.11- Configuração de um Sistema CNC em anel fechado (slideshare, 2015)

O componente representado na figura 2.12 designado de servo-Drive, tem como função receber um sinal de comando a partir de um sistema de controlo, amplificando o sinal e transmitindo uma corrente elétrica para um servomotor, a fim de produzir um movimento proporcional ao sinal de comando. Tipicamente, o sinal de comando representa uma velocidade desejada, mas também pode representar um binário ou posição desejada. Um sensor ligado ao servomotor relata ao servo-drive o estado atual do motor. A unidade do servomotor, em seguida, compara o estado atual do motor com o estado do motor ordenado, sendo alterada frequência de tensão para o motor, de modo a corrigir qualquer desvio em relação ao estado ordenado. Embora diversos servomotores requeiram uma unidade específica de controlo para o servomotor em causa, muitas outras unidades que agora estão disponíveis, são compatíveis com uma ampla variedade de motores. (slideshare, 2015), Adaptado.



Figura 2.12- Exemplo de um servomotor e respetivo motor que equipam uma máquina CNC (panasonic, 2015)

2.4.4 Servomotor

Amplamente usado hoje em dia, o servomotor surgiu de uma necessidade de se movimentar alguma coisa de forma precisa e controlada.

O Servomotor é uma máquina eletromecânica, que apresenta movimento proporcional a um comando. Os servomotores recebem um sinal de controlo, que verifica a posição atual para controlar o movimento, indo para a posição desejada, com velocidade monitorizada externamente sob feedback de um dispositivo denominado tacómetro ou sensor de efeito Hall ou encoder, dependendo do tipo de servomotor e aplicação.

Os servomotores estão colocados na mesa para movimenta-la. Isto significa que quando a máquina está a trabalhar, os servomotores estão a movimentar a mesa em conformidade com os programas aplicados.

O servomotor possui um circuito de controlo formado por componentes eletrónicos que recebe um sinal do sensor (posição do eixo). O sinal de controlo aciona o motor no sentido necessário para posicionar o eixo na posição desejada. (slideshare, 2015), Adaptado

Servomotor de corrente contínua (DC ServoMotor)

Este é o tipo mais comum de motores de alimentação afetos ao movimento dos eixos lineares de máquinas CNC. O princípio de funcionamento é baseado na rotação de um enrolamento num campo magnético induzido permanentemente. O enrolamento do induzido está ligado a um comutador, o qual é um cilindro de

segmentos isolados de cobre montado no veio. A corrente contínua passa para o comutador através de escovas de carvão ligadas aos terminais da máquina. A variação da velocidade do motor é conseguida através da corrente induzida nos motores. A fim de conseguir o comportamento dinâmico necessário, o sistema é operado num circuito fechado, equipado com codificadores para obter os sinais de realimentação de velocidade e posição. (slideshare, 2015), Adaptado

Servomotor de corrente alternada (AC ServoMotor)

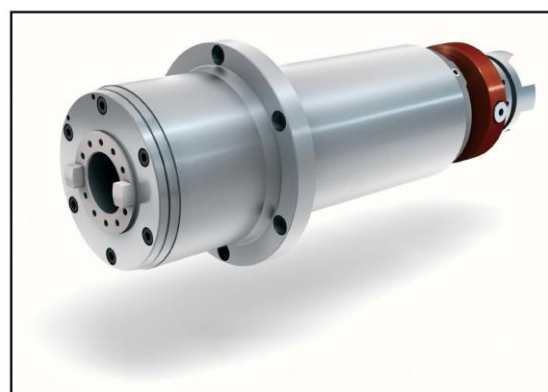
Num servomotor de corrente alternada, o rotor é um íman permanente, enquanto o estator está equipada com 3 enrolamentos de fase. Os Motores de corrente alternada têm gradualmente substituído os servomotores de corrente contínua. A razão principal é que não existe qualquer comutador ou escovas em um servomotor AC de modo a que manutenção praticamente não é necessária. (slideshare, 2015), Adaptado.

2.4.5 Motor da Árvore

A rotação da ferramenta nos centros de maquinagem é realizada pela árvore principal. Os motores que animam a árvore de rotação (figura 2.13), oferecem uma grande aceleração, aliada à elevada precisão mecânica e baixa vibração. São excelentes em termos de compatibilidade com máquinas de grande dimensão e fusos de elevado desempenho. Tipicamente encontram-se motores com potências de saída entre 0,55 a 50 kW, de elevado binário com velocidades reduzidas. O acionamento da árvore é realizado através de um motor que poderá ser de corrente alternada ou corrente contínua.



(a)



(b)

Figura 2.13- (a) Exemplo de um motor elétrico da árvore de uma máquina CNC (Fanuc, 2015), (b) motor elétrico da árvore da máquina CNC HAAS UMC 750 SS (HAAS, HAAS, 2016)

A figura seguinte ilustra uma curva de potência e binário em função da rotação, do motor da árvore da máquina instalada no ISEC, com um motor de 30CV (22,4kw) CNC de 20 cavalos (HP) e máximo de 15000 rpm.

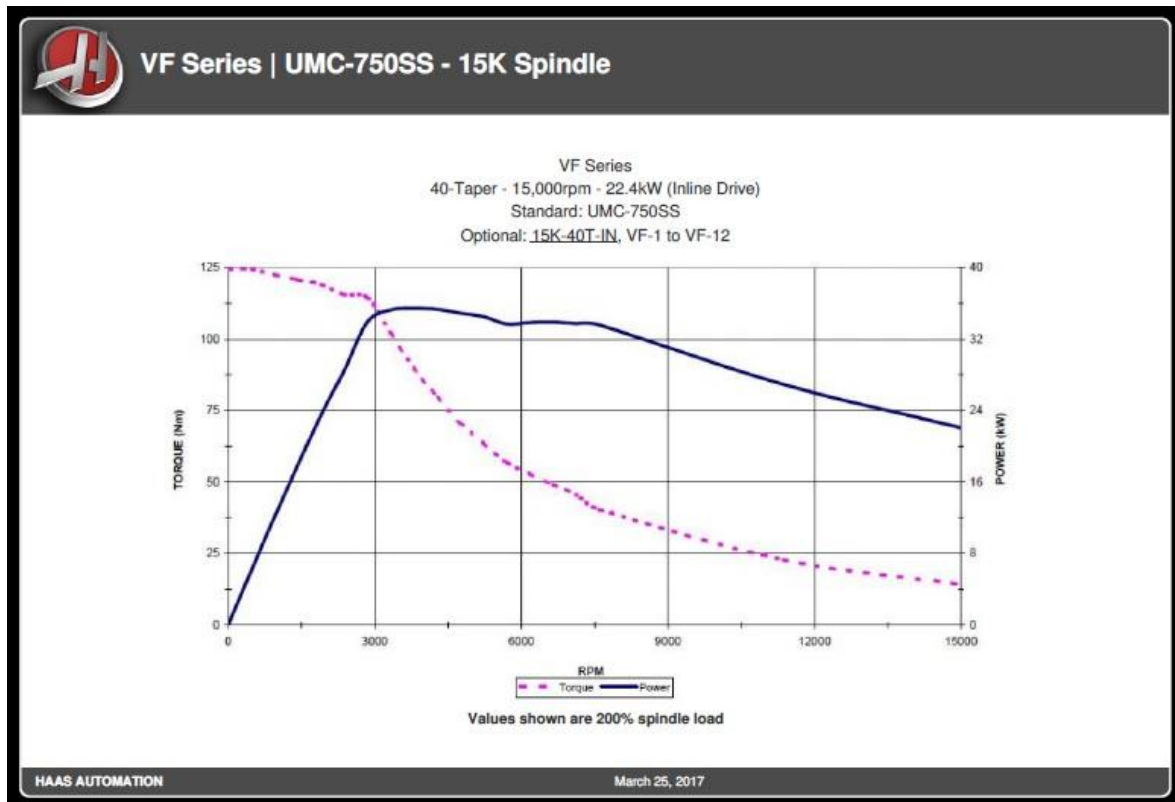


Figura 2.14- Curva de Binário e de Potência do motor HAAS UMC 750SS (HAAS, HAAS, 2017)

Quando o acionamento é feito por motores de corrente alternada, a seleção de rotações é feita por uma caixa de engrenagens. A gama de rotações disponíveis neste caso fica na dependência do número de escalonamentos da caixa de engrenagens. No entanto, as árvores principais das máquinas CNC são geralmente acionadas por motores de corrente contínua, onde as rotações podem ser realizadas sem escalonamento e controladas através de um tacômetro.

A escolha do motor da árvore de fresagem é muito importante. Os Fusos mais recentes não apresentam escovas (brushless) e os eixos são controlados por um inversor indutivo sobre rolamentos de cerâmica.

O valor nominal da velocidade do eixo encontra-se usualmente inscrita na placa de identificação (12.000, 15.000, 18.000, 24.000, 40.000 rpm), o que não significa que o eixo-árvore esteja sempre animado com estas rotações. As rotações podem ser controladas pelo inversor, mas há que ter em conta que a potência do eixo é expressa pelo valor do binário multiplicado por velocidade de rotação.

Quando o acoplamento do motor é indireto, significa que o motor tem uma correia de transmissão ligada ao motor e à árvore. Este sistema implica que ao longo do tempo a correia vai perdendo rendimento. Por este motivo, nos equipamentos mais recentes, o motor é de acoplamento direto para que, além de outros benefícios já mencionados, as vibrações durante o seu funcionamento sejam minimizadas. (kimla, 2015)

No caso do equipamento HAAS UMC 750SS do ISEC, vem equipada com um motor de 30CV (22,4kw), sendo a árvore desenvolvida e fabricada pela HAAS, de acoplamento direto, em linha com o motor, de 15.000 rpm máx., nariz ISO40. Tal resulta num melhor acabamento das superfícies das peças e estabilidade térmica

2.5 - Régua Ótica de Controlo de Posicionamento

Nas máquinas com controlo em anel fechado, há sistemas de medição de curso que registam as posições da mesa da máquina ou da ferramenta. Nos eixos lineares, os sistemas de controlo são geralmente de medição longitudinal, enquanto em mesas redondas e eixos basculantes, os sistemas de controlo são geralmente de medição angular.

Quando um eixo da máquina se move, o respetivo sistema de medida produz um sinal elétrico, a partir do qual o TNC (tool numeric control) calcula a posição real exata do eixo da máquina.

Com uma interrupção de corrente, perde-se a correspondência entre a posição do carro da máquina e a posição real calculada. Para se restabelecer esta atribuição, os aparelhos de medição do curso dispõem de marcas de referência. Ao alcançar-se uma marca de referência, o TNC recebe um sinal que caracteriza um ponto de referência fixo da máquina. Assim, o TNC pode restabelecer a correspondência da posição real para a posição atual do carro da máquina. Em caso de aparelhos de medição longitudinal com marcas de referência com código de distância, os eixos da máquina terão de ser deslocados no máximo 20 mm, nos aparelhos de medição angular, no máximo 20°.

No caso do equipamento HAAS UMC 750SS do ISEC, está equipada com régua ótica nos eixos B e C, as quais garantem leitura direta dos movimentos dos eixos, não sendo por isso afetadas por eventuais folgas nas transmissões de movimentos, assim como de vibrações das instalações fabris ou variações térmicas importantes.

Na figura seguinte ilustra o funcionamento de uma régua ótica e os seus componentes.

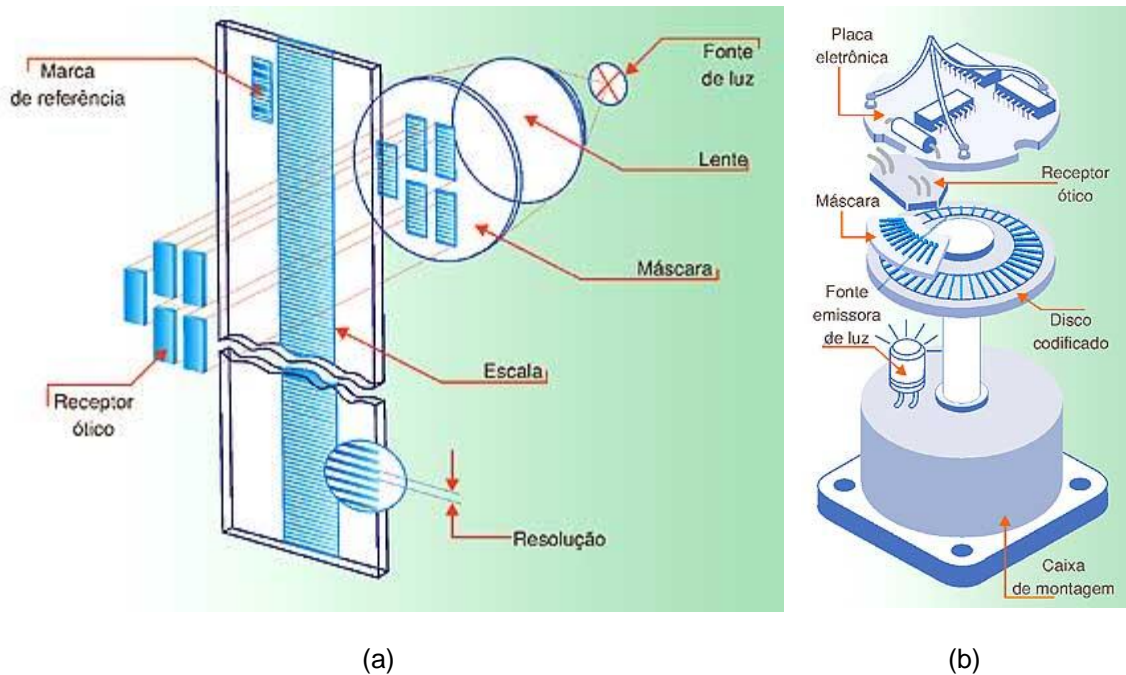


Figura 2.15- Exemplo de funcionamento das régulas óticas: (a) Régulas óticas longitudinais; (b) Régulas óticas angulares (solucoesindustriais, s.d.)

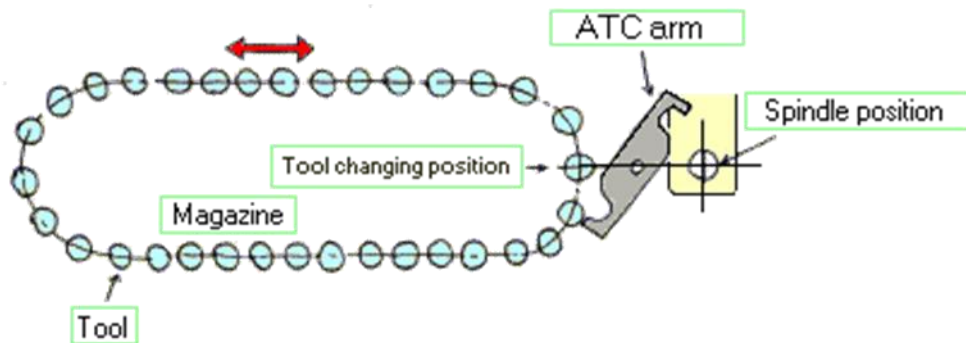
2.6 - Sistema Automático de Troca de Ferramentas

O sistema automático de troca de ferramentas ou ATC (Automatic Tool Changer) é usado numa máquina ferramenta de CNC para automatizar a produção e assim aumentar a capacidade de carregamento de ferramentas da máquina. O ATC muda a ferramenta muito rapidamente, reduzindo assim os tempos mortos de produção. Os armazéns de ferramentas podem ser projetados pelo fabricante da máquina de várias maneiras para atender as necessidades do processo de maquinação, obtendo, assim, a maior flexibilidade possível. Colocando o armazém de ferramenta fora da envolvente da zona de trabalho, liberta-se espaço adicional que facilitará a movimentação de peças maiores ou dispositivos de aperto

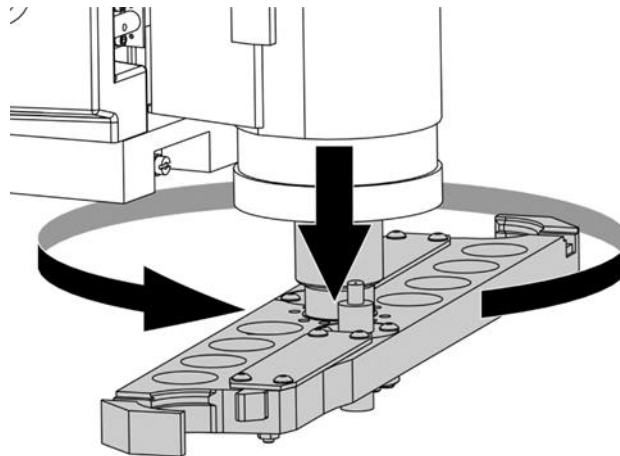
No caso do equipamento HAAS UMC 750SS do ISEC, é possível utilizar 40+1 ferramentas, sendo apresentado na figura 2.16 (a), uma ilustração explicativa do funcionamento deste sistema de troca de ferramenta.

No equipamento adquirido o armazém é circular e situa-se lateralmente, sendo equipado com um trocador de Braço Rápido que assegura a troca de ferramenta em 2,8 segundos. O sistema de troca de ferramenta é do tipo side mount tool changer, sendo realizado por um braço com duas garras, ilustrado na figura 2.16 (b). O programa posiciona a próxima ferramenta do armazém e o braço com duas

garras entra em ação, tirando de um lado a nova ferramenta do armazém e do outro lado a ferramenta que estava operando na árvore principal da máquina.



(a)



(b)

Figura 2.16- (a) Esquema funcionamento de troca de ferramenta, (b) Sistema trocador de Ferramenta

2.7 - Aplicação de Fluido de Corte

O fluido de corte é aplicado na ferramenta e no material que está sendo maquinado, a fim de facilitar a operação do corte. Os fluidos de corte são utilizados na indústria com a função de refrigerar, lubrificar, proteger contra a oxidação e limpar a região de maquinação. Após refrigerar a ferramenta e a peça, o fluido cai para a mesa onde é recolhido por canais e levado por meio de um tubo para o reservatório. A bomba aspira novamente o fluido para devolvê-lo sobre a ferramenta e a superfície

do trabalho. Os métodos mais usuais de aplicação da refrigeração em máquinas CNC são os designados de refrigeração externa e refrigeração interna, os quais serão abordados em seguida.

2.7.1 Refrigeração Externa

A refrigeração externa consiste na aplicação do fluido externamente à ferramenta. O fluido é ejetado a baixa pressão contra a ferramenta, utilizando para o efeito um conjunto de tubos que transportam o fluido desde o depósito de armazenamento até ao bocal que pode ser direcionado para a posição mais desejada. A Refrigeração externa é o método utilizado na máquina HAAS UMC 750SS do laboratório, conforme se encontra ilustrado na figura 2.17.



Figura 2.17- Refrigeração Externa com 4 bocais direcionais da HAAS UMC 750SS

2.7.2 Refrigeração Interna

A refrigeração interna consiste na injeção do fluido através do interior da ferramenta, tal como ilustra a figura 2.18. Neste caso a ferramenta necessita de possuir canais no seu interior, o que permite a entrada de refrigerante e assim arrefecer a ferramenta, a apara e também para a remoção das aparas da zona de corte. Tal como na refrigeração externa, o fluido é transportado por uma tubagem até à ferramenta, sendo neste caso injetado a alta pressão no interior da ferramenta. Enquanto as bombas utilizadas na refrigeração externa permitem pressões até cerca de 10 bar, no caso da refrigeração interna, o fluido de corte encontra-se a pressões superiores a 20 bar, podendo em sistemas especiais, ir até cerca de 90 bar.

A opção de refrigeração interna aumenta o tempo de vida da ferramenta, permite velocidades de corte mais altas e furações profundas. O resultado é uma mais alta produção por redução dos tempos de ciclo.

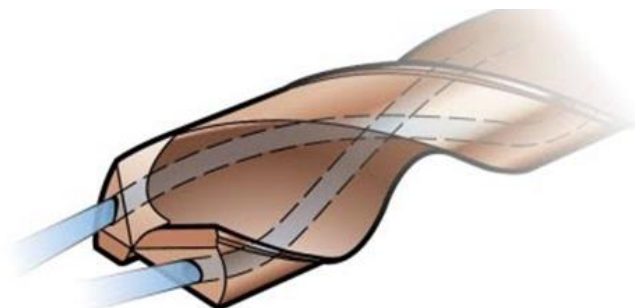


Figura 2.18- Esquema Refrigeração Interna de uma broca (Apontamentos das aulas Teóricas)

A figura seguinte ilustra uma máquina CNC onde é possível observar um circuito de refrigeração interna (representado com a cor azul claro) e um circuito de refrigeração externa (representado com a cor azul escuro).



Figura 2.19- Circuito de Refrigeração interna e externa (HAAS, HAAS, 2016)

2.8 - Controlador

O controlador CNC, representado na figura 2.20 (a), é a parte mais importante de controlo de uma máquina CNC. Um controlador CNC conecta todos os dispositivos importantes entre o sistema de computador e os componentes elétricos da máquina CNC, como os servos motores, motor da árvore, refrigeração, lubrificação, trocador de ferramentas e demais componentes elétricos. A principal função do controlador CNC é atuar os componentes elétricos em máquinas-ferramentas CNC para conduzir as partes mecânicas da máquina ou para controlar os eixos de ferramenta da máquina com precisão.

Existem vários tipos controladores que habitualmente equipam os centros de maquinagem, independentemente do fabricante do centro de maquinagem. Os controladores mais utilizados são os designados FANUC, HEIDENHAIN, SIEMENS, FADAL e, no caso das máquinas do fabricante HAAS, um controlador próprio também da marca HAAS. A linguagem utilizada nestes controladores pode ser baseada no código CNC ISO ou em linguagens CNC desenvolvidas especificamente para os controladores ou adaptadas da linguagem de programação CNC ISO.



(a)



(b)

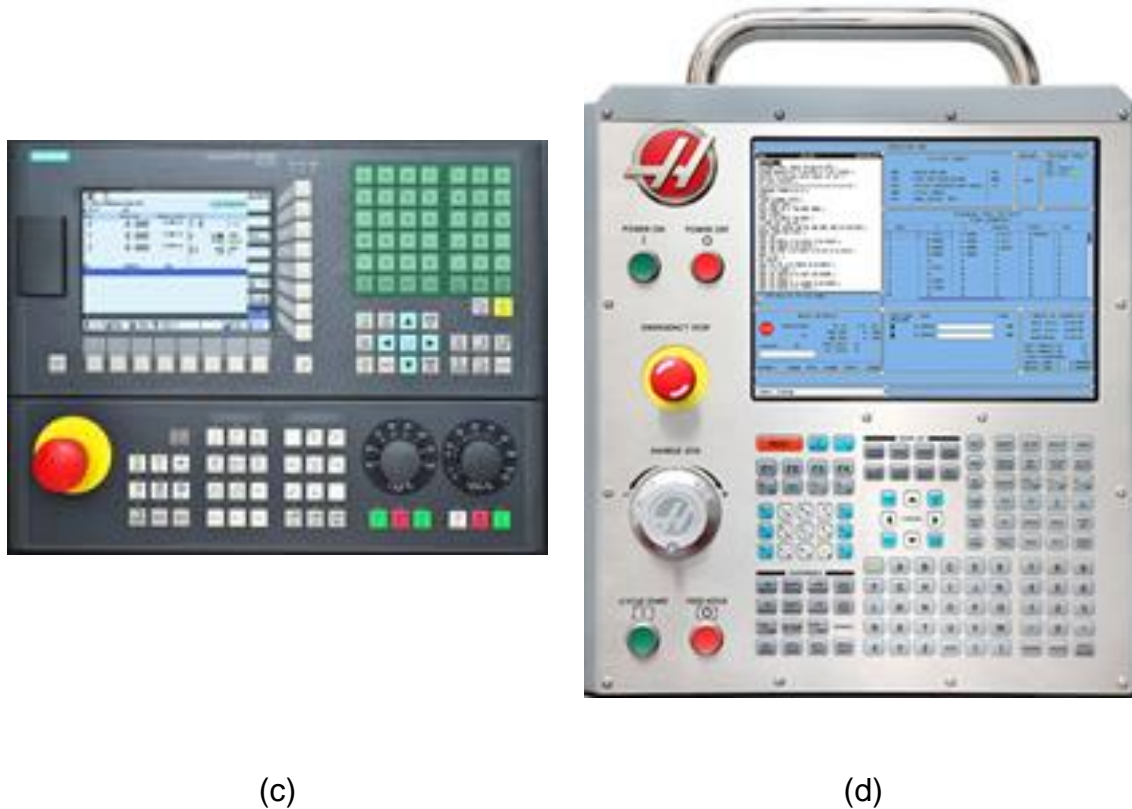


Figura 2.20- Exemplos de controladores de máquinas CNC: (a) Fanuc (helmancnc.com, 2015); (b) Heidenhain (mori, 2016); (c) Siemens (Siemens, 2016); (d) HAAS (HAAS, HAAS UMC-750SS, 2015);

No caso do equipamento HAAS UMC 750SS do ISEC, está equipado com o controlador apresentado na figura 2.20 (d), com memória RAM de 750Mb, a qual garante amplo espaço de memória para gravar programas assim como uma flash de memória que permite transferir ficheiros extensos através da porta USB para e da memória.

O controlador está ainda equipado com um Interface Ethernet (placa de rede). Esta opção fornece flexibilidade para gravar e transferir dados entre a máquina e a rede local. A placa Ethernet permite uma fácil transmissão de dados entre a máquina e uma rede ou um computador.

Capítulo 3

Sistema de Sondas Intuitivo Sem Fios

3.1 - Introdução

Os sistemas de sondas utilizados em máquinas-ferramenta CNC, são acessórios que tiram proveito das potencialidades do equipamento e têm como principal função ajudar o operador a realizar determinadas tarefas. Na maioria dos casos, as operações realizadas dizem respeito à medição de ferramentas e operações executadas na peça que está a ser trabalhada, tais como determinação do zero peça, alinhamento, medição e inspeção de coordenadas e dimensões.

Os operadores de máquinas-ferramenta têm beneficiado do uso de sondas desde os anos 1970 quando a Renishaw inventou o apalpador de contato em 1973, revolucionando as capacidades de medição, permitindo inclusivamente também utilizar estes acessórios para determinação de coordenadas dos produtos produzidos (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.

A aplicação industrial das sondas foi possível em 1980, quando a Renishaw introduziu as primeiras sondas projetados especificamente para aplicações de corte de metal.

Existem vários tipos de sondas disponíveis no mercado e das mais variadíssimas marcas. Os sensores podem transmitir as informações de vários tipos, do tipo de máquina e o seu sistema de funcionamento pode variar consoante a aplicação.

A utilização de sondas elimina a necessidade de fixações dispendiosas e ajuste manual com relógios comparadores. As sondas são montadas no fuso dos centros de maquinaria, nas mesas de trabalho e na torre dos tornos, proporcionando as seguintes vantagens:

- Redução dos tempos de máquina parada.
- Fixação automática, alinhamento da peça e preparação do eixo rotativo
- Eliminação dos erros de ajuste manual
- Redução do refugo
- Maior produtividade e flexibilidade do tamanho dos lotes

Enquanto a medição manual depende da habilidade do operador ou da transferência das peças para um equipamento de medição, o que nem sempre é prático, as sondas montadas nas árvores e mesas podem ser utilizados em medições durante a produção e inspeção inicial. Os benefícios da medição de inspeção incluem:

- Medição das peças durante a produção, com correção automática dos desvios
- Maior confiança durante a maquinaria sem presença de operadores
- Maquinagem adaptativa, proporcionando resposta de processo para minimizar variações
- Inspeção inicial com atualização automática dos desvios
- Menor tempo de máquina parada devido à espera dos resultados da inspeção inicial. (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.

3.2 - Princípio de Funcionamento do Sistema de Registo de Coordenadas

Na figura 3.1, é apresentado um exemplo de uma sonda de registo de coordenadas, na qual estão identificados os principais constituintes, estando neste caso a sonda montada no sistema de fixação cónico de acordo com a especificação das normas DIN. Estas sondas são por vezes designadas por apalpadores de contacto (Touch

Proves), porque estes sistemas podem usar interruptores que são acionados por contato entre a ponteira da sonda (stylus) e o componente a ser medido.



Figura 3.1- Exemplo de uma sonda de contacto (HEIDENHAIN, 2015)

Conforme ilustra a figura 3.1, quando ocorre o contacto da ponteira da sonda com a peça montada na mesa da máquina, a sonda envia um sinal para o controlador. Nesse instante, automaticamente o controlador da máquina memoriza e regista a posição identificada pelos encoders dos diferentes eixos.

O envio do sinal da sonda para o controlador pode ser por cabo elétrico ou por um sistema sem fios (wireless) tal como o exemplo apresentado na figura 3.2. (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.

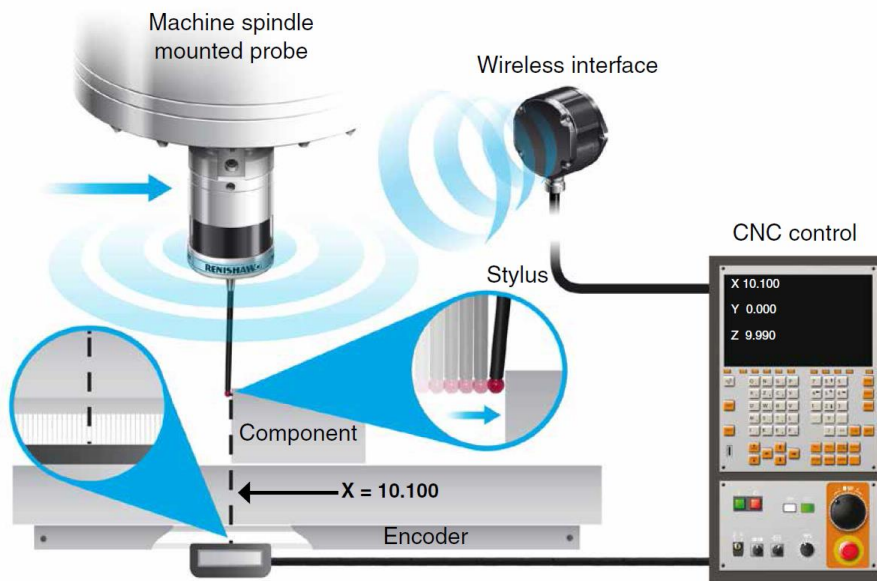


Figura 3.2- Representação do Princípio de Funcionamento da sonda (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)

Com a movimentação da sonda de modo a ocorrer o contacto com diferentes pontos da geometria do componente, é possível descrever as formas geométricas. Assim, tal como ilustra a figura 3.3, o número mínimo de pontos para descrever a geometria, depende da forma a caracterizar. Ou seja, depende do número de graus de liberdade. (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.

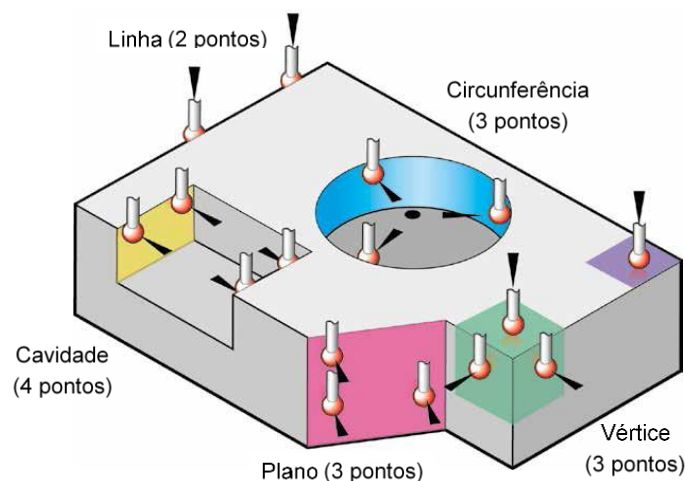


Figura 3.3- Número de pontos que descrevem as formas geométricas (Renishaw, Probing systems for CNC machine tools, 2014)

3.3 - Sonda de Contacto

Designa-se de sonda de contacto (Touch Probe) o apalpador que é montado na árvore do centro de maquinagem e que realiza operações sobre o componente montado na mesa de trabalho. A operação mais usual da sonda de contacto é a determinação do zero-peça. Além desta, outras funções podem ser executadas, tais como alinhamento com da peça com os eixos da máquina, controlo dimensional, entre outras. (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.

3.3.1 Sonda de funcionamento por Resistência Cinemática

Com provas dadas ao longo de quatro décadas, as sondas com este princípio de funcionamento tem sido a principal escolha para a maioria dos fabricantes de máquinas e utilizadores finais, de modo a garantir precisão e repetibilidade.

A capacidade do mecanismo da sonda para se reposicionar após contacto, tem como deslocamento mínimo 1 μm , o qual é fundamental para a repetibilidade da sonda e precisão dimensional. Este modo de funcionamento permite ter uma fiabilidade no contacto da sonda com a peça, superior a 1 milhão de ciclos.

Esta tecnologia caracteriza-se pela construção de sondas de dimensão compacta. Este tipo de sonda encontra-se ligada a três hastes igualmente espaçadas, apoiada cada haste em 2 bolas de carboneto de tungstênio, fornecendo seis pontos de contato cinemático, conforme encontra-se ilustrado na figura 3.4. (Renishaw, Probing systems for CNC machine tools, 2014), Adaptado.

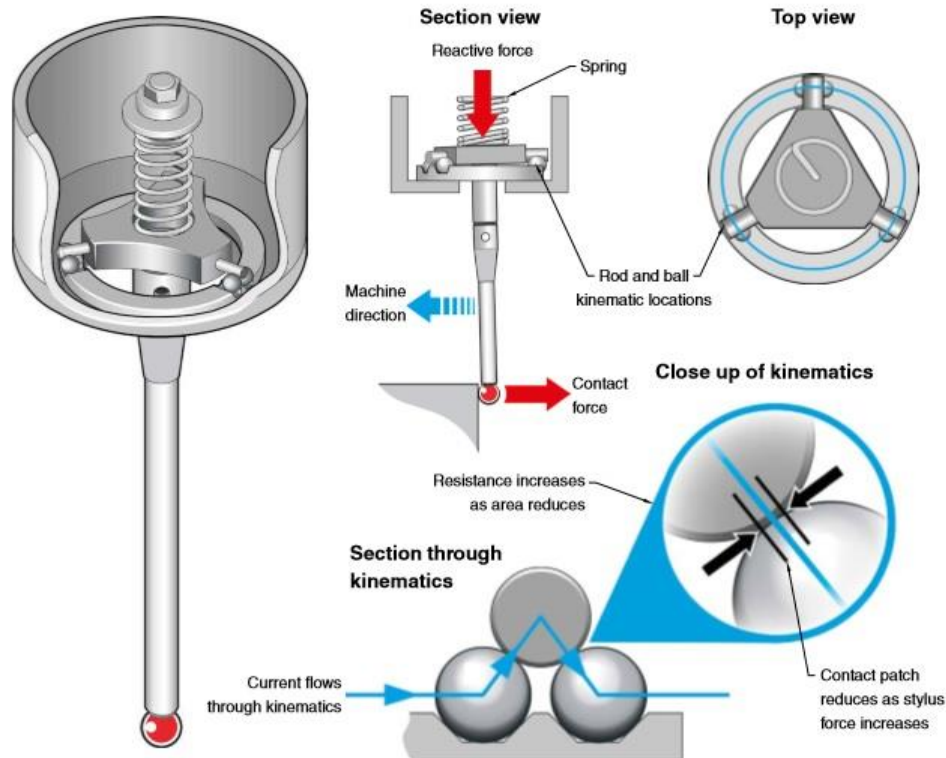


Figura 3.4- Princípio de funcionamento da sonda de resistência cinemática (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)

Um circuito elétrico é formada pelos pontos de contato, existindo uma mola que mantêm a ponteira na posição vertical e que oferece uma força de resistência bem definida ao deslocamento da ponteira. Esta mola possibilita também que a ponteira da sonda seja recolocada na posição vertical após cessar o contacto entre a ponteira e a peça, e desde que exista um espaço livre de pelo menos 1 μm .

Ao ocorrer contacto da ponteira e uma peça, é transmitida um esforço à mola o que leva a alterar-se o contacto cinemático entre as bolas de tungstênio e a haste que se encontra apoiada sobre estas. Deste modo, à medida que é reduzida a área de contacto entre as esferas e a haste, aumenta a resistência do circuito elétrico que se encontra estabelecido. Quando é atingido um valor de resistência elétrica pré-definido, é disparado um sinal para o controlador que, tal com explicado anteriormente, leva a que sejam registadas no controlador as coordenadas dos diferentes eixos.

A figura 3.5 ilustra as fases por que passa a ponteira da sonda até ser gerado o sinal que leva ao registo das coordenadas de posição. (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.

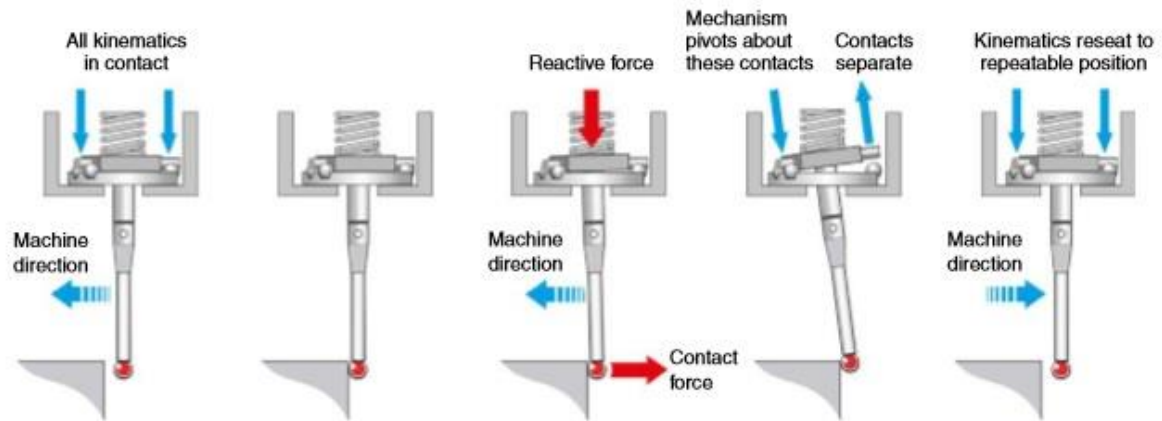


Figura 3.5- Etapas por que passa a ponteira durante a aproximação e contacto com uma peça (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)

3.3.2 Sonda de funcionamento por Extensometria

Este tipo de sonda assenta também num princípio de funcionamento por resistência cinemática. Contudo, o registo de variação de tensão num circuito eléctrico é efetuado pela combinação de diferentes extensómetros, os quais melhoram as capacidades desta sonda. Com este tipo de funcionamento, a precisão e a repetibilidade são na ordem dos $0,25\ \mu\text{m}$, sendo por isso indicado para a calibração das máquinas-ferramenta e trabalhos complexos em máquinas multi-eixos (figura 3.6). Este modo de funcionamento permite ter uma fiabilidade no contacto da sonda com a peça, superior a 10 milhões de ciclos. (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.

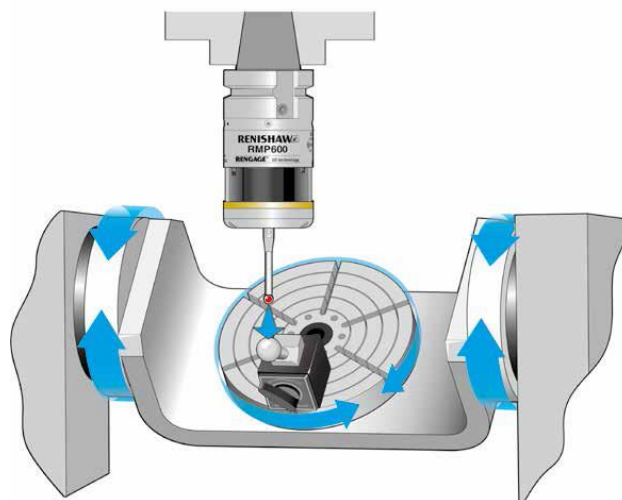


Figura 3.6- Exemplo de utilização de uma sonda num trabalho de calibração realizado numa máquina de 5 eixos (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)

As sondas baseadas neste tipo de funcionamento incorporam extensómetros em silício que registam de forma fiável as variações de tensão. Estes extensómetros estão posicionados sobre as 3 hastes da ponteira, de modo que todas as alterações de tensão sejam registadas e integradas num só sinal (figura 3.7).

Ao ser atingido um limiar de tensão em qualquer direção, é disparado um sinal que leva a que sejam registadas no controlador as coordenadas dos diferentes eixos. Estas sondas são acionadas por forças menores do que as sondas com funcionamento cinemático exclusivo e por isso apresentam maior precisão.

Utilizando esta tecnologia, é possível eliminar até 90% de erros induzidos pelo fenómeno designado por “lobing”, o qual pode ser descrito pela flexão da ponteira quando entra em contacto com uma peça. Por este motivo, estas sondas permitem que sejam incorporadas ponteiras com comprimentos até 200 mm, enquanto as ponteiras que equipam as sondas com hastes assentes em esferas de carboneto de tungsténio, não devem ir além de 100 mm de comprimento. (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.

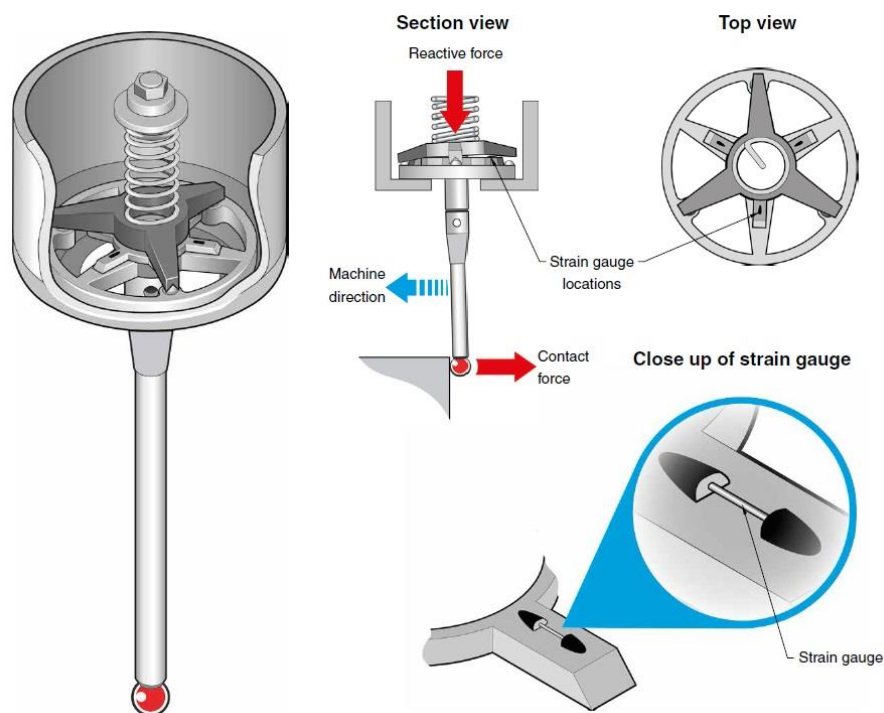


Figura 3.7- Esquema de funcionamento da sonda com funcionamento por extensometria (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)

3.3.3 Ponteira de ligação

A ponteira da sonda é o elemento que faz a ligação efetiva com a peça. Na sua extremidade apresenta um elemento que faz o contacto efetivo com o componente a inspecionar. Embora este elemento possa assumir diferentes formas geométricas, o mais usual é ser uma esfera, tal com se encontra representado nas diferentes ponteiras apresentadas na figura 3.8. Os materiais mais utilizados nos elementos de contacto são ruby, ou materiais cerâmicos tais como nitretos de silício, zircónia ou carboneto de tungsténio. Por sua vez, as hastes das ponteiras podem ser fabricadas em titânio, carboneto de tungstênio, aço inoxidável, fibra de carbono, entre outros materiais. (Renishaw, Precision styli, 2014), Adaptado.



Figura 3.8- Exemplos de diferentes modelos de ponteiras de ligação à sonda (HEIDENHAIN, 2015)

O desempenho da medição é bastante dependente da capacidade da ponteira aceder e manter a precisão no ponto de contato. Por este motivo, é essencial respeitar um conjunto de regras. Nomeadamente; utilizar uma ponteira o mais curta e estável possível, com elevada rigidez e baixa flexão. (Renishaw, Precision styli, 2014), Adaptado.

3.4 - Sonda de Medição de Ferramentas

No que diz respeito aos dispositivos utilizados na medição de ferramentas, estes estão normalmente fixos à mesa da máquina, podendo utilizar métodos de medição por contacto fig.3.9 (a) ou sem contacto, laser fig. 3.9 (b). (Renishaw, Precision styli, 2014), Adaptado.

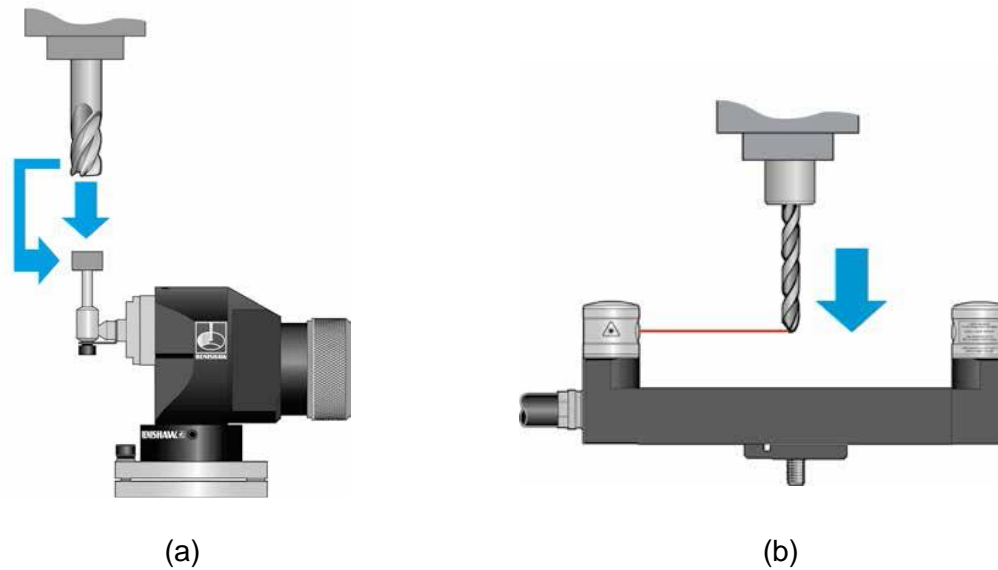


Figura 3.9- Sistema de medição de ferramentas: (a) por contacto; (b) sem contacto, laser (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)

Os sistemas de medição por contacto utilizam usualmente uma ponteira para fazer disparar um sinal de registo de coordenadas, sendo designados por sistemas de apalpação cinemáticos. Por seu turno, os sistemas de medição sem contacto, utilizam um feixe ótico (laser) que quando interrompido pela ferramenta, efetua o registo das coordenadas.

O comprimento e o raio ou diâmetro da ferramenta são os dados mais usuais a serem medidos. No entanto, alguns sistemas de medição de ferramentas utilizam tecnologias que permitem também averiguar outros dados da ferramenta, tais como o perfil radial e longitudinal, o desgaste do gume de corte e a quebra da ferramenta figura 3.10. (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.

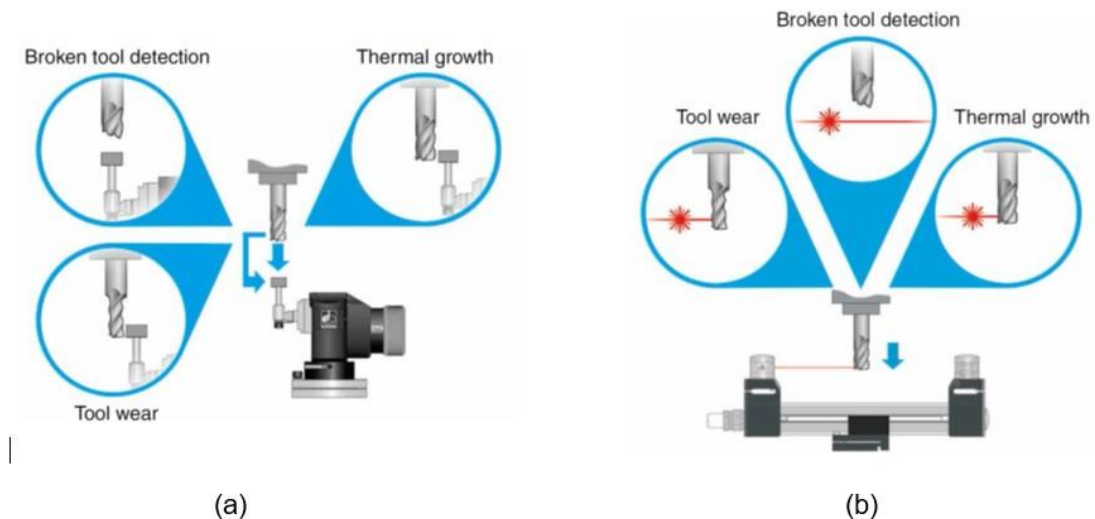


Figura 3.10- Avaliação da ferramenta num sistema de medição por contacto (a) e sem contacto, laser (b)
(Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)

3.4.1 Funcionamento por Resistência Cinemática

Estas sondas apresentam o mesmo princípio de funcionamento explicado para as sondas de contacto utilizadas na determinação do zero-peça dos blocos a maquinar. Este tipo de sonda encontra-se ligada a três hastes igualmente espaçadas, apoiada cada haste em 2 bolas de carboneto de tungstênio, fornecendo seis pontos de contato cinemático, conforme encontra-se ilustrado nas figuras 3.11 e figura 3.12.

Um circuito elétrico é formada pelos pontos de contato, existindo uma mola que mantém a ponteira na posição e que oferece uma força de resistência bem definida ao deslocamento. Esta mola possibilita também que a ponteira da sonda seja recolocada na posição após cessar o contacto entre a ponteira e a ferramenta e desde que exista um espaço livre de pelo menos 1 μm . (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.

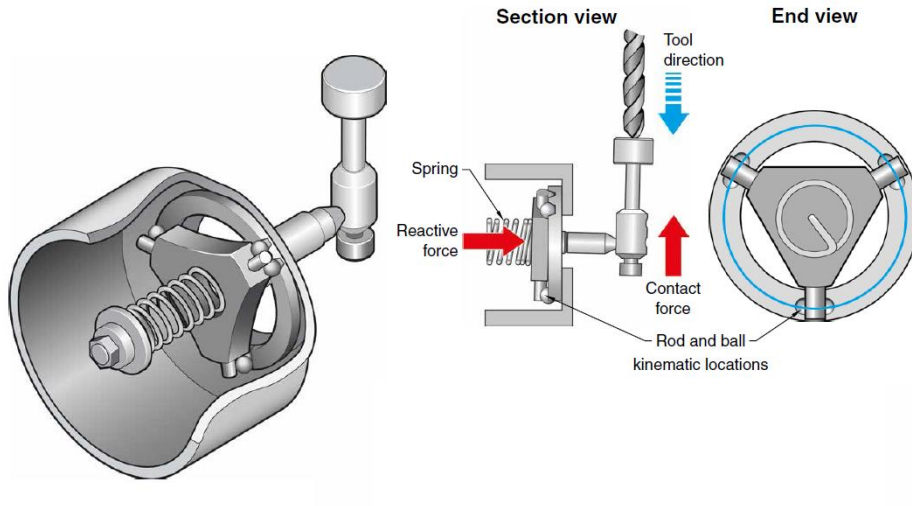


Figura 3.11- Princípio de funcionamento da sonda de medição de ferramentas por resistência cinemática (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)

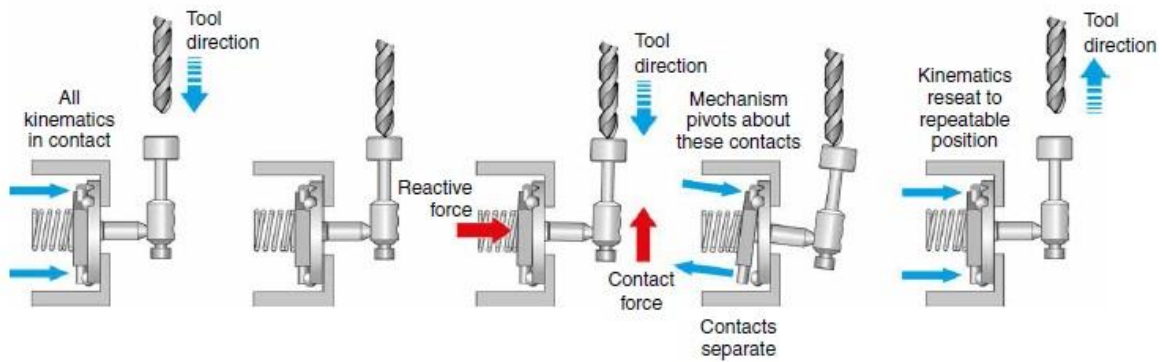


Figura 3.12- Etapas por que passa a ponteira da sonda de medição no movimento de aproximação e contacto da ferramenta (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)

3.4.2 Funcionamento por Feixe Laser

Os sistemas de medição de ferramentas sem contacto utilizam um feixe de luz laser, imitado de um transmissor e captado num recetor. Quando a ferramenta interrompe parcialmente o feixe laser, verifica-se uma redução de luz captada no recetor, que a partir de determinado limiar de intensidade é gerado um sinal para o controlador que permite determinar a dimensão da ferramenta (figura 3.12), (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.



Figura 3.13- Esquema de funcionamento de um sistema laser para medir ferramentas (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)

Estes sistemas podem ser usados para detetar ferramentas quebradas, quando a ferramenta move-se rapidamente para uma posição onde deve intersectar o feixe de laser. Caso o feixe alcance o recetor, o sistema interpreta esta informação como uma ferramenta quebrada.

No transmissor do sistema a laser da Renishaw é definida a forma e o tamanho do feixe, o qual é ligeiramente divergente ao longo do seu comprimento. Um orifício no interior do recetor regula a luz que atinge o detetor ótico, o qual colima o feixe de forma eficaz (figura 3.14). O recetor mede os níveis de luz e quando ocorre uma redução de 50% é gerado um sinal para o controlador. (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.

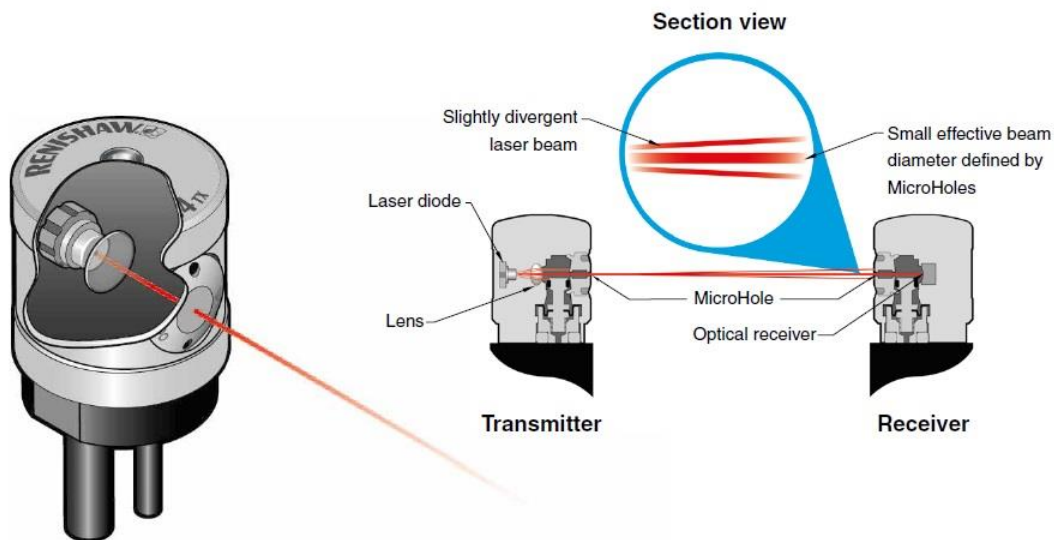


Figura 3.14- Princípio de funcionamento de um sistema laser para medir ferramentas (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)

3.5 - Sistema de Transmissão da Informação

O envio do sinal para o controlador da máquina a partir da sonda de contacto ou do sistema de medição de ferramentas pode ser feito de dois modos distintos: Por cabo ou sem fios. Em qualquer dos casos, a comunicação é bidirecional, sendo feita por intermédio de um interface de transmissão que converte o sinal da sonda para transmissão ao controle de máquina-ferramenta, conforme ilustra a figura 3.15 para o caso da transmissão de sinal com a sonda de contacto. (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.

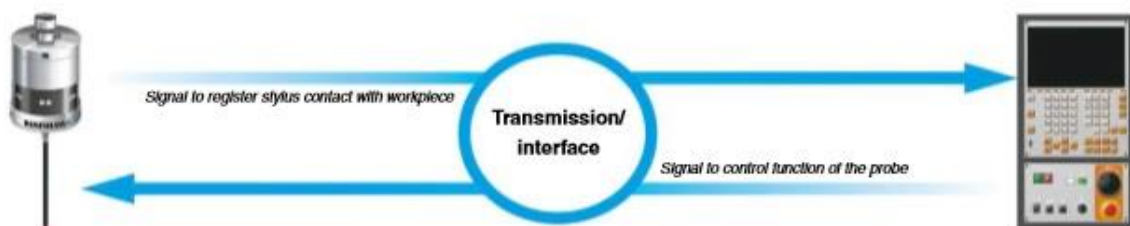


Figura 3.15- Princípio da Transmissão de Informação para o controlador CNC (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)

3.5.1 Transmissão por cabo

O sistema de transmissão de informação por cabo encontra-se ilustrado na figura 3.16, é a forma mais simples de transmissão, sendo ideais para máquinas onde a sonda é colocada manualmente no fuso. (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.

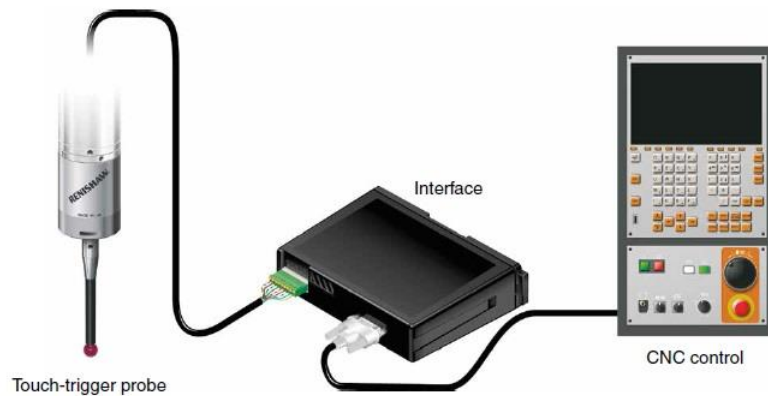


Figura 3.16- Transmissão de Informação por Cabo (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)

3.5.2 Transmissão sem fios

Os sistemas de sondas intuitivos sem fios, são usualmente designados simplesmente por sondas WIPS, derivando a sua designação da abreviatura inglesa (Wireless Intuitive Probing System – WIPS).

Estes sistemas de transmissão poder ser realizados por ondas de rádio ou por infravermelhos (meio ótico).

A transmissão por ondas rádio é utilizado maioritariamente em máquinas de grande dimensão, sendo esta transmissão adequada para distâncias até 15 metros, cujo tempo de transmissão do sinal é de aproximadamente 10 ms.

A transmissão por infravermelhos é ideal para máquinas compactas com a área de trabalho fechada. Graças à capacidade de reflexão do sinal, o sinal é recebido mesmo em áreas ocultas (3.17). A transmissão por infravermelhos é adequada para distâncias até 7 metros, cujo tempo de transmissão do sinal é de aproximadamente de 0,2 m/s, o que permite resultados de medição muito fiáveis, independentemente da velocidade da sonda.(HEIDENHAIN, 2015), Adaptado

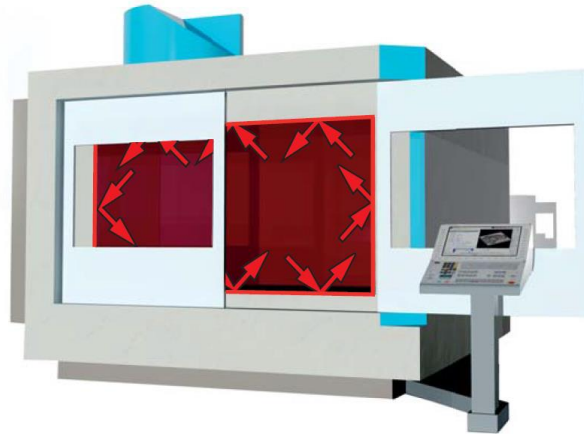


Figura 3.17- Reflexão do sinal de infravermelhos numa máquina-ferramenta com área de trabalho fechada (HEIDENHAIN, 2015)

Na figura 3.18 está ilustrado o sistema de transmissão ótico, por infravermelhos. A sonda recebe sinais de controlo da máquina e transmite os sinais de estado. Existem dois modos ativos, "espera" e "operacional". Em modo de espera, a sonda periodicamente transmite e recebe um sinal, à espera para mudar para o modo de operação. No modo de funcionamento, a sonda transmite informações para o recetor/interface, incluindo o estado da bateria. (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.



Figura 3.18- Sistema transmissão por infravermelhos (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014)

A transmissão ótica está modulada para rejeitar a interferência de luz de outras fontes e garantir comunicações confiáveis.

As interfaces óticas podem fornecer indicadores visuais e/ou sonoros que podem informar o operador sobre o estado da sonda, alimentação do sistema, estado da bateria e diagnóstico de erros.

No equipamento HAAS UMC 750SS do ISEC a sonda de contacto e o sistema de medição de ferramentas são da marca Renishaw, com transmissão de sinal ótico, por infravermelhos.

A sonda é do modelo OMP 40-2 (figura 3.19 (a)), cujas principais características são as seguintes:

- Aplicação em inspeção de peças e preparação de trabalho em centros de maquinagem pequenos ou médios e máquinas multitarefas pequenas;
- Sonda de contacto 3D compacta, com diâmetro 40 mm e comprimento de 50 mm, resistente a choques e vibrações;
- Transmissão ótica do sinal, por infravermelhos;
- Repetibilidade de 1 μm ;
- Transmissão ótica do sinal por infravermelhos a 360°, com alcance até 5 metros;
- Força de ativação da ponta: XY: 0,5 N; Z: 5,85 N;
- Rotação máxima do fuso: 1000 rpm

O sistema de medição de ferramentas é do modelo OTS (figura 3.19 (b)), cujas principais características são as seguintes:

- Aplicação na medição do comprimento e diâmetros das ferramentas em centros de maquinagem pequenos ou de grande dimensão;
- Transmissão ótica do sinal, por infravermelhos;
- Resistente a choques, interferências e falsas determinações de dimensões da ferramenta;
- Precisão de 5 μm é facilmente obtida na determinação das dimensões das ferramentas.

O recetor/interface encontra-se representado na figura 3.19 (c), sendo do modelo OMM-2H. (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014), Adaptado.



Figura 3.19- Sistemas Renishaw com transmissão do sinal por infravermelhos, incorporados no equipamento HAAS UMC 750SS: (a) Sonda de contacto OMP 40-2; (b) Sistema de medição de ferramentas OTS; (c) Recetor/Interface OMI-2H. (Renishaw, Probing Systems for CNC Machine Tools, 2014),

3.6 - Demonstração de Operações Realizadas com o Sistema de Sondas

De seguida será apresentada a utilização prática do sistema de sondas intuitivo sem fios OMP 40-2 que equipa o centro de maquinagem HAAS UMC 750SS. Os exemplos a seguir apresentados exploram as opções disponíveis no controlador para determinar o zero-peça e efetuar a medição de ferramentas.

3.6.1 Determinação do zero-peça

As opções disponíveis para determinar o zero-peça estão relacionadas com a geometria do bloco onde será determinado o zero-peça. Em seguida serão detalhadas as opções de determinação do zero-peça, com explicação de como colocar os valores e compreender as diferenças entre os diversos parâmetros.

Opção 1 – BORE

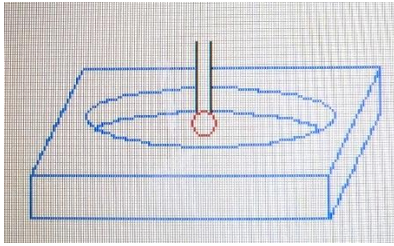


Figura 3.20- Bore

Esta opção deve ser utilizada para determinar o zero-peça no centro de uma cavidade circular.

WORK PROBE INPUTS:

- Diâmetro aproximado
- X ajustado
- Y ajustado

- Colocar a sonda o mais próximo possível do centro da circunferência e abaixo da superfície da peça.
- Inserir no controlador o valor aproximado do diâmetro e de seguida iniciar o ciclo.

Durante a execução do ciclo, a sonda desloca-se na horizontal, para a esquerda e para a direita e, na horizontal, para cima e para baixo, até a ponteira da sonda efetuar o contacto com a parede da caixa circular. No final da operação, a sonda desloca-se para o centro da circunferência, local definido com zero-peça.

As opções de X e Y ajustado permitem que o valor do eixo X e Y sejam diferentes dos valores do centro da circunferência. Estes valores vão somar ou subtrair em relação ao valor determinado para o centro da circunferência.

Opção 2 – BOSS

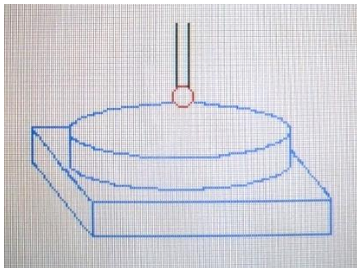


Figura 3.21- Boss

Esta opção deve ser utilizada para determinar o zero-peça no centro de uma saliência circular.

WORK PROBE INPUTS:

- Diâmetro aproximado
- Distância incremental em Z
- X ajustado
- Y ajustado

- Colocar a sonda o mais próximo possível do centro da circunferência e acima da superfície da peça.
- Inserir no controlador o valor aproximado do diâmetro e o valor aproximado da altura à qual o sensor se encontra em relação à superfície.

Durante a execução do ciclo, a sonda desloca-se na horizontal, para a esquerda e para a direita e, na horizontal, para cima e para baixo, até a ponteira da sonda efetuar o contacto com a parede da saliência circular.

No final, a sonda desloca-se para o centro da circunferência. As opções do X e Y ajustado permitem que o valor do eixo X e Y sejam diferentes dos valores do centro da circunferência, sendo estes valores somados ou subtraídos em relação ao centro da circunferência.

Opção 3 – RECTANGLE POCKET

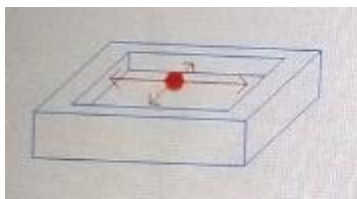


Figura 3.22- Rectangle Pocker

Esta opção deve ser utilizada para determinar o zero-peça no centro de uma caixa retangular.

WORK PROBE INPUTS:

- Comprimento X
- Largura Y
- X ajustado
- Y ajustado

- Colocar a sonda o mais próximo possível do centro da retângulo e abaixo da superfície da peça.

- Inserir no controlador o valor aproximado do comprimento em X e largura em Y.

Durante a execução do ciclo, a sonda desloca-se na horizontal, para a esquerda e para a direita e, na horizontal, para cima e para baixo, até a ponteira da sonda efetuar o contacto com a parede da caixa retangular.

As opções do X e Y ajustado permitem que o valor do eixo X e Y sejam diferentes dos valores do centro do retângulo, estes valores vão somar ou subtrair em relação ao valor do centro da caixa retangular.

Opção 4 – RECTANGLE BLOCK

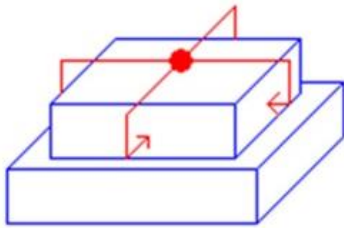


Figura 3.23- Rectangle Block

Esta opção deve ser utilizada para determinar o zero-peça no centro de numa saliência retangular.

WORK PROBE INPUTS:

- Comprimento X
- Largura Y
- Distância incremental em z
- X ajustado
- Y ajustado

- Colocar a sonda o mais próximo possível do centro da retângulo e acima da superfície da peça.
- Inserir no controlador o valor aproximado do comprimento em x, largura em y e o valor aproximado da altura à qual o sensor se encontra em relação à superfície.

Durante a execução do ciclo, a sonda desloca-se na horizontal, para a esquerda e para a direita e, na horizontal, para cima e para baixo, até a ponteira da sonda efetuar o contacto com a parede da saliência circular.

As opções do X e Y ajustado permitem que o valor do eixo X e Y sejam diferentes dos valores do centro do retângulo, estes valores vão somar ou subtrair em relação ao valor do centro do retângulo.

Opção 5 – WEB X AXIS

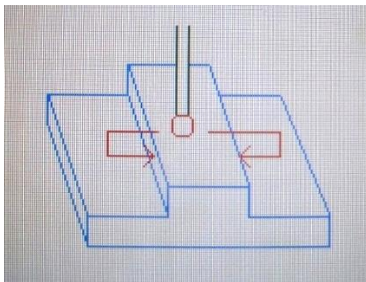


Figura 3.24- Web X Axis

Esta opção deve ser utilizada para determinar a coordenada do ponto médio no eixo X numa saliência retangular.

WORK PROBE INPUTS:

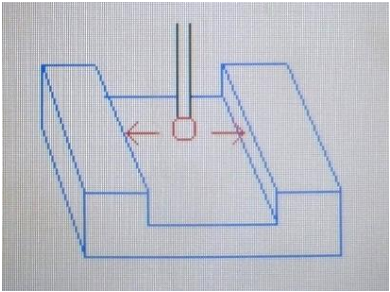
- Largura X
- Distância incremental em Z
- X ajustado

- Colocar a sonda o mais próximo possível do centro no eixo X e acima da superfície da peça.
- Inserir no controlador o valor aproximado da largura em x, e o valor aproximado da altura à qual o sensor se encontra em relação à superfície.

Durante a execução do ciclo, a sonda desloca-se na horizontal, para a esquerda e para a direita, até a ponteira da sonda efetuar o contacto com a parede da saliência retangular.

A opção do X ajustado permite que o valor do eixo X seja diferente do valor do centro do retângulo. Este valor vai somar ou subtrair em relação ao valor do centro do retângulo.

Opção 6 – POCKET X AXIS

 <p>Figura 3.25- Pocket X Axis</p>	<p>Esta opção deve ser utilizada para determinar a coordenada do ponto médio no eixo X numa cavidade retangular.</p> <p>WORK PROBE INPUTS:</p> <ul style="list-style-type: none">- Largura X- X ajustado
--	---

- Colocar a sonda o mais próximo possível do centro no eixo X e abaixo da superfície da peça.
- Inserir no controlador o valor aproximado da largura em x.

Durante a execução do ciclo, a sonda desloca-se na horizontal, para a esquerda e para a direita, até a ponteira da sonda efetuar o contacto com a parede da cavidade retangular.

A opção do x ajustado permite que o valor do eixo x seja diferente do valor do centro do retângulo. Este valor vai somar ou subtrair em relação ao valor do centro do retângulo.

Opção 7 – WEB Y AXIS

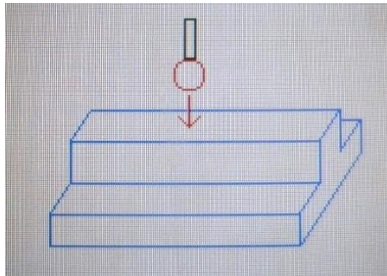


Figura 3.26- Web Y Axis

Esta opção deve ser utilizada para determinar a coordenada do ponto médio no eixo Y numa saliência retangular.

WORK PROBE INPUTS:

- Comprimento Y
- Distância incremental em Z
- Y ajustado

- Colocar a sonda o mais próximo possível do centro no eixo Y e acima da superfície da peça.

- Inserir no controlador o valor aproximado do comprimento em Y, e o valor aproximado da altura à qual o sensor se encontra em relação à superfície.

Durante a execução do ciclo, a sonda desloca-se na horizontal, para a esquerda e para a direita, até a ponteira da sonda efetuar o contacto com a parede da saliência retangular.

A opção do Y ajustado permite que o valor do eixo Y seja diferente do valor do centro do retângulo. Este valor vai somar ou subtrair em relação ao valor do centro do retângulo.

Ponto 8 – POCKET Y AXIS

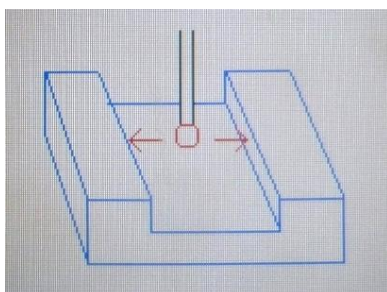


Figura 3.27- Pocket Y Axis

Esta opção deve ser utilizada para determinar a coordenada do ponto médio no eixo Y numa cavidade retangular.

WORK PROBE INPUTS:

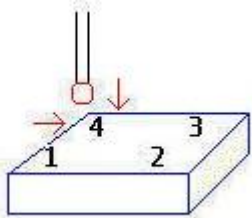
- Comprimento Y
- Y ajustado

- Colocar a sonda o mais próximo possível do centro no eixo Y e abaixo da superfície da peça.
- Inserir no controlador o valor aproximado do comprimento em Y.

Durante a execução do ciclo, a sonda desloca-se na horizontal, para cima e para baixo, até a ponteira da sonda efetuar o contacto com a parede da cavidade retangular.

A opção do Y ajustado permite que o valor do eixo Y seja diferente do valor do centro do retângulo. Este valor vai somar ou subtrair em relação ao valor do centro do retângulo.

Opção 9 – OUTSIDE CORNER

 <p>Figura 3.28- Outside Corner</p>	<p>Esta opção deve ser utilizada para determinar o zero-peça num canto exterior.</p> <p>WORK PROBE INPUTS:</p> <ul style="list-style-type: none">- Indicar nº do canto selecionado- Distância incremental em X- Distância incremental em Y- Distância incremental em Z
---	---

- Colocar a sonda próxima de um dos 4 cantos exteriores da geometria e acima da superfície da peça.
- Inserir no controlador o número do canto a definir como zero-peça.
- Inserir no controlador o valor aproximado da distância em x e da distância em Y que a sonda se desloca para o lado exterior do canto selecionado, para efetuar o contacto com a parede do canto selecionado.
- Inserir no controlador o valor aproximado da altura em Z que a sonda se desloca para efetuar o contacto com a parede do canto selecionado.

Durante a execução do ciclo, para cada um dos eixos X e Y, a sonda desloca-se para o lado exterior do canto definido e de seguida desloca-se segundo o eixo Z. De seguida, a sonda aproxima-se até efetuar o contacto com a parede do canto selecionado.

Opção 10 – INNER CORNER



Figura 3.29- Inner Corner

Esta opção deve ser utilizada para determinar o zero-peça num canto interior.

WORK PROBE INPUTS:

- Indicar nº do canto selecionado
- Distância incremental em X
- Distância incremental em Y
- Distância incremental em Z

- Colocar a sonda próxima de um dos 4 cantos interior da geometria e acima da superfície da peça.
- Inserir no controlador o número do canto a definir como zero-peça.
- Inserir no controlador o valor aproximado da distância em x e da distância em Y que a sonda se desloca para o lado exterior do canto selecionado, para efetuar o contacto com a parede do canto selecionado.
- Inserir no controlador o valor aproximado da altura em Z que a sonda se desloca para efetuar o contacto com a parede do canto selecionado.

Durante a execução do ciclo, para cada um dos eixos X e Y, a sonda desloca-se para o lado exterior do canto definido e de seguida desloca-se segundo o eixo Z. De seguida, a sonda aproxima-se até efetuar o contacto com a parede do canto selecionado.

Opção 11 – SINGLE SURFACE

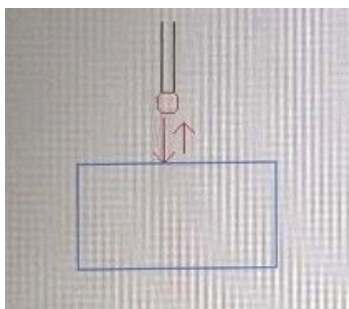


Figura 3.30- Single Surface

Esta opção deve ser utilizada para determinar o zero-peça segundo o eixo Z.

WORK PROBE INPUTS:

- Indicar nº do canto selecionado
- Distância incremental em X
- Distância incremental em Y
- Distância incremental em Z

- Colocar a sonda acima da superfície que será definida para o zero-peça em Z.

- Inserir no controlador a distância aproximada a que se encontra a sonda da superfície.

Durante a execução do ciclo, a sonda aproxima-se até efetuar o contacto com a superfície.

3.6.2 Medição de Ferramentas

Em seguida será apresentado o procedimento de medição do comprimento e diâmetro das ferramentas, recorrendo ao sistema de medição de ferramentas OTS que equipa o centro de maquinagem HAAS UMC 750 SS do ISEC.

Em primeiro lugar é necessário ter em conta o tipo de ferramenta em causa.

Na figura 3.31, ilustra-se as 7 variedades de geometria de ferramentas que se encontram definidos no controlador, devendo a ferramenta a medir ser classificada numa destas 7 variedades.



Figura 3.31- Variedades de ferramentas definidas no controlador do centro de maquinagem (HAAS, Manual do Operador, 2014)

Para efetuar o procedimento de medição de ferramentas é necessário em primeiro lugar compreender a tabela de offsets presente no controlador e inserir a informação necessária. Esta tabela apresenta 3 áreas distintas designadas por “Tool Offset”, “Tool Info” e “Probing”.

Tool Offset: Espaço onde no final do procedimento são introduzidos automaticamente os valores de comprimento e diâmetro da ferramenta, conforme ilustra a tabela 3.1, determinados durante a medição automática.

Tabela 3.1- Tabela “Tool Offset”

TOOL OFFSET		
	H Lenght	D (DIAMETER)
POSITION	Geometry	geometry

Info: Espaço onde são introduzidos pelo operador valores informativos da ferramenta, conforme ilustra a tabela 3.2.

Tabela 3.2- Tabela “Tool Info

TOOL INFO				
	ACTUAL	TOOL	TOOL	TOOL
FLUTES	DIAMETER	TYPE	POCKET	CATEGORY

Flutes: Nº de gumes de corte da ferramenta

Type: Variedade da ferramenta conforme, figura 3.31.

- Tipo 1 – Drill (Broca);
- Tipo 2 – Tap (macho de Roscar);
- Tipo 3 – Shell Mill (Roca);
- Tipo 4 – End Mill (Fresa de Topo Plano);
- Tipo 5 – Center Mill (Fresa de Pontear);
- Tipo 6 – Ball Nose (Fresa de Topo esférico);
- Tipo 7 – Probe (Sonda WIPS de medição do zero-peça).

Probing: Espaço onde antes de se iniciar o procedimento automático de medição de ferramentas deve ser introduzido um conjunto de dados, conforme ilustra a tabela 3.3, de modo a auxiliar a execução do procedimento.

Tabela 3.3- Tabela "Probing"

PROBING				
APPROXIMATE LENGHT	APPROXIMATE DIAMETER	EDGE MEASURE HEIGHT	TOOL TOLERANCE	PROBE TYPE

Aproximate Lenght: Comprimento aproximado da ferramenta, o qual deve ser medido com uma régua, conforme ilustra a figura 3.32.

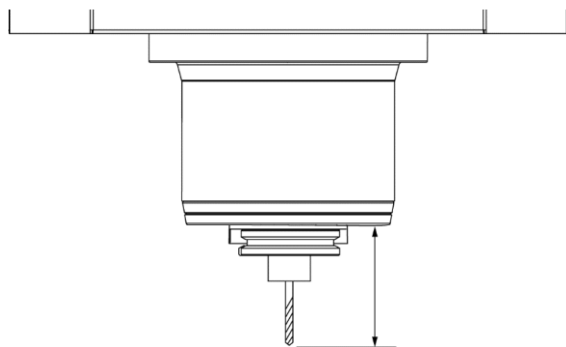


Figura 3.32- Modo de determinação do comprimento aproximado da ferramenta (HAAS, Manual do Operador , 2014)

Aproximate Diameter: Diâmetro aproximado da ferramenta.

Edge Measure Height: Altura do gume de corte.

Probe Type: Operações realizadas durante a execução do ciclo (0, 1, 2 ou 3).

Opção 0 – A operação de medição não será executada)

Opção 1 – Medição do comprimento da ferramenta, executado com a ferramenta com rotação.

Opção 2 – Medição do comprimento da ferramenta, executado com a ferramenta sem rotação.

Opção 3 – Medição do comprimento e diâmetro da ferramenta, executado com a ferramenta com rotação.

Capítulo 4

Implementação do Sistema de Medição de Vibrações

4.1 - Introdução

A vibração pode ser entendida com um movimento oscilatório, em torno de um ponto de referência. Este movimento oscilatório, que é a resultante de uma força ou de várias forças, pode ser provocado ou pela transferência de energia ou pelo armazenamento de energia nos objetos. Sendo assim, pode-se dizer que a vibração está diretamente relacionada com a aceleração a que um determinado objeto está sujeito, uma vez que qualquer objeto que está em constante movimento está obrigatoriamente a vibrar.

O uso de vibrações na manutenção preventiva é amplamente conhecida, sendo em muitos casos a principal técnica usada na maioria dos programas de gestão de manutenção. A medição das vibrações podem ser feitas por diversas razões ou porque são um fenómeno indesejável que dá origem a ruídos, ou porque provoca fadiga mecânica, sendo por isso a principal causa da falha mecânica dos componentes.

Neste trabalho pretendeu-se estar as vibrações não no aspeto que se referiu anteriormente, mas sim tentar quantificar qual era a vibração que era induzida durante o processo de fresagem de um bloco paralelepipedico de Inox Duplex e qual seria a influência que a vibração teria no processo produtivo.

4.2 - Parâmetros das Vibrações

Durante muito tempo o processamento de sinais foi realizado exclusivamente por sistemas analógicos, tais como resistores, indutores, transístores, entre outros. Este tipo de processamento era bastante limitado em eficiência e aplicações. O processamento digital de sinais permitiu ampliar o campo de aplicação e melhorar a sua eficiência. Atualmente, o processamento digital de sinais permite reduzir a suscetibilidade ao ruído, tempo de desenvolvimento, custo, consumo de potência, tamanho e peso dos equipamentos. Para fazer a análise dos sinais de vibração e tendo por base as características da mesma, é necessário compreender alguns conceitos fundamentais para a compreensão do tema em estudo e sua análise (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014):

- **Pico:** O valor do pico indica o nível máximo pontual, não tendo em conta a evolução temporal da onda.
- **Pico-a-pico:** O valor de pico-a-pico indica a extensão máxima da onda, uma quantidade útil onde, por exemplo, o deslocamento vibratório de uma parte mecânica é fundamental para a tensão máxima ou o apuramento de considerações mecânicas.
- **Fase:** A posição inicial do ponto, no instante ($t=0$) em que se começou a medir, é conhecida por Fase e é indicada em radianos ou em graus.
- **Período:** O período representa o intervalo de tempo correspondente a uma oscilação completa da onda.

O período é caracterizado por ser o inverso da frequência, deste modo pode ser calculado através da equação. (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

$$T = \frac{1}{f} \quad 4.1$$

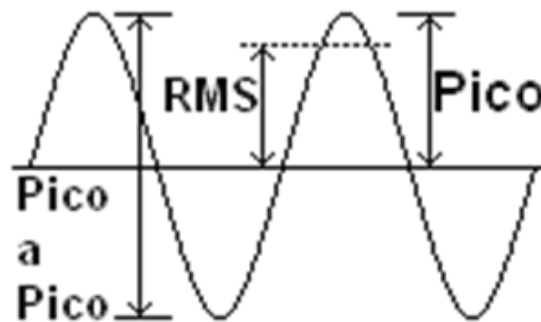


Figura 4.1- Representação de Pico, Pico a Pico e RMS de uma onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

Outro conceito importante é o RMS, que advém do inglês *Root Mean Square* e que é o valor médio quadrático ou valor eficaz de uma função periódica. É a medida de nível mais relevante, porque leva em consideração o histórico no tempo da onda e dá um valor que está diretamente relacionado à energia contida, e portanto, à capacidade destrutiva da vibração. Já o Fator de Crista é a relação entre o valor de Pico (x Pico) e o valor RMS (x RMS) do sinal de vibração, e pode ser determinado através da equação. (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

$$FC = \frac{\chi_{Pico}}{\chi_{RMS}} \quad 4.2$$

O Fator de Crista deve ser obtido através de medições periódicas, com vista a construir um gráfico de fator de crista ao longo do tempo, uma vez que a sua análise é importante para determinar qual o estado de deterioração de um equipamento.

De uma forma geral, os materiais e os equipamentos vão-se deteriorando em função do seu uso e através da análise dos fatores de crista podem ser identificados três estágios no processo de deterioração de um equipamento que são (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014):

- Estágio 1: O equipamento está em boas condições e o fator de crista mantém-se constante;
- Estágio 2: O equipamento começa a apresentar os primeiros defeitos e o fator de crista aumenta;
- Estágio 3: Com o equipamento em avançado estado de deterioração o nível de RMS sobe e o fator de crista diminui. A vida do equipamento aproxima-se do fim.

Na Figura 4.2, apresenta-se, um gráfico do fator de crista no estágio 1 para um determinado equipamento. Analisando a figura é possível verificar que quando a máquina não possui defeitos o nível de vibração é baixo, ou seja, tanto o valor de RMS como o valor de pico são baixos.

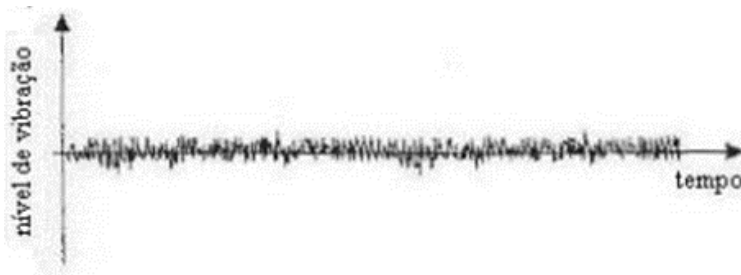


Figura 4.2- Primeiro estágio de uma onda para caracterizar fator de crista (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

O Fator de Crista aumenta a partir do momento em que aparecem pequenos defeitos localizados fazendo com que o valor de pico aumente, porém o valor de RMS mantém-se estável, aumentando a relação entre ambos, tal como é perceptível de visualizar na Figura 4.3.



Figura 4.3- Segundo estágio de uma onda para caracterizar fator de crista (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

Quando os defeitos passam a ficar mais intensos, o nível de vibração eleva-se (Figura 4.4), aumentando também os valores de pico e RMS, o que faz com que a relação entre o fator de crista e o RMS diminua. (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)



Figura 4.4- Terceiro estágio de uma onda para caracterizar fator de crista (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

O comprimento de onda e a frequência de vibração também são fatores importantes a ter em conta na análise das vibrações. O comprimento de onda corresponde à distância entre duas partículas consecutivas na mesma vibração, representada na figura 4.5. Já a frequência de vibração, Figura 4.6 é entendida como sendo o número de oscilações completas que uma partícula efetua, ao passar por um determinado ponto, em apenas um segundo de tempo. (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

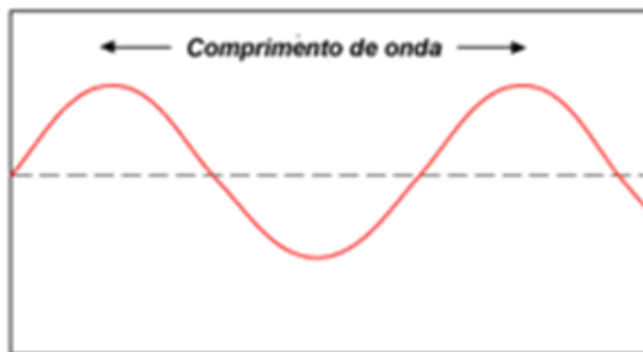


Figura 4.5- Representação esquemática do comprimento de uma onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014).



Figura 4.6- Representação de uma onda com uma frequência de 1 Hz (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014).

Na Figura 4.7 apresenta-se dois sinais com a mesma amplitude mas com frequências bastante distintas. No caso da onda de baixa frequência, esta apresenta um maior comprimento de onda e as cristas da onda encontram-se mais afastadas umas das outras, ao contrário da onda de alta frequência onde se tem um menor comprimento de onda e as cristas da onda encontram-se mais próximas umas das outras (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014).

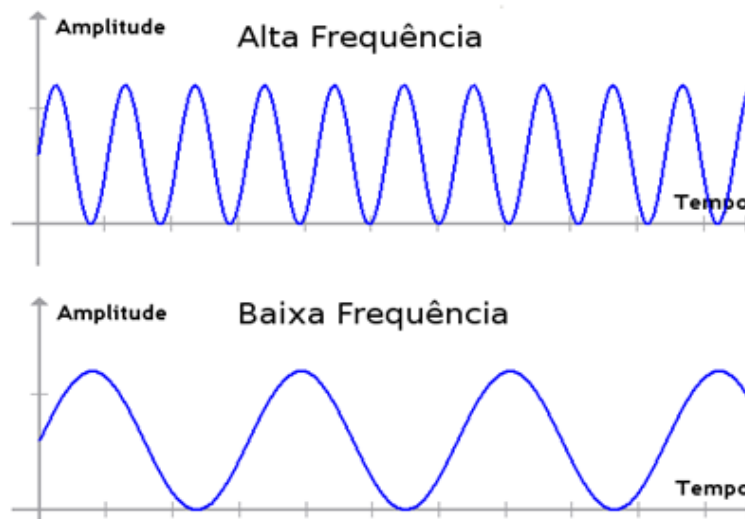


Figura 4.7- Diferença entre alta e baixa frequência (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

Geralmente, em regime de funcionamento, um equipamento está sujeito a vibrações que ocorrem nas mais diversas frequências, provenientes da própria rotação do equipamento, dos elementos da máquina, ou mesmo de fontes externas. Como todos estes sinais acontecem ao mesmo tempo, torna-se muito difícil avaliá-los no tempo, pois têm diversas frequências e amplitudes sobrepostas. No entanto, se estes sinais forem avaliados no domínio da frequência, ter-se-á a separação exata de cada sinal, podendo assim conhecer-se e avaliar separadamente a consequência de cada um, no comportamento do equipamento. O sinal assim obtido é designado por espectro de frequência (ou decomposição da onda em harmónicos). Na Figura 4.8, apresenta-se o espectro de uma determinada frequência, sendo possível identificar claramente a contribuição que cada sinal dá para o comportamento da frequência global. Analisando a figura constata-se que estão representados três sinais que surgem simultaneamente no tempo. Observa-se que no mesmo intervalo de tempo, o primeiro sinal repete-se três vezes, o segundo seis vezes e o terceiro nove. Se analisarmos os períodos verifica-se que o período da primeira onda corresponde a dois períodos na onda segunda onda e a três períodos na terceira onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014).

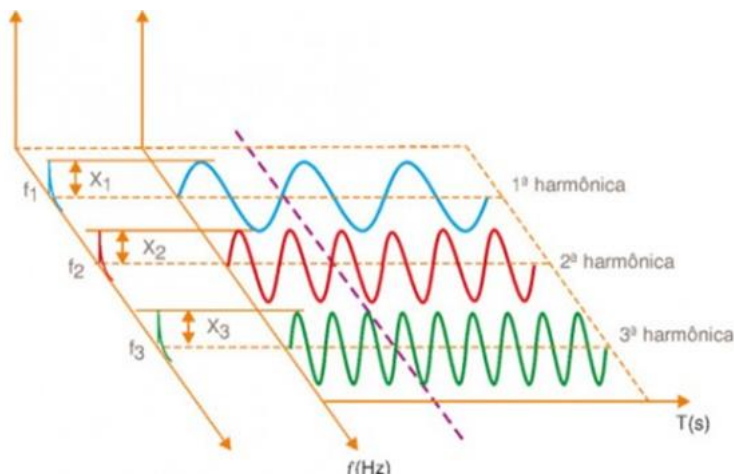


Figura 4.8- Decomposição de uma onda em harmônicos (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

Pode-se desta forma concluir que estes três sinais são harmônicos entre si, sendo que o segundo e terceiro ocorrem em frequências múltiplas do primeiro. Assim, se a frequência do primeiro sinal fosse 20 Hz, o segundo estaria a acontecer a 40 Hz e o terceiro a 60 Hz, simultaneamente. O sinal de 20 Hz seria a componente de primeira ordem ou fundamental enquanto os sinais em 40 e 60 Hz corresponderiam às componentes de segunda e terceira ordem, ou seja, o segundo e terceiro harmônico respetivamente. Se representássemos estes três sinais decompostos num sistema cartesiano eles estariam sobrepostos, tal como se ilustra na Figura 4.9 (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014).

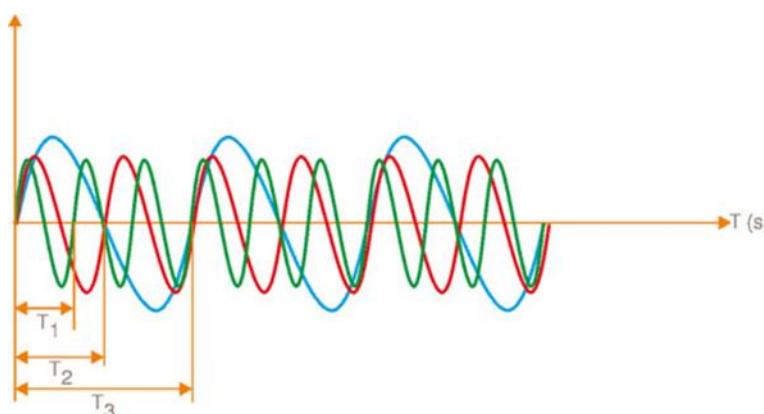


Figura 4.9- Junção dos vários harmônicos de uma onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

Sabendo que a amplitude da vibração (Figura 4.10) corresponde ao máximo afastamento que uma partícula sofre face à posição de equilíbrio e está relacionada com a quantidade de energia contida no sinal vibratório, podendo o seu valor representar a criticidade e destrutividade que existe num determinado sinal vibratório.

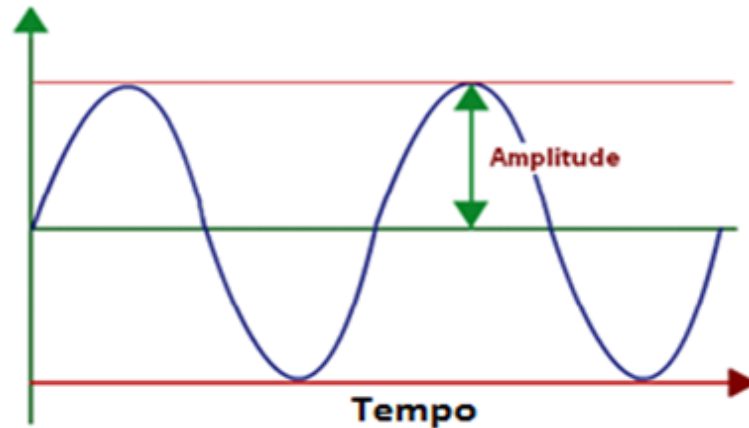


Figura 4.10- Representação da amplitude de uma onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

A amplitude de uma onda está relacionada diretamente com a sua intensidade, sendo três as grandezas utilizadas para quantificar os níveis de vibração que são: (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

- Deslocamento [mm];
- Velocidade [mm/s];
- Aceleração [m/s^2]

No entanto, analisar a forma de onda no tempo pode ser muito complicado, incómodo e muitas vezes inviável quando existem muitas componentes no sinal. Neste caso normalmente opta-se por uma análise do sinal no domínio da frequência, também denominada por forma espectral ou simplesmente espectro da vibração. Na Figura 4.11 apresenta-se de forma esquemática a representação espectral de uma onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014). Analisando a figura é possível constatar que no ponto A0 temos a amplitude de uma certa vibração, e no ponto A1 a amplitude de outra vibração. Desse modo, num espectro todos os componentes de um nível vibratório são representados sob a forma de picos que nos permitem seguir, individualmente, a variação da amplitude de cada

vibração e discriminar os defeitos em desenvolvimento nos componentes dos equipamentos.

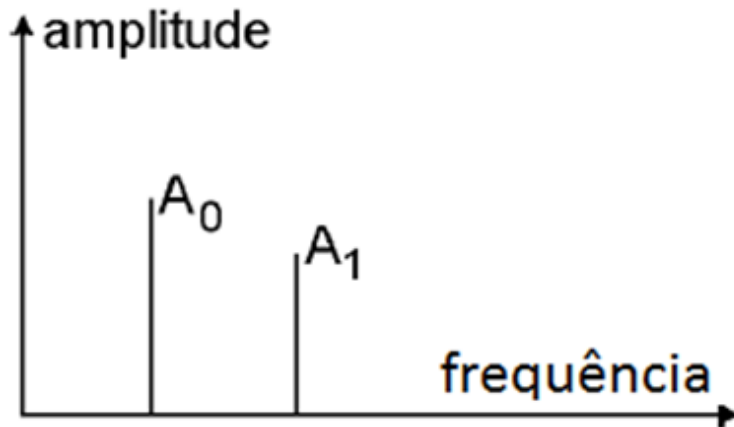


Figura 4.11- Representação espectral de uma onda (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

Para simplificar este processo, os programas de análise de vibração utilizam a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*). Um gráfico FFT, não é nada mais do que uma transformação de dados do domínio do tempo (amplitude em função do tempo) em dados de domínio de frequência (amplitude em função da frequência). Na Figura 4.12 representa-se de forma esquemática essa transformação de domínios, podendo-se desta forma verificar qual o espectro de frequência mais relevante na análise global de vibração. (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

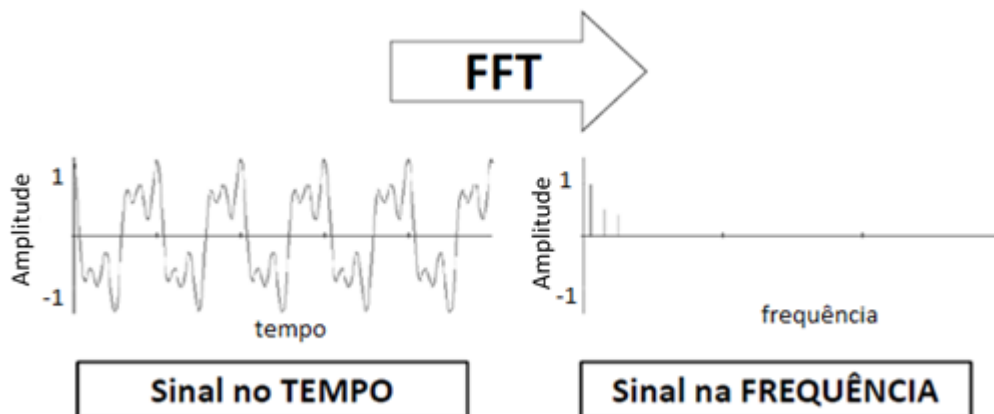


Figura 4.12- Passagem de um sinal no domínio do tempo para o domínio de frequência (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

No entanto, durante a conversão do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, ocorre o efeito de vazamento espectral (efeito conhecido como *leakage*) que corresponde a um fenômeno que tende a espalhar a energia contida numa frequência em linhas adjacentes no espectro, distorcendo-o e fazendo com que a amplitude seja subestimada. Para minimizar este efeito, os sinais devem ser multiplicados por uma função matemática que faz com que o sinal tenha valor igual a zero no início e no final do registro temporal. Esta função é chamada de função janela e são diversas as expressões que podem ser usadas, contudo a que se utiliza neste projeto é a função janela designada por *Hanning*. (NI, 2016)

A análise FFT pode em certos sinais fornecer mais informação do que o necessário. Quando isso acontece a análise de oitavas a melhor opção, uma vez esta análise apresenta as características de frequência de um sinal em faixas de frequência. Análise de oitavas é como a passagem de um sinal através de uma série de filtros de banda, cada um cobrindo uma oitava, como representado na figura seguinte. (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

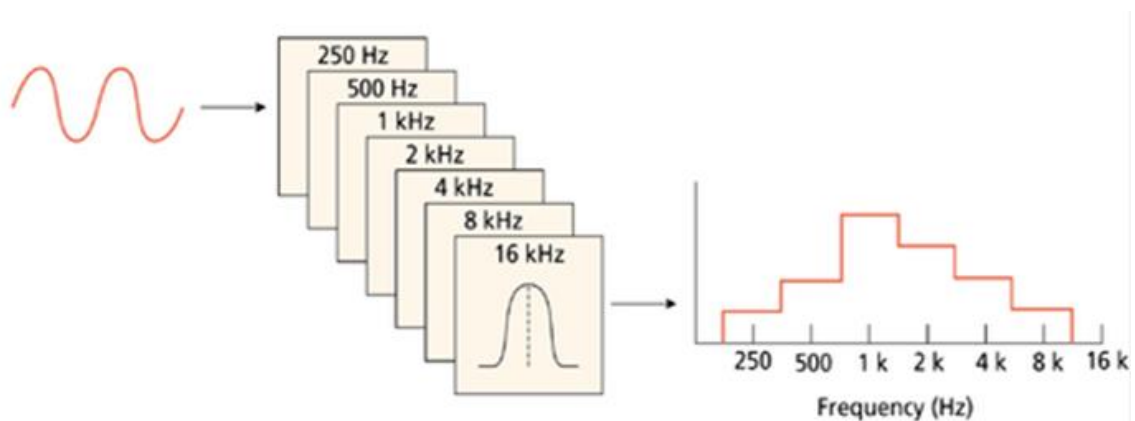


Figura 4.13- Exemplo da conversão de um sinal para análise de oitavas (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

Repartindo as frequências em oitavas ajuda a medir as qualidades subjetivas da vibração, permite mostrar resultados ao longo de múltiplas oitavas, sendo possível desta forma comparar os níveis de sinal sobre uma ampla faixa de frequência.

Os filtros de banda de oitava podem ser filtros analógicos (passivos ou ativos, que operam com sinais de tempo contínuo) ou filtros digitais (que operam em sinais em tempo discreto). Analisadores tradicionais de oitavas normalmente utilizam filtros analógicos, contudo analisadores de oitavas baseados em computadores na maioria das vezes usam filtros digitais.

Nas Figura 4.14 e Figura 4.15, apresenta-se o mesmo sinal, mas analisando em 1 oitava e analisando em 1/3 de oitava (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014).

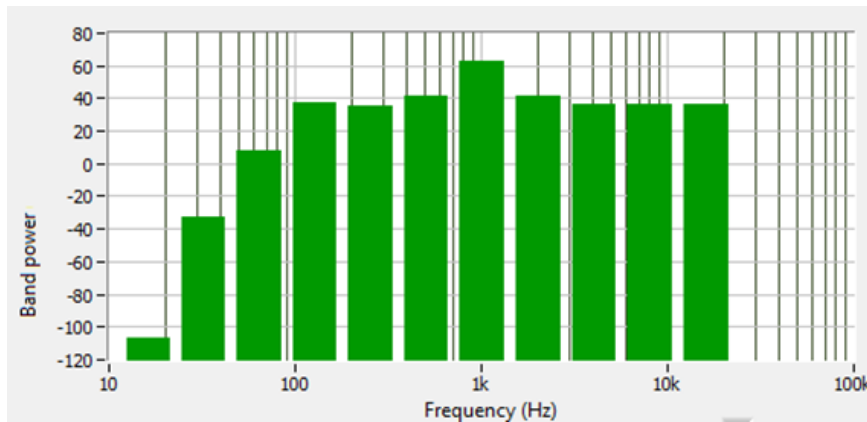


Figura 4.14- Gráfico de uma análise em oitavas (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

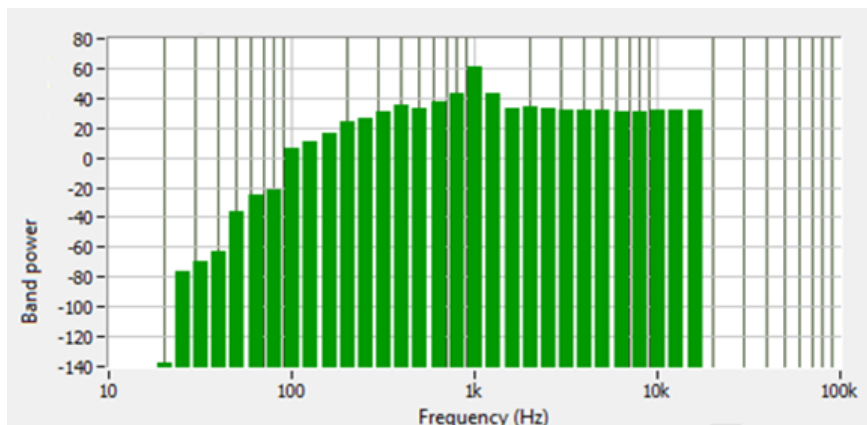


Figura 4.15- Gráfico de uma análise em 1/3 de oitavas (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

Analisando as figuras anteriores, é possível verificar que a escolha do filtro define a resolução da análise de frequência obtida. Quanto menor a percentagem, maior a resolução do espectro mas também será maior o tempo necessário para a aquisição de dados. (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014)

4.3 - Equipamento Experimental

Para proceder à aquisição das vibrações induzidas pela árvore de rotação da fresadora a cinco eixos HAAS UMC 750SS num qualquer material, foram necessários os seguintes elementos:

- Um acelerómetro triaxial piezoelétrico;
- Uma placa de aquisição de sinais;
- Um computador com programa de aquisição dos sinais (LabVIEW).

O software utilizado teve como base o programa de LabView, (National Instruments, 2016), tendo-se procedido à adaptação de um programa que foram criado anteriormente por alunos da unidade curricular de Projeto da Licenciatura em Engenharia Mecânica (Ribeiro, Pinto, & Barros, Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias, 2014). Para proceder à aquisição das vibrações induzidas pela árvore de rotação da fresadora a cinco eixos HAAS UMC 750SS num qualquer material, foi necessário proceder-se à alteração do programa, nomeadamente, com a introdução de um acelerómetro triaxial, uma vez que a aplicação anterior utilizava quatro acelerómetros uniaxiais. Na Figura 4.16, apresenta-se o *layout* da aplicação desenvolvida.



Figura 4.16- *Layout* da aplicação desenvolvido para aquisição das vibrações induzidas pela árvore de rotação da fresadora a cinco eixos HAAS UMC 750SS num qualquer material.

Como já se referiu anteriormente o acelerómetro usado para a aquisição das vibrações, foi um acelerómetro triaxial fabricado pela PCB Piezotronics, (PCB Piezotronics , 2016), (Figura 4.17),

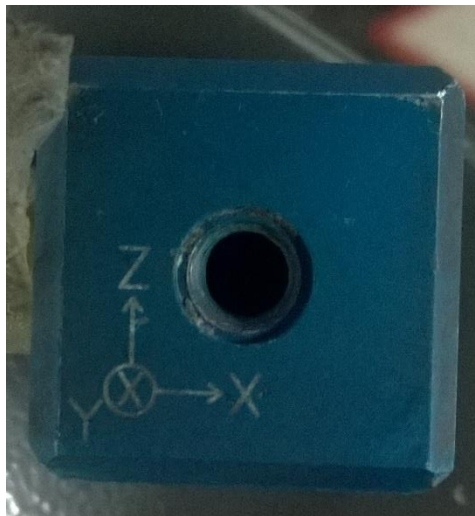


Figura 4.17- Visualização do sistema de eixos do acelerómetro triaxial usado para aquisição das vibrações.

Analisando a figura anterior é possível visualizar o sistema de eixos associado ao acelerómetro que, aquando da sua instalação, deverá ser respeitado para aquisição das vibrações provenientes da árvore de rotação da fresadora. As principais características do acelerómetro são as seguintes:

- Modelo: 356B08;
- Sensibilidade: 100.6mV/g (10.26 mV/(m/s²)) 100 Hz a 22 °C;
- Sensibilidade transversal: 1.0%;
- Faixa de temperatura de operação: -54 °C até 121 °C;
- Alimentação: 10.9 V DC;

Relativamente à placa de aquisição utilizada durante o projeto (Figura 4.18), as suas principais características são as seguintes:

- Modelo: NI 9234;
- Entradas: 4 analógicas;
- Resolução: 24 bits, faixa dinâmica de 102 db;
- Taxa máxima de amostragem: 51,2 kS/s/canal;
- Voltagem: +/- 5 V.

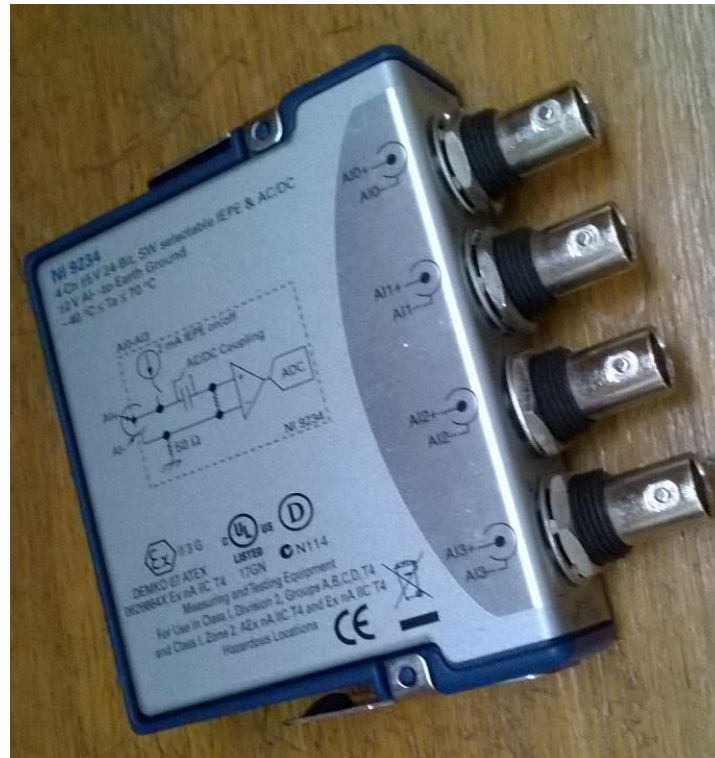


Figura 4.18- Placa de aquisição de dados NI 9234, com 4 entradas analógicas.

Para adquirir o sinal é necessário ligar a placa de aquisição a um chassi (Figura 4.19). Este serve de interface de ligação entre o acelerómetro e o computador. Para tal usou-se um chassi que permite a ligação ao computador por wireless em virtude do ambiente industrial da máquina.



Figura 4.19- Chassi usado na interface de ligação entre o acelerómetro e o computador.

4.4 - Procedimento Experimental

Relativamente ao procedimento experimental e antes de se proceder à aquisição de qualquer valor de vibração que seja induzida pela árvore de rotação da fresadora a cinco eixos HAAS UMC 750 SS num qualquer material, é necessário proceder à calibração do acelerómetro. A calibração foi realizada para cada eixo do acelerómetro, (x, y e z), de acordo com cada canal da placa de aquisição de sinais, tendo-se para isso recorrido a um *shaker*, modelo 394C06, da PCB Piezotronics (PCB Piezotronics , 2016) (Figura 4.20).



Figura 4.20- Acelerómetro colocado na parte superior do shaker para se proceder à sua calibração.

Atendendo que o *shaker* está calibrado com uma frequência e amplitude conhecida, para que os eixos do acelerómetro estejam devidamente calibrados, o valor de RMS para cada um dos eixos deve dar o mais perto possível de 1.00 g (9.84 m/s²) e frequência de 159,2 Hz, tal como é possível visualizar na Figura 4.21.

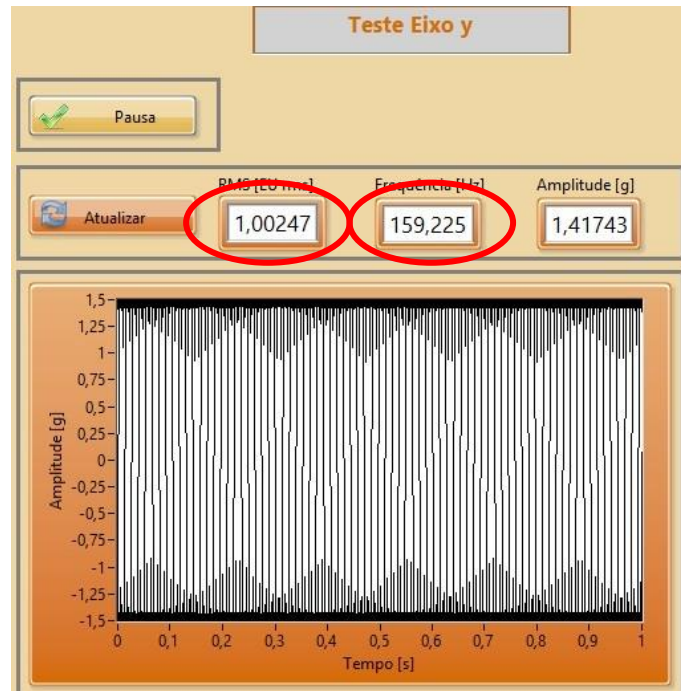


Figura 4.21- Visualização dos valores obtidos da calibração do acelerómetro segundo o eixo y.

Caso por algum motivo não seja possível obter esses valores aquando da calibração é necessário alterar o valor de sensibilidade do acelerómetro (como demonstra na Figura 4.22), até que se atinga o valor de 1.00 g RMS quando feita a calibração do acelerómetro.

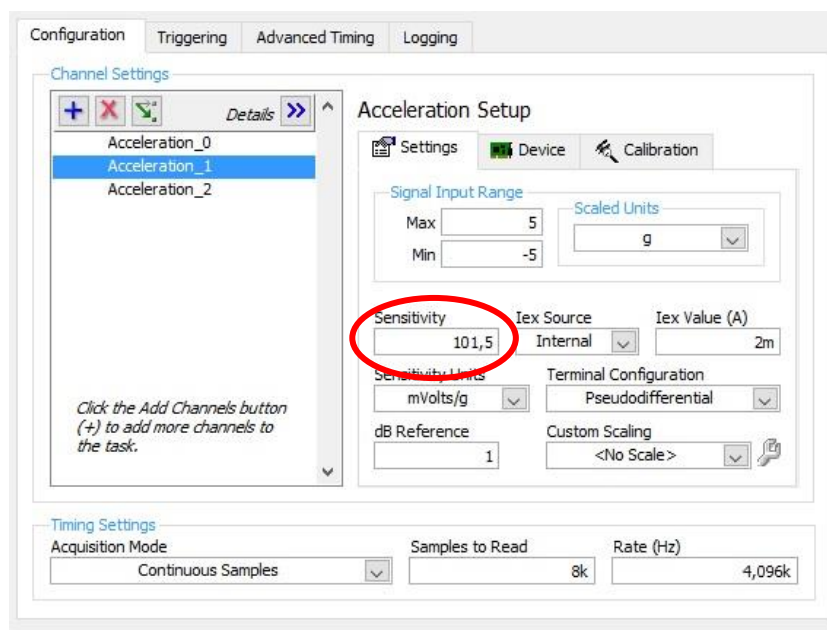


Figura 4.22- Sensibilidade do acelerómetro no eixo y

Depois de se ter realizado a calibração do acelerómetro, procedeu-se à sua fixação no material de testes. O material usado nos testes foi um bloco de Inox Duplex com 300 x 300 x 90 mm, tendo-se colado o acelerómetro com supercola e o mais próximo possível da área de maquinação no bloco como se demonstra na Figura 4.23. Este local foi escolhido em virtude de se querer determinar qual a vibração que era induzida pela pelo processo tecnológico, por outro lado o local teria de estar obrigatoriamente fora da zona onde se iria efetuar a remoção de material e ainda em virtude da necessidade de grande acessibilidade, para retirá-lo em caso de necessidade.



Figura 4.23- Colocação do acelerómetro

Tal como já foi referido anteriormente e em virtude de o acelerómetro ter um sistema de orientação próprio, este deverá estar orientado segundo a mesma direção e sentido que o da máquina de CNC. Sendo assim, a quando da colagem do acelerómetro foi tido em conta os referidos sistemas, tal como se apresenta na figura seguinte. Para garantir o paralelismo entre o acelerómetro e a mesa de CNC utilizou-se um esquadro calibrado.

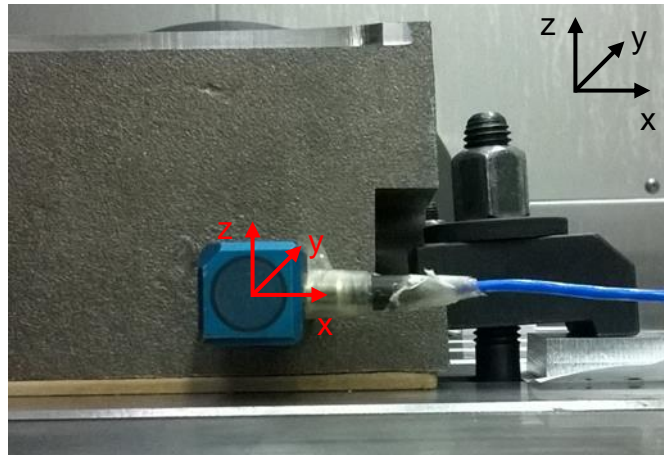


Figura 4.24- Pormenor da orientação do sistema de eixos do acelerómetro na mesa de CNC e no equipamento.

4.5 - Condições do Ensaio

Para comprovar a funcionalidade da aplicação desenvolvida e como no centro de maquinagem HAAS do ISEC se encontrava a decorrer um trabalho de Mestrado em parceria com a empresa PALBIT, onde se pretendia analisar a degradação da ferramenta no corte do aço inoxidável duplex, recorreu-se a um ensaio desse trabalho para comprovar a funcionalidade da aplicação. Na Tabela 4.1, apresentam-se os parâmetros de corte que foram usados na maquiagem do aço inox duplex.

Tabela 4.1- Parâmetros de corte usados na maquinagem do aço inoxidável duplex.

Diâmetro ferramenta a [mm]	Velocidade de corte (V_c) [m/min]	Profundidade e de corte (a_p) [mm]	Largura de corte (a_e) [mm]	Avanço por dente (f_z) (mm/dente)
32	90	2.5	19.2	0.1

Como a cada minuto existia a necessidade de remover a ferramenta para analisar as pastilhas de corte, o processo de aquisição das vibrações foi também feito a cada minuto. Desta forma e como o tempo total de ensaio de maquinabilidade foi de 12 minutos, obteve-se 12 ficheiros de vibrações (ficheiro 1 – tempo 1, ficheiro 2 – tempo 2, etc.) e que no capítulo seguinte vão ser analisados em valores de RMS e de Oitavas.

A taxa de aquisição foi de 4096 Hz e com uma amostra de aquisição de 8000 Hz, ilustrado na figura seguinte, assim implica que nos ensaios iremos ter uma frequência máxima de 2000 Hz nas análises em FFT.

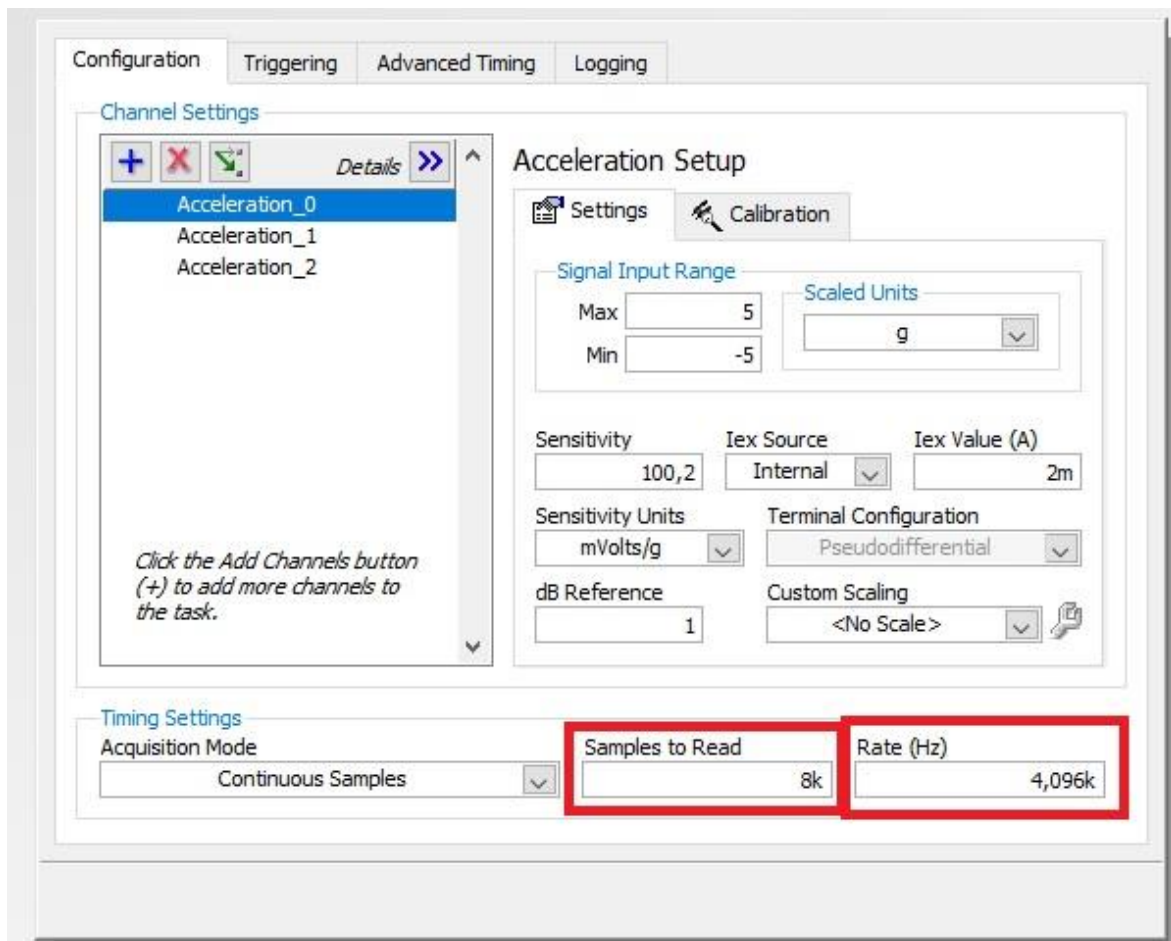


Figura 4.25- Taxa de Aquisição e Amostragem

Capítulo 5

Aquisição de Vibração e Análise do Sinal

5.1 - Introdução

Depois de realizados o ensaio anteriormente referido é necessário proceder à sua interpretação. Na Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3, são apresentados os valores da amplitude para o eixo dos xx, yy e zz, que se obtiveram durante o quinto ensaio.

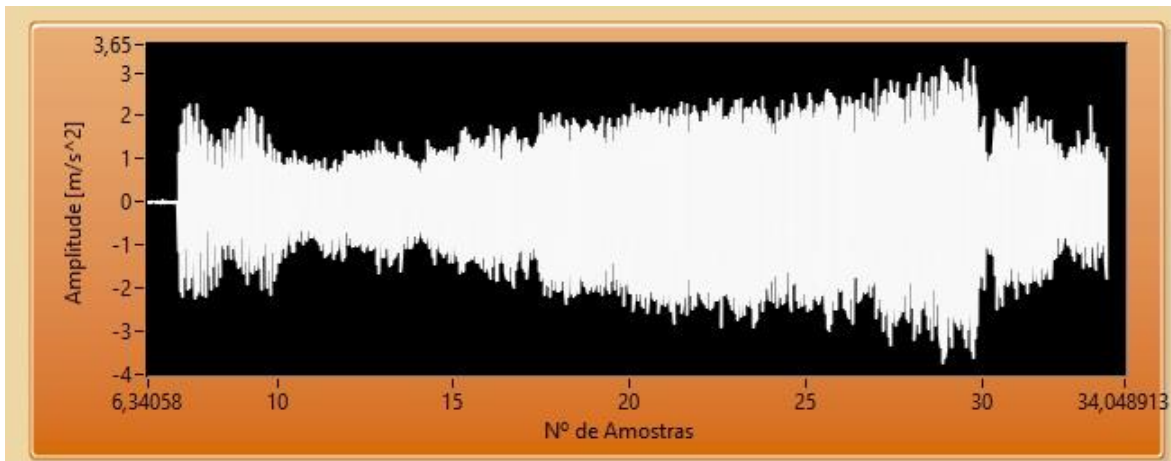


Figura 5.1- Amplitude da vibração segundo o eixo dos xx para o quinto ensaio

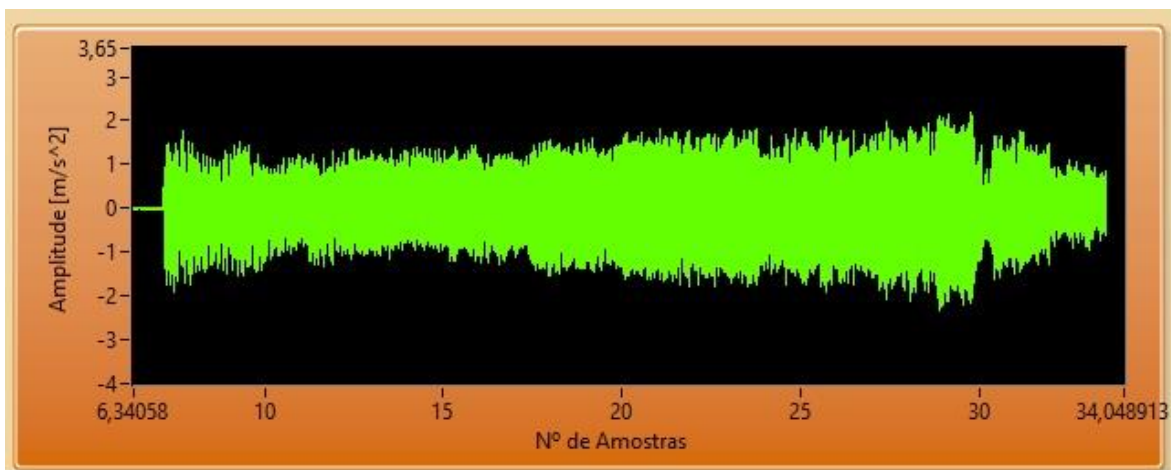


Figura 5.2- Amplitude da vibração segundo o eixo dos yy para o quinto ensaio

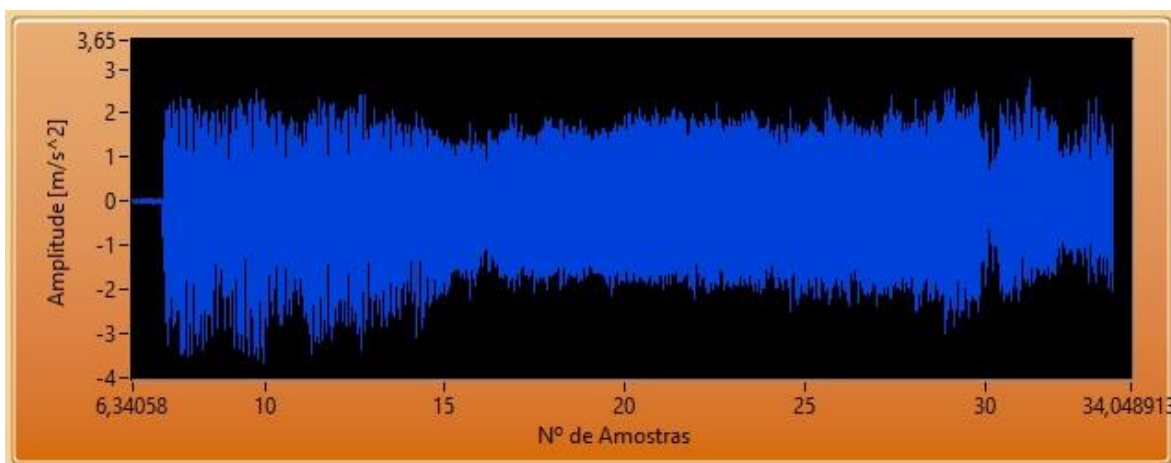


Figura 5.3- Amplitude da vibração segundo o eixo dos zz para o quinto ensaio

Analisando os figuras anteriores e apesar de os valores serem muito semelhantes nos três eixos, a maior vibração ocorre segundo o eixo dos xx e a menor ocorre segundo o eixo dos yy. Esta pequena diferença de valor vem corroborar que, devido ao sentido de maquinação, os valores que são adquiridos pela aplicação são sensíveis aos sentidos de maquinação, quer esta seja unidirecional (segundo um determinado eixo) quer seja segundo dois eixos, por exemplo uma alteração da direção de maquinação. Por último importa referir que a vibração pode ser também influenciada pelo desgaste que ocorre nas pastilhas, apesar de neste ensaio não se ter conseguido detetar essa ocorrência. Sabe-se que em virtude do desgaste que irá ocorrer nas pastilhas de corte, estas vão induzir um aumento da vibração durante o processo de maquinação.

5.2 - Análises das Vibrações

Atendendo que a aquisição das vibrações foi feita por um acelerómetro triaxial, que permitiu registar a vibração que ocorreu em cada um dos eixos (x, y, z), é necessário proceder à determinação do valor de RMS do sinal. Desta forma, para cada um dos três eixos de referência obtém-se o valor eficaz de aceleração ponderada em RMS (RMS (x), RMS (y), RMS (z)) e é a partir destes valores de aceleração ponderada em RMS que se determina o valor total da vibração através da seguinte expressão (RELACRE, 2014):

$$RMS = \sqrt{RMS(x)^2 + RMS(y)^2 + RMS(z)^2} \quad 5.1$$

Para melhor compreender os resultados, numa fase inicial foram analisados os valores obtidos em RMS, depois aplicou a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e só depois se procedeu à análise dos valores em oitavas.

5.2.1 Sinal em RMS

Tal como foi referido anteriormente depois de adquiridos os sinais procedeu-se com cálculo do valor de RMS para cada ensaio. Na Tabela 5.1, apresentam-se de forma resumida os valores de pico, de RMS e do fator de crista, bem como do valor de RMS global para os 12 ensaios realizados.

Na Figura 5.4, apresentam-se em termos gráficos a evolução do valor de RMS ao longo dos ensaios

Tabela 5.1- Valores obtidos para os ensaios realizados.

	Eixo	Valor de Pico [m/s²]	RMS [m/s²]	Factor de Crista
Ensaio 1	xx	4,309	0,253	16,970
	yy	2,833	0,156	18,110
	zz	3,503	0,189	18,500
	Global	--	0,352	--
Ensaio 2	xx	4,435	0,247	17,880
	yy	2,833	0,153	18,500
	zz	4,331	0,212	20,420
	Global	--	0,359	--
.....				
Ensaio 5	xx	5,747	0,277	20,740
	yy	3,712	0,175	21,110
	zz	6,243	0,248	25,140
	Global	--	0,411	--
Ensaio 6	xx	4,906	0,697	7,036
	yy	2,959	0,422	7,003
	zz	5,274	0,564	9,347
	Global	--	0,990	--
.....				
Ensaio 11	xx	6,182	0,545	11,320
	yy	4,055	0,341	11,860
	zz	8,479	0,497	17,040
	Global	--	0,813	--
Ensaio 12	xx	6,182	0,560	11,020
	yy	4,055	0,351	11,530
	zz	8,479	0,507	16,700
	Global	--	0,833	--

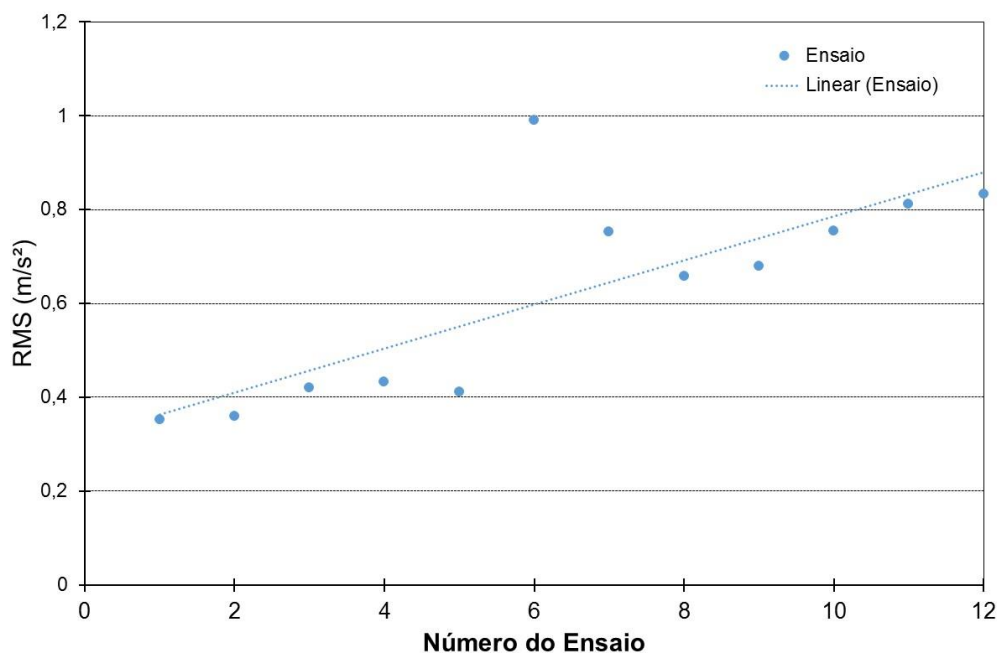


Figura 5.4- Valores Globais da Vibração em RMS.

Analisando a figura anterior, verifica-se que à medida que se foi realizando a maquinagem o valor de RMS Global vai aumentando de forma linear, à exceção do ensaio número 6 onde, o valor apresenta adquirido apresenta um grande desvio relativamente aos restantes. Uma possível justificação para este valor pode passar ou por aparecimento de apara aderente no gume de corte da ferramenta ou pelo aparecimento de algum mecanismo de desgaste. Contudo não se consegue afirmar com rigor o que aconteceu naquele ensaio, seria necessário realizar mais alguns ensaios para determinar a causa. Ora como o intuito do trabalho era simplesmente desenvolver uma aplicação para adquirir o sinal de vibração que advém do processo de maquinagem, não se procedeu à realização de mais ensaios para aferir os valores adquiridos.

5.2.2 Sinal em FFT

Posteriormente procedeu-se à análise dos ensaios em FFT, tal como foi referido anteriormente. Na figura seguinte, apresenta-se essa análise para o ensaio número 5, uma vez que para os restantes ensaios seriam gráficos semelhantes, os seguintes gráficos foram exportados do programa labview, para o programa DIAdem da National Instruments. (National Instruments, 2016)

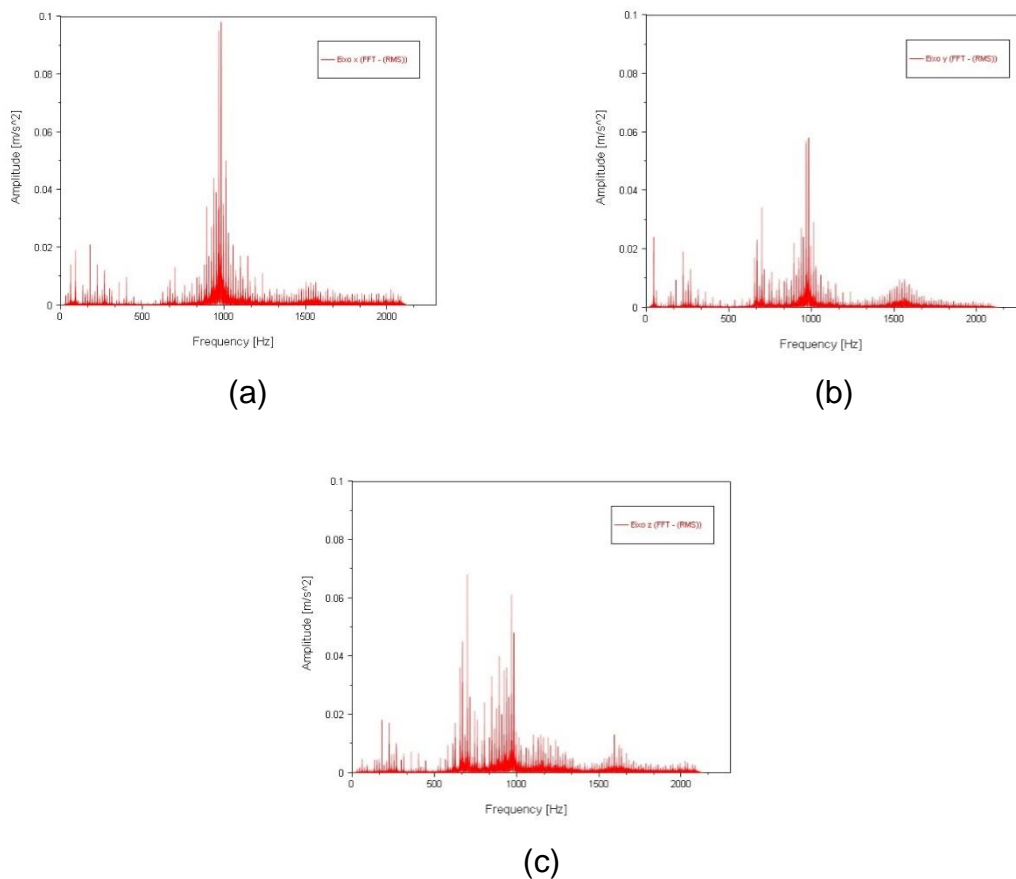


Figura 5.5- Aceleração em FFT segundo o eixo x (a), segundo o eixo yy (b) e segundo o eixo zz (c) para o ensaio número 5

Analisando a Figura 5.5, verifica-se que os valores de aceleração máxima que foram registados correspondem a um valor de $0,1 \text{ m/s}^2$ e para a frequência de 1000 Hz .

Em termos de velocidade (Figura 5.6), os valores obtidos são relativamente baixos para os eixos XX e ZZ, respetivamente $0,04 \text{ m/s}$ e $0,02 \text{ m/s}$. Relativamente ao eixo YY, o valor obtido foi de $0,08 \text{ m/s}$, para uma frequência de 43 Hz .

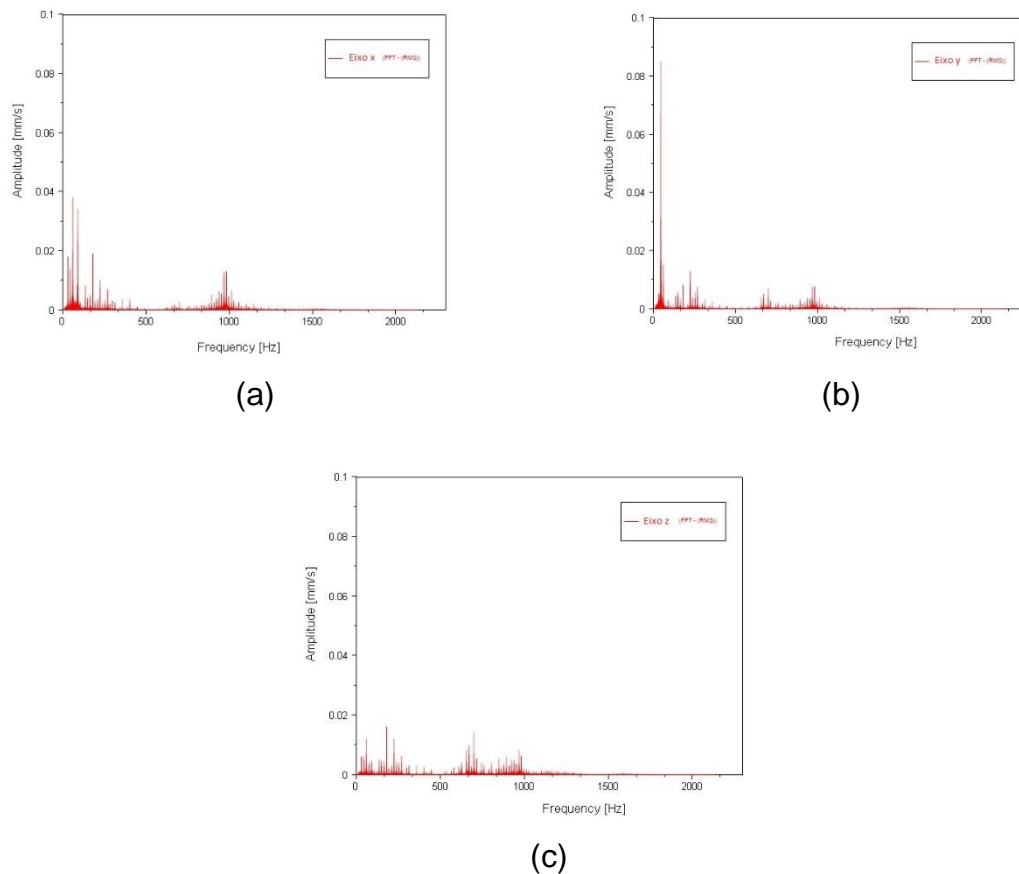


Figura 5.6- Velocidade em FFT segundo o eixo x (a), segundo o eixo yy (b) e segundo o eixo zz (c) para o ensaio número 5

No caso do deslocamento, existe um deslocamento de 0,0003 mm segundo o eixo dos YY sendo a sua frequência de 45 Hz. No eixo XX e ZZ, o deslocamento é muito mais baixo que no eixo dos YY. Uma possível explicação para isso pode ser explicada com o sentido de maquinagem com que foi adquirido o sinal.

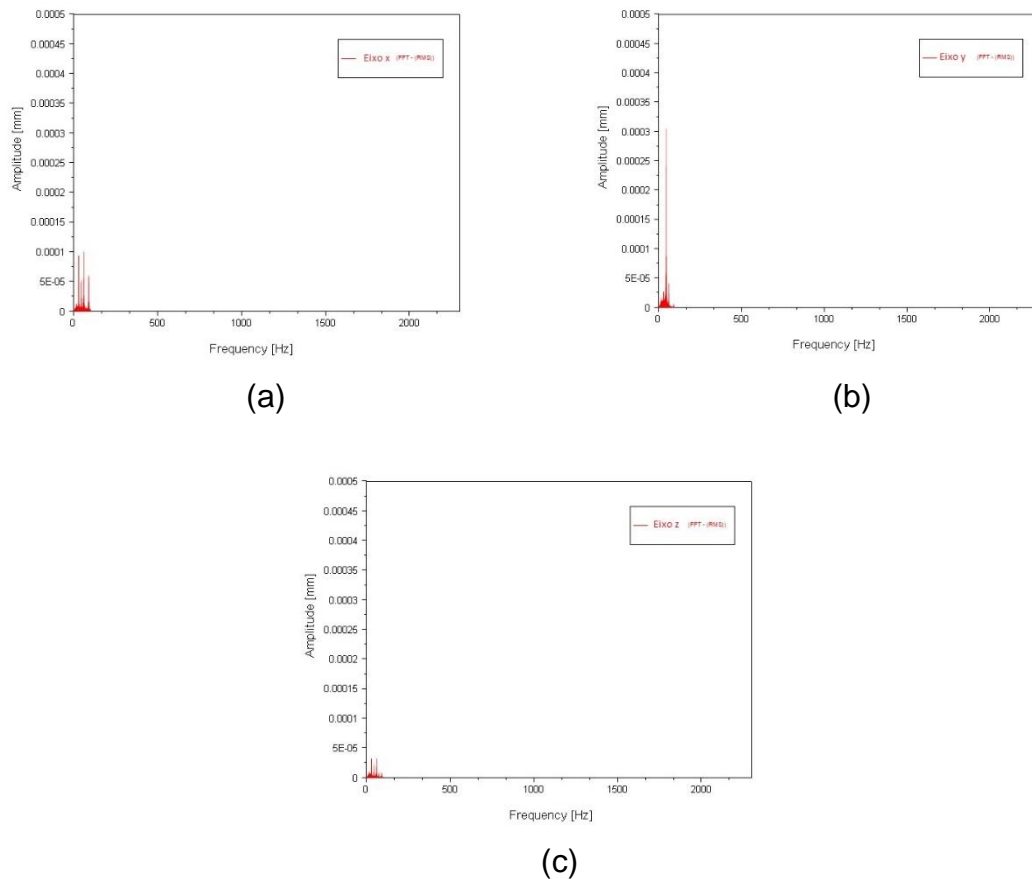


Figura 5.7- Deslocamento em FFT segundo o eixo x (a), segundo o eixo yy (b) e segundo o eixo zz (c) para o ensaio número 5

5.2.3 Sinal em Oitavas

Tal como já se referiu anteriormente, a análise FFT pode em certos sinais fornecer mais informação do sinal do que o necessário, sendo assim a análise de oitavas é como a passagem de um sinal através de uma série de filtros de banda, cada um cobrindo uma oitava, nas figuras seguintes apresentam-se as análises em oitavas para a aceleração, velocidade e deslocamento para o ensaio 5.

Relativamente à aceleração e analisando o sinal em oitavas (Figura 5.8) verifica-se que tal como já se tinha apresentado na análise em FFT da aceleração para este ensaio, também o valor ocorre para a frequência de 1000 Hz, sendo o valor da aceleração de $0,54 \text{ mm/s}^2$ segundo o eixo dos XX. Relativamente aos restantes

dois eixos, o valor é relativamente mais baixo do que o do eixo dos XX mas o valor da frequência ocorre para a mesma frequência.

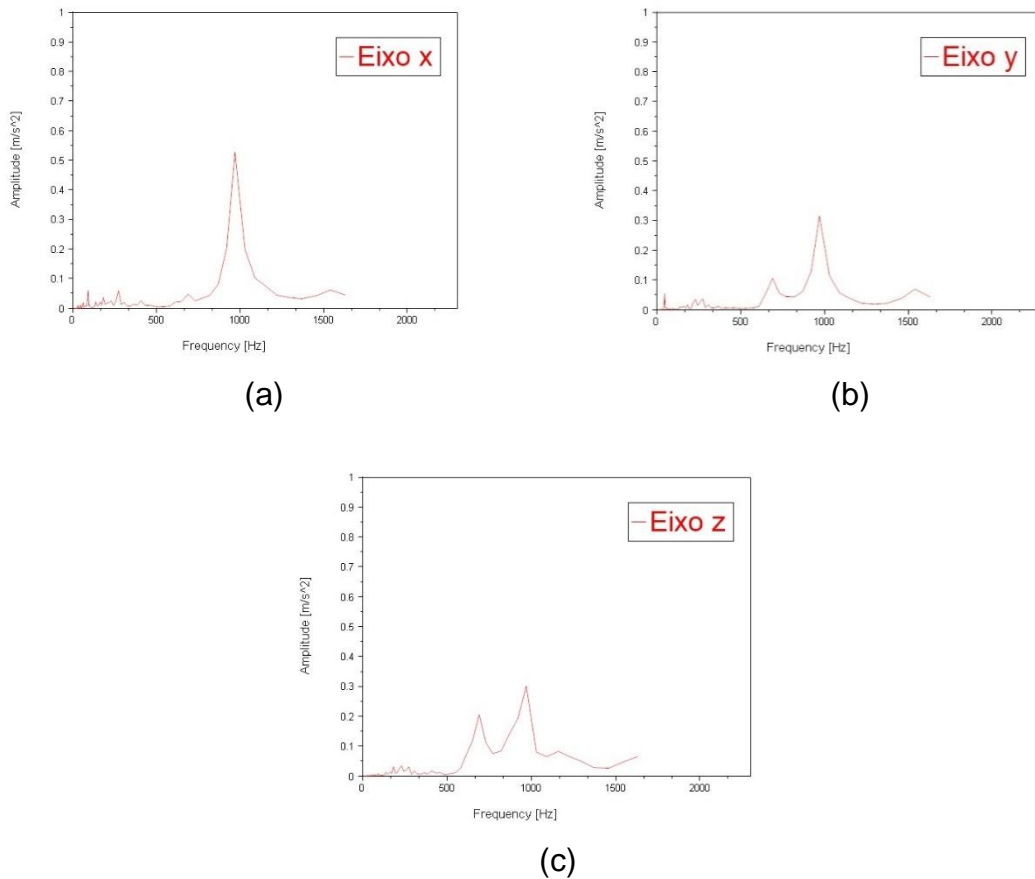


Figura 5.8- Aceleração em oitavas segundo o eixo x (a), segundo o eixo yy (b) e segundo o eixo zz (c) para o ensaio número 5

Relativamente à velocidade, a análise em oitavas, permite verificar que a amplitude máxima ocorre para o eixo dos yy, sendo o seu valor muito baixo ($3,8 \times 10^{-5}$ m/s) para uma frequência de 43 Hz.

Relativamente aos restantes eixos os valores são desprezáveis quando comparáveis com o eixo dos YY.

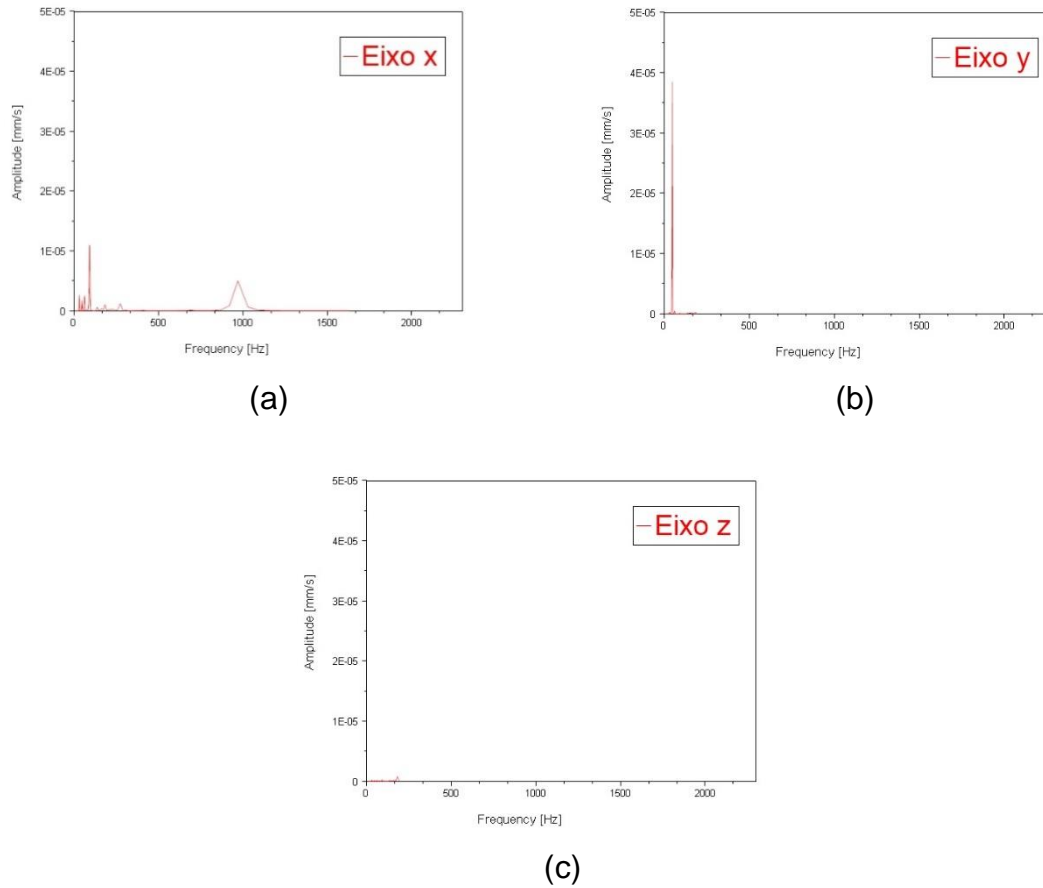


Figura 5.9- Velocidade em oitavas segundo o eixo x (a), segundo o eixo yy (b) e segundo o eixo zz (c) para o ensaio número 5

Em termos de deslocamento, é no eixo YY que ocorre o maior valor (0,0007 mm) para uma frequência de 45 Hz. Relativamente aos restantes dois eixos os valores não sempre inferiores ao que ocorreu para o eixo dos XX.

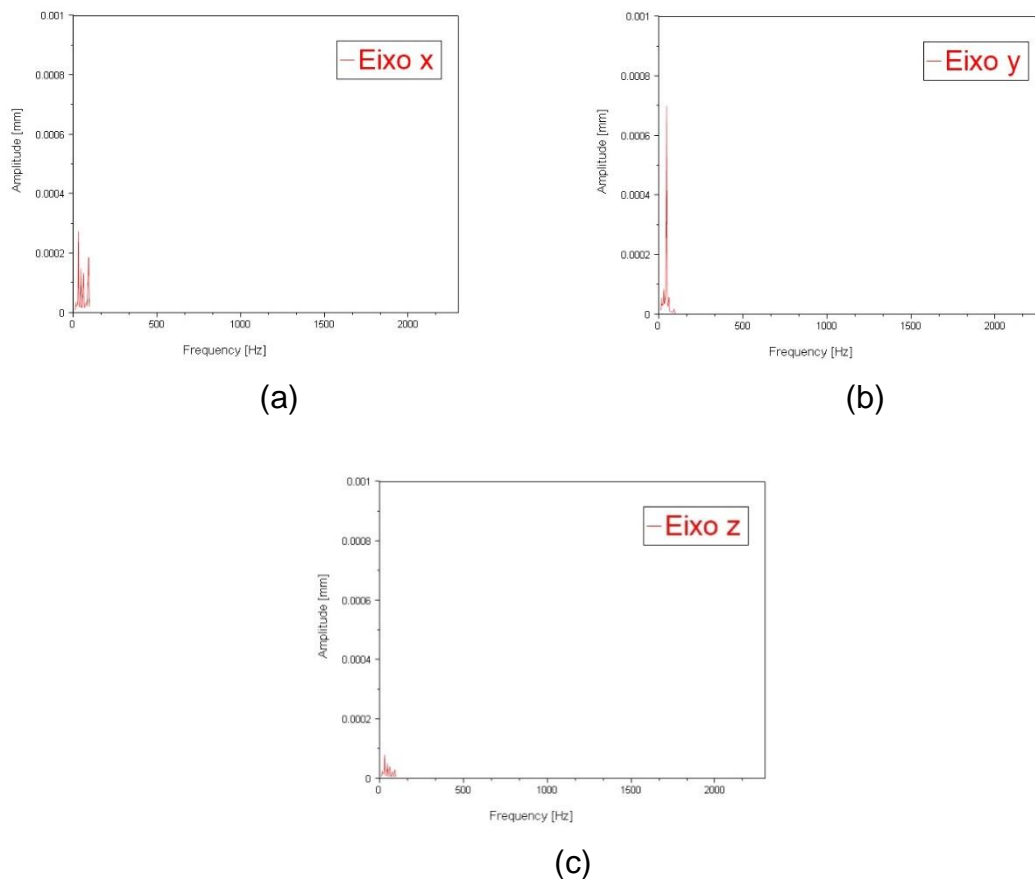


Figura 5.10- Deslocamento em oitavas segundo o eixo x (a), segundo o eixo yy (b) e segundo o eixo zz (c) para o ensaio número 5

5.3 - Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos não diferem em muito os valores obtidos de outros trabalhos elaborados, embora exista sempre algumas diferenças devido aos parâmetros do projeto, tais como os parâmetros de corte, o material a maquinar, o diâmetro da ferramenta e a dureza das pastilhas utilizada.

Com estes resultados obtidos podemos retirar algumas conclusões, que a vibração aumenta com o desgaste das pastilhas, e que houve um aumento de vibração, sensivelmente a meio do teste, derivado muito provavelmente a uma colagem da apara na pastilha.

Como podemos verificar nos gráficos existe um pico na amplitude máxima com uma frequência de cerca de 1000 Hz, o que implica que os valores retirados dos outros tempos de paragem não variam muito da frequência registada segundo a transformada rápida de Fourier.

No caso da análise em oitavas podemos verificar que os resultados variam muito segundo os eixos, embora no âmbito geral mantem a tendência dos resultados retirados da análise em FFT.

Capítulo 6

Conclusão

No seguimento da aquisição do centro de maquinagem de 5 eixos da marca HAAS, modelo UMC 750SS, para o laboratório de Biomecânica Aplicada, foi proposta a realização deste trabalho agora apresentado, um vez que seria útil conhecer e explorar as potencialidades desta máquina-ferramenta.

O início do meu trabalho coincidiu com a entrega no ISEC do equipamento. Por esse motivo, tive a oportunidade de acompanhar a instalação, colocação em funcionamento e formação para operar a máquina-ferramenta, facultada pela empresa Haas Factory Outlet – Portugal (HAAS Portugal, 2015) (figura 6.1).

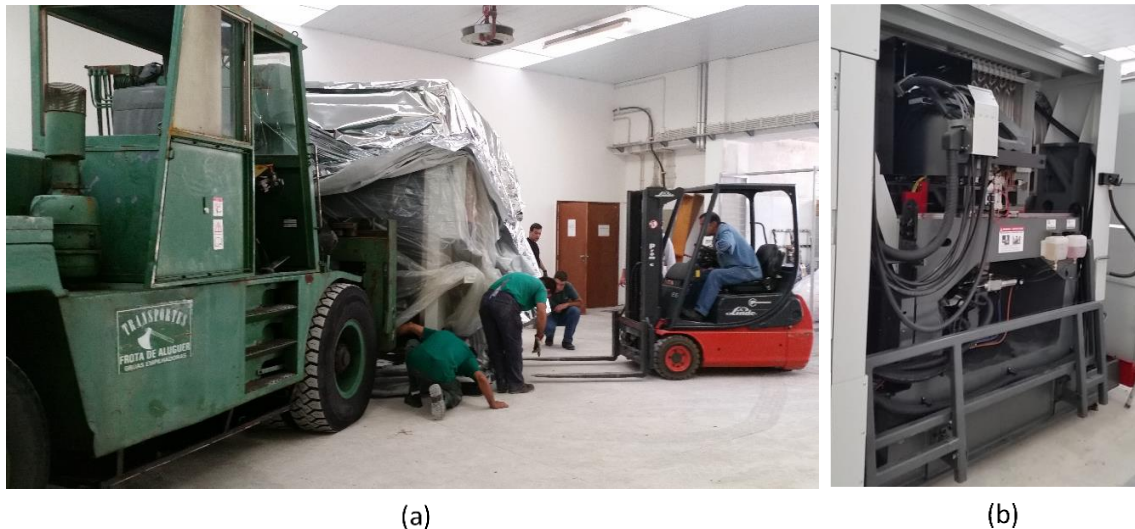


Figura 6.1– Transporte e instalação (a) Movimentação no interior do edifício onde foi instalado o equipamento.
(b) Vista posterior da máquina-ferramenta durante a instalação.

A implementação da tecnologia CAD/CAM associada à máquina-ferramenta foi igualmente acompanhada neste trabalho. Para o efeito, participei em diversas formações relativas ao software Mastercam, (mastercam, 2016), acompanhei as etapas de teste e alteração do pós-processador e participei na programação dos ciclos de maquinagem e fabrico de algumas peças produzidas na máquina-ferramenta.

Pese embora tenha acompanhado e participado nas tarefas descritas anteriormente, dado estas serem difíceis de concretizar objetivamente neste relatório, foi decidido que este relatório seria centrado, por um lado, nos principais constituintes dos centros de maquinagem e nos sistemas de sondas intuitivos sem fios (capítulos 2 e 3). Por outro lado, foi igualmente decidido Implementar um sistema independente do equipamento para aquisição da vibração durante as operações de maquinagem (capítulos 4 e 5). Esta parte do trabalho teve uma componente inovadora, uma vez que não existia previamente na máquina-ferramenta nenhum sistema de aquisição de sinal, sendo por isso necessário efetuar a adaptação de um software de aquisição de sinal previamente existente para outro efeito, criado em Labview.

No final, foram realizadas diversas aquisições de sinal, relativos à vibração induzida num bloco de aço inox duplex durante operações de maquinagem, a fim de conhecer o sistema implementado na prática e o seu funcionamento.

Relativamente a trabalhos futuros que se consideram pertinentes desenvolver no seguimento deste trabalho, indicam-se os seguintes:

- Caracterizar diversos constituintes dos centros de maquinagem que neste trabalho não foram objeto de estudo, particularmente aqueles que equipam este equipamento em concreto;
- Implementar a utilização da sonda sem fios de determinação do zero-peça noutras tarefas: Nomeadamente, no auxílio do desempenho inicial dos blocos a maquinar e na inspeção de coordenadas após maquinagem;
- Implementar a aquisição do sinal de vibração noutros pontos do equipamento. Nomeadamente, na árvore, onde é montada a ferramenta, animada de rotação.
- Relacionar o sinal de vibração adquirido com o processo de maquinagem, identificando as condições adequadas e instáveis de corte;
- Relacionar o sinal de vibração adquirido com o processo de maquinagem, identificando a situação limite de vida das ferramentas de corte;

Capítulo 7

Referências Bibliográficas

National Instruments. (2016). Obtido de <http://www.ni.com/diadem/pt/>

avasistema. (2010). Obtido de avasistema: <http://www.avasistema.com.br/guia-linear.php>

centroidcnc. (2015). Obtido de centroidcnc: <http://centroidcnc.com.br/index.php/topicos-cnc/o-que-e-o-controlador-cnc>

Chocalheiro, E. L. (2012). *IMPLEMENTAÇÃO DE CENTRO DE MAQUINAGEM E DESENVOLVIMENTO DE PÓS-PROCESSADORES CNC*. Lisboa.

ebah. (2010). Obtido de ebah: http://www.ebah.pt/content/ABAAAA_LIAC/fusos-esferas-recirculantes

Fanuc. (Novembro de 2015). *Fanuc*. Obtido de fanuc: fanuc.eu/ru/en/cnc/drive-systems/motors

Ferreira, P. M. (2015). *Estudo da Maquinabilidade das Ligas Ti-6Al-4V e Co-28Cr-6Mo na Fresagem de Dispositivos Biomédicos*. Aveiro.

HAAS. (2014). *Manual do Operador* .

HAAS. (2015). *HAAS UMC-750SS*.

HAAS. (2016). HAAS. Obtido de HAAS: http://int.haascnc.com/whatsnew-coolant_system.asp?intLanguageCode=1046

HAAS. (2017). HAAS. Obtido de HAAS.

HAAS Portugal. (2015). Obtido de <http://haasportugal.com/>

HEIDENHAIN. (2015). *Touch Probes for Machine Tools*.

helmancnc.com. (2015). Obtido de helmancnc: <http://www.helmancnc.com/images/cnc-controls/fanuc.jpg>

kimla. (2015). kimla. Obtido de kimla: <http://www.kimla.pl/en/HowtochooseaCNCspindle>

mastercam. (2016). mastercam. Obtido de mastercam: <http://www.mastercam.com/en-us/>

mori, d. (2016). dmgmori.com. Obtido de dmgmori.com: <http://br.dmgmori.com/blob/119760/17c5968c73bf03c90f26d7b520db4a60/dmu-evo-heidenhain-itnc-530-hsci-jpg-data.jpg>

NI. (2016). *FFTs e janelamento (windowing)*. Obtido em 27 de Outubro de 2016, de <http://www.ni.com/white-paper/4844/pt/#toc2>

omicrom. (Dezembro de 2015). Obtido de omicrom: <http://omicrom.com.br/geral/guias-lineares-2/>

panasonic. (2015). Obtido de panasonic: panasonic-electric-works.com/eu/servo-drives-and-motors.htm

PCB Piezotronics . (2016). Obtido de PCB Piezotronics : <http://www.pcb.com/>

RELACRE. (2014). *GUIA DE BOAS PRÁTICAS DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES*.

Renishaw. (2014). *Precision styli*.

Renishaw. (2014). *Probing systems for CNC machine tools*.

Rexroth. (2002). *Linha geral de produto Tecnologia em movimento linear*.

Ribeiro, L., Pinto, F., & Barros, P. (2014). *Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias*. Coimbra.

Ribeiro, L., Pinto, F., & Barros, P. (2014). *Desenvolvimento de sistema de medição de vibrações em máquina de simulação de avarias*. Coimbra.

sandvik. (2015). *sandvik*. Obtido de sandvik: http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/drilling/getting_started/cutting_fluid/pages/default.aspx

sferatech. (2012). Obtido de sferatech: <http://sferatech.com.br/site/guia-lineares/>

Siemens. (2016). *plm.automation.siemens.com*. Obtido de plm.automation.siemens.com:
https://www.plm.automation.siemens.com/pt_br/products/nx/for-manufacturing/machine-tool-controllers/

slideshare. (2015). Obtido de slideshare: [slideshare.net/someshking/introduction-to-cnc-machines-1](https://www.slideshare.net/someshking/introduction-to-cnc-machines-1)