



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de pós-graduação em engenharia mecânica

- Mestrado - Doutorado

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS TÉRMICOS DE MÁQUINAS-FERRAMENTA USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS.

por

Romualdo Figueiredo de Sousa

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO E
ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS TÉRMICOS DE MÁQUINAS-FERRAMENTA
USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E REDES NEURAIS
ARTIFICIAIS.

II

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO E
ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS TÉRMICOS DE MÁQUINAS-FERRAMENTA
USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E REDES NEURAIS
ARTIFICIAIS.

Por

ROMUALDO FIGUEIREDO DE SOUSA

Tese de Doutorado apresentado ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para obtenção do
grau de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva

João Pessoa - Paraíba

março-2013

S725d *Sousa, Romualdo Figueiredo de.*
 Desenvolvimento de uma metodologia para determinação e
 análise dos deslocamentos térmicos de máquinas-ferramenta
 usando o método dos elementos finitos e redes neurais artificiais/
 Romualdo Figueiredo de Sousa.- João Pessoa, 2013.
 150f. : il.
 Orientador: João Bosco de Aquino Silva
 Tese (Doutorado) – UFPB/CT
 1. Engenharia mecânica. 2. Máquinas-ferramenta. 3. Redes
 neurais artificiais. 4. Deslocamentos térmicos

UFPB/BC

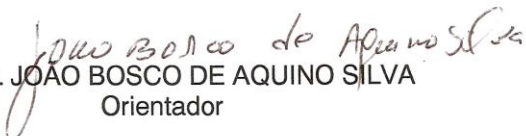
CDU: 621(043)

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS TÉRMICOS DE MÁQUINAS-FERRAMENTA USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

por

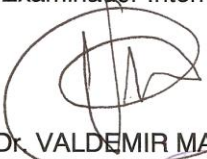
ROMUALDO FIGUEIREDO DE SOUSA

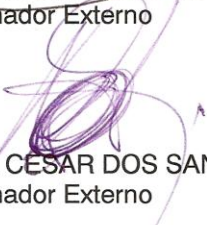
Tese aprovada em 22 de março de 2013


Prof. Dr. JOÃO BOSCO DE AQUINO SILVA
Orientador


Prof. Dr. PAULO HENRIQUE DE MIRANDA MONTENEGRO
Examinador Interno


Prof. Dr. JOSÉ HILTON FERREIRA DA SILVA
Examinador Interno


Prof. Dr. VALDEMIR MARIANO
Examinador Externo


Prof. Dr. NEILOR CESAR DOS SANTOS
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

A Deus que sempre me deu forças e sabedoria para concluir cada fase da minha vida, me renovando e me restaurando a cada dia.

A minha esposa, Cleópata Patrícia Silva, pela paciência e apoio de vencermos juntos mais esta batalha.

Aos meus pais, Espedito Ferreira de Sousa e Maria de Lourdes Figueiredo de Sousa, pela educação e assistência que me deram na minha formação.

Aos meus irmãos, Luís Denis Figueiredo de Sousa, Hilda Figueiredo de Sousa e Glória de Lourdes Figueiredo de Sousa, pelo incentivo e estímulo, acreditando que, apesar das dificuldades, eu poderia ser um vencedor.

Ao meu irmão mais velho, Carlos Antônio Figueiredo de Sousa, in memoriam, que iria se orgulhar muito de me ver com esse título.

A todos os meus colegas e amigos que de uma forma ou de outra contribuíram significativamente para que eu chegasse ao nível de Doutor.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que está acima de todas as coisas, o alfa e ômega o princípio e o fim.

Aos pastores Jailson, Clécio e Elson; as missionárias Raquel, Augusta e Marinalva, pelo apoio espiritual e pela comunhão de tantos problemas.

Aos colegas Fernando Gondim Ribeiro Júnior, Raphaell Lima, Francisco Augusto Segundo Neto, Francisco Augusto, José Kleber, José Carlo de lima Júnior.

Ao professor, João Bosco de Aquino Silva, pela orientação e ensinamentos ministrados durante todo curso, pela amizade, dedicação e apoio na realização deste trabalho.

Aos familiares que contribuíram de forma direta ou indiretamente durante os vários dias de trabalho e estudo.

Aos demais professores do curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFPB.

À todos os demais que de algum modo deram a sua contribuição para a realização deste trabalho de tese.

RESUMO

Nos processos de manufatura as máquinas-ferramenta desempenham um papel importantíssimo em particular na fabricação de peças de geometrias complexas. Atualmente as exigências por alta exatidão geométrica e dimensional durante o processo de usinagem exigem pequenas tolerâncias dimensionais. Grande parte dos erros de uma máquina-ferramenta são aqueles termicamente induzidos os quais são provenientes das fontes de calor internas e externas que agem sobre a máquina, causando assim deformações térmicas na sua estrutura. Neste trabalho, é apresentada uma metodologia para determinação e análise dos deslocamentos térmicos das máquinas-ferramenta usando o método de elementos finitos (MEF) e redes neurais artificiais (RNA). Após a modelagem da máquina, usando MEF, e a definição da localização das fontes de calor foram obtidas o gradiente de temperatura da máquina e as correspondentes deformações térmicas em períodos preestabelecidos. Resultados obtidos com simulações usando o software NX.7.5 e o princípio de medição do sistema Ballbar, mostraram que a metodologia desenvolvida é uma ferramenta eficaz na determinação das deformações térmicas da máquina, correlacionando a leitura de temperatura em pontos estratégicos com as deformações volumétricas na ponta da ferramenta. Permitindo então, a análise dos erros térmicos no par peça-ferramenta. Adicionalmente estes resultados foram usados para treinar uma RNA. Os parâmetros de “aprendizado” da rede, mediante condições de contornos transientes, permitiram o treinamento da rede. Após o treinamento e validação da rede, ela é capaz de fazer a previsão dos erros térmicos apenas informando os valores das temperaturas dos pontos específicos de cada fonte de calor. Esta metodologia desenvolvida contribuirá para os projetos de máquina-ferramentas com alto grau de exatidão e estabilidade térmica, como também permitirá a compensação dos erros termicamente induzidos.

Palavras chaves – Máquinas-ferramentas, deslocamentos térmicos, redes neurais artificiais.

ABSTRACT

In the processes of manufacturing machine tools play an important role particularly in the manufacture of parts of complex geometries. Currently the requirements for high dimensional and geometric accuracy during the machining process require small dimensional tolerances. Much of the errors of a machine tool are those which are thermally induced from the heat sources internal and external factors acting on the machine, thus causing thermal deformations in its structure. In this paper, we present a methodology for determining and analyzing the thermal deformation of machine tools using finite element method (FEM) and artificial neural networks (ANN). After modeling machine using FEM, and defining the location of the heat source were obtained the temperature gradient of the machine and the corresponding thermal deformation at predetermined periods. Results obtained with simulations using the software NX.7.5 and the measurement principle of the Ballbar system, showed that this methodology is an effective tool in determining the thermal deformation of the machine, correlating the temperature reading at strategic points with volumetric deformation at the tool tip. Allowing then the thermal analysis of the errors in the pair tool part. Additionally, these results were used to train an ANN. The parameters of "learning" network under conditions of transient contours, allowed the network training. After training and validation set, she will be able to make the prediction of thermal errors just stating the temperature values of specific points of each heat source. This methodology will contribute to the designs of machine tools with high accuracy and thermal stability, but also provide for compensation of thermally induced errors.

Key words: Thermal deformation, machine tool, finite element method, Artificial Neural Network.

VIII

SUMÁRIO

1.1-INTRODUÇÃO	1
1.2-OBJETIVO GERAL	3
1.3-OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4-ESTRUTURA DA TESE	4
2-FUNDAMENTOS PARA ANÁLISE DAS MÁQUINAS-FERRAMENTA	5
2.1 - ERROS DAS MÁQUINAS FERRAMENTAS	5
2.2-ERROS GEOMÉTRICOS	6
2.3-ERROS TÉRMICOS	7
2.4-FUNDAMENTOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR	11
2.4.1-Condução	11
2.4.2-Convecção	12
2.4.3-Radiação.	12
2.5-DESLOCAMENTO TÉRMICO	12
2.6-CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	15
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1-PROGRESSO DA PESQUISA DOS ERROS TÉRMICOS	17
3.2 - PESQUISAS DOS ERROS TÉRMICOS EM ORDEM CRONOLÓGICA	17
3.2.1-Pesquisas recentes na análise dos deslocamentos térmicos em máquinas-ferramentas	45
3.4-CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	50
4-APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS TÉRMICOS DE MÁQUINAS-FERRAMENTA	53
4.1-INTRODUÇÃO	53
4.2-CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	53
4.2.1 Análise térmica utilizando método dos elementos finitos	55
4.3-SISTEMA DE MEDIÇÃO BALL BAR	55
4.4-ANÁLISE EM MEF USANDO UM BALLBAR VIRTUAL	58

4.5- CONSIDERAÇÕES DA PRIMEIRA ANALISE EM ESTADO PERMANENTE DE TEMPERATURA	58
4.5.1-Aplicação de um Ballbar virtual usando MEF	61
4.5.2-Maquina-ferramenta com ferramenta cônica	71
4.5.3-Análise dos deslocamentos térmicos para estado permanente de temperatura no período de 1h	72
4.6-ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS TÉRMICOS PARA UM PERÍODO DE OITO HORAS NO ESTADO PERMANENTE DE TEMPERATURA.	75
4.7-ANÁLISES DOS DESLOCAMENTOS TÉRMICOS PARA UM PERÍODO DE OITO HORAS NO ESTADO TRANSIENTE DE TEMPERATURA	80
4.7.1-Análise de deslocamento térmico de pontos específicos no estado transiente de temperatura	87
4.7.1.1 Análise para o caso A	91
4.7.1.2 Analise para o caso B	93
4.7.1.3 Análise para o caso C	96
4.8 COMPARATIVO ENTRE O ESTADO PERMANENTE E O ESTADO TRANSIENTE DE TEMPERATURA	98
4.9 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	99
5- APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DOS DELOCAMENTOS TÉRMICOS DE MÁQUINAS-FERRAMENTA	102
5.1-INTRODUÇÃO	102
5.2- DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE REDES NEURAIS	102
5.2.1 Desenvolvimento de uma RNA para o aprendizado individual de cada eixo ao longo do tempo, no estado permanente de temperatura.	103
5.2.1.1 Desenvolvimento de uma RNA para o aprendizado simultâneo dos eixos em função das leituras dos termopares no estado permanente de temperatura.	114
5.2.2 Análise dos resultados para Fontes de calor constantes com correções	117
5.3-APRENDIZADO DA RNA PARA OS TRÊS EIXOS SIMULTANEAMENTE NO O ESTADO TRASIENTE DE TEMPERATURA.	120

5.3.1 Validação da RNA para os três eixos no caso transiente	123
5.3.2 Correções para o caso transiente	125
5.4-SÍNTESE DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA	128
5.5-CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	129
6-CONCLUSÕES	131
6.1 CONCLUSÕES FINAIS	131
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	132
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
APÊNCICE A	144
APÊNCICE B	147

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Direção dos movimentos considerados	7
Figura 2.2 – Diagrama dos efeitos térmicos	9
Figura 2.3 – Exemplos do deslocamentos termicamente induzidas na fresadora	9
Figura 2.4 – Deslocamentos e rotações no ponto (x,y,z) relativos ao sistema fixo de coordenadas x-y-z e sujeito a um gradiente de temperatura constante	13
Figura 2.5 – Deslocamento na extremidade devido a um fluxo de calor uniforme especificado através de uma barra sólida. (Modificado de HOLMAN, 1976)	14
Figura 3.1 – Localizações dos sensores óticos na coluna da máquina (Modificado de YUAN et al, 1998)	19
Figura 3.2 – Diagrama de blocos do esquema de compensação de erro	20
Figura 3.3- Relação entre os fatores afetados nos estados térmicos da máquina ferramenta	23
Figura 3.4 - Modelo em elemento finito da estrutura geométrica de uma máquina-ferramenta	23
Figura 3.5 – A montagem dos termopares no centro de usinagem	24
Figura 3.6 - Campo de temperatura sob diferentes condições	25
Figura 3.7 - Sistema de controle e compensação de erro em tempo real	27
Figura 3.8 – Diagrama de blocos do esquema de compensação de erro	29
Figura 3.9 – Diagrama esquemático do centro de usinagem, mostrando a localização dos termopares	31
Figura. 3.10 - Definição dos cinco eixos(X,Y,Z, A, B) da fresadora	33
Figura-3.11- Set up experimental.	33
Figura 3.12 – Layout dos artefatos	36
Figura 3.13 – Configuração do sistema de inspeção	42
Figura 3.14 - Desenho original da máquina e modelo prático em elementos finitos com alguns termopares	46

Figura 3.15- Elementos estruturais da máquina-ferramenta analisada com suas respectivas deslocamentos (δ) ao longo do tempo(t)	49
Figura 4.1- Ballbar telescópico	56
Figura 4.2- Demonstração do uso do Ballbar	56
Figura 4.3- Centro de usinagem tipo coluna	57
Figura 4.4- Plotagem dos dados do sistema Ball Bar da máquina tipo coluna	57
Figura 4.5- Centro de usinagem tipo coluna redesenhada no ambiente do NX.	58
Figura 4.6- Centro de usinagem tipo coluna redesenhada em MEF	59
Figura 4.7- Análise estrutural para 3600s, base engastada.	59
Figura 4.8a- Análise térmica para 0s	60
Figura 4.8b- Análise térmica para 0s	60
Figura 4.9- Pontos do Círculo base analisados	61
Figura 4.10- Medidas da distância de um ponto fixo à base circular	61
Figura 4.11- Medidas entre um ponto fixo e os demais pontos restantes do círculo base.	62
Figura 4.12- Leitura de um ponto fixo próximo ao centro e os demais pontos	62
Figura 4.13- Gráficos das deformações do Cb para três tempos distintos	65
Figura 4.14- Gráfico dos deslocamentos do Cb para três tempos distintos com símbolos	65
Figura 4.15- Deformações dos 15 pontos mais circunferência de referência	66
Figura 4.16-Gráfico de resolução de 5mm para o Cb com e sem deslocamentos térmicos.	67
Figura 4.17- Gráfico de resolução de 5mm para o Cb com deslocamentos térmicos	67
Figura 4.18- Gráfico no padrão do sistema Ballbar real	68
Figura 4.19- Comparação entre dos círculos de forma normalizada p/ 3240s	69
Figura 4.20- Comparação entre dos círculos de forma normalizada p/ 3600s	69

XIII

Figura 4.21- Comparação entre dos μ círculos de forma normalizada p/ 2160s	70
Figura 4.22- Máquina-ferramenta redesenhada com os pés e uma ferramenta	71
Figura 4.23- Ballbar virtual medindo a distância da ponta da ferramenta e o nó no círculo base	72
Figura 4.24- Variação da distância do PF ao Ccb durante o tempo analisado	72
Figura 4.25- Deformação do eixo X em (μm) ao longo do tempo	73
Figura 4.26- Deformação do eixo Y ao longo do tempo	73
Figura 4.27- Deformação do eixo Z ao longo do tempo	74
Figura 4.28- Deformações nos eixos X, Y e Z em relação a ponta da ferramenta	74
Figura 4.29- Distribuição dos termopares na estrutura da máquina	75
Figura 4.30- Termopares nas bombas de óleo e fluido refrigerante.	76
Figura 4.31- Condições de contornos térmicas	77
Figura 4.32- Condições de contornos térmicas nas bombas de óleo e refrigeração	77
Figura 4.33-Curvas dos oitos termopares estado permanente	78
Figura 4.34- Distância da ponta da ferramenta ao círculo base p/ 8h	79
Figura 4.35- Variação da distância da ponta da ferramenta ao círculo base p/ 8h	79
Figura 4.36- Comportamento três dos eixos simultaneamente-Estado permanente	80
Figura 4.37- Gráfico das funções de temperatura pelo tempo considerado	84
Figura 4.38- Curvas das simulações dos termopares durante o período de análise.	84
Figura 4.39- Leitura dos termopares e das deformações no eixo X ao longo do tempo	85
Figura 4.40- Leitura dos termopares e das deformações no eixo Y ao longo do tempo	86
Figura 4.41- Leitura dos termopares e das deformações no eixo Z ao longo do tempo	87
Figura 4.42- Erro em função da distância do ponto 1 ao 2 e do 2 aos demais pontos considerados para o instante de 30 min.	90

XIV

Figura 4.43- Erro em função da distância do ponto 1 ao 2 e do 2 aos demais pontos considerados para o instante de 6h.	90
Figura 4.44- Distâncias de um ponto fixo no círculo base (P3, nó 3228) em relação aos demais pontos da circunferência.	91
Figura 4.45- Erros térmicos do P3 em relação aos demais pontos da circunferência.	91
Figura 4.46- Simetria dos erros em relação à distância (caso A).	92
Figura 4.47- Retas que delimitam a margem de erro para o caso A.	93
Figura 4.48- Leitura de um ponto fixo próximo ao centro e os demais pontos	93
Figura 4.49- Erros térmicos de um ponto próximo ao centro em relação aos demais pontos da circunferência.	94
Figura 4.50- Simetria dos erros em relação à distância (caso B).	94
Figura 4.51- Retas que delimitam a margem de erro para o caso B.	95
Figura 4.52- Distância da ponta da ferramenta (nó 1692 ou “PF”), ao ponto próximo ao centro do círculo base (nó 1652, ou Ccb) e aos demais pontos da circunferência.	96
Figura 4.53- Distância e erro volumétrico entre todos os pontos considerados	96
Figura 4.54- Simetria dos erros de todos os pontos considerados.	97
Figura 4.55- Retas que delimitam a margem de erro para todos os casos.	98
Figura 4.56- Gráficos Comparativos para as condições de contornos variável e constante.	99
Figura 5.1- Deformação volumétrica, com as fontes de calor constantes.	103
Figura 5.2- Topologia da RNA mostrada no MatLab	104
Figura 5.3- Deformação da ponta da ferramenta no eixo X ao longo do tempo	105
Figura 5.4- Curva real mais curva aleatória para o eixo X	106
Figura 5.5- Curva dos deslocamentos eixo X mais curva de aprendizado da rede	106
Figura 5.6- Erro quadrático médio para o eixo X	108
Figura 5.7- Deslocamentos térmicos do eixo Y ao longo do tempo	109

Figura 5.8- Deslocamentos do eixo Y mais curva aleatória.	109
Figura 5.9- Deslocamento simulado do eixo Y mais curva de aprendizado da rede.	110
Figura 5.10- Erro quadrático médio do eixo Y ao longo do tempo.	111
Figura 5.11- Deslocamentos no eixo Z	111
Figura 5.12- Deslocamentos no eixo Z mais curva aleatória.	112
Figura 5.13- Deslocamento do eixo Z mais aprendizado da rede.	112
Figura 5.14- Erro quadrático médio em micrometro para o eixo Z	113
Figura 5.15- RNA para os três eixos-Estado permanente.	114
Figura 5.16- Deformação volumétrica em função da temperatura-Estado permanente.	115
Figura 5.17: Gráfico da performance da RNA do aprendizado	116
Figura 5.18- Validação da RNA para os três eixos, fontes de calor constantes.	117
Figura 5.19- Correções no eixo X ao longo do tempo	118
Figura 5.20- Correções no eixo Y ao longo do tempo	119
Figura 5.21- Correções no eixo Z ao longo do tempo	119
Figura 5.22- RNA para os três eixos-Estado transiente	120
Figura 5.23- Aprendizado da rede neural artificial para 57 iterações.	121
Figura 5.24- Aprendizado da rede neural artificial para 109 iterações.	121
Figura 5.25- Aprendizado da rede neural artificial para 170 iterações	122
Figura 5.26- Validação da RNA- Caso transiente	124
Figura 5.27-Correção do eixo X, caso transiente.	125
Figura 5.28- Correção do eixo Y, caso transiente.	126
Figura 5.29- Correção do eixo Z, caso transiente.	126
Figura 5.30- Correção volumétrica para os eixos	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Localização dos termopares na máquina	26
Tabela 3.2- Monitoração e localização do erro térmico através de cada termopar	35
Tabela 5.1- Amostra de pontos de aprendizado da RNA para o eixo X-Estado permanente	107
Tabela 5.2- Amostra de aprendizado da RNA para o eixo Z - Estado transiente	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Área da superfície
AEF	Análise em Elemento Finitos
a	Coordenada do centro da circunferência em relação a x
b	Coordenada do centro da circunferência em relação a y
CNC	Comando Numérico Computadorizado
C	Calor específico
$\varepsilon_x(x)$	Erro rotacional sobre o eixo x (roll)
$\varepsilon_y(x)$	Erro rotacional sobre o eixo y (pitch)
$\varepsilon_z(x)$	Erro rotacional sobre o eixo z (yaw)
$\delta_x(x)$	Erro de posicionamento ao longo do eixo x
$\delta_y(x)$	Erro de retitude ao longo do eixo y
$\delta_z(x)$	Erro de retitude ao longo do eixo z
q_x''	Taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área (W/m^2)
dT/dx	Gradiente de temperatura na direção x.
k	Condutividade térmica (W/m.K)
$\dot{q}$	Taxa de geração de energia interna por unidade de volume (W/m^3)
$\gamma C_p \frac{\partial T}{\partial t}$	Taxa de variação com o tempo da energia sensível do meio por unidade de volume ($\text{J/m}^3.\text{s}$)
q''	Fluxo de calor por convecção (W/m^2), temperaturas da superfície e do fluido
T_s	Temperaturas da superfície
T_∞	Temperatura do fluido respectivamente.
h	Chamado transferência de calor por convecção ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$).
ε	Emissividade da superfície (em relação ao corpo negro)
α_1	Absortividade
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) para um radiador ideal ou corpo negro ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

XVIII

En	Limite superior do poder emissivo (W/m^2)
G	Taxa na qual todas as radiações incidem sobre uma área unitária da superfície por irradiação.
α/k	Razão de expansão térmica pela condutividade
δ_i	Deslocamento na direção considerada
L	Comprimento
i	Direção considerada x , y ou z
α_2	Coeficiente de expansão térmica
q_i	Fluxo de calor na direção considerada
Δt	Intervalo de tempo necessário
ρ	Densidade do material
Δx	Variação da distância considerada.
MTH	Matriz de Transformação Homogênea
MEF	Método dos Elementos Finitos
$[N]^i$	Matriz das funções de forma
$\{T\}^i$	Temperatura para cada nó
RN	Rede Neural
RNA	Rede Neural Artificial
r	Raio da circunferência
a	Coeficiente angular
b	Termo independente da Reta.
j	Número de retas plotadas no plano considerado
x	Faixa de trabalho considerada
k	Números de escalas em cada reta
i	Número de intervalos dos ângulos para cada arco considerado.
Cb	Círculo base
Ccb	Centro do círculo base
x_1	Coordenada x do ponto central do círculo base

XIX

y_1	Coordenada y do ponto central do círculo base
z_1	Coordenada z do ponto central do círculo base
x_2, y_2 e z_2	Coordenadas da ponta da ferramenta somadas as suas respectivas deformações.
T_m	Temperatura ambiente;
T	Temperatura do corpo no instante t ;
k	Constante de proporcionalidade
$T_l(t_i)$	Temperatura local de cada fonte de calor no instante t_i
$T_{(\infty)}$	Temperatura no estado permanente;
C_j	Constante encontrada a partir das condições de contornos iniciais e finais
k_j	Constante de tempo encontrada para cada fonte de calor na unidade de tempo (s).
t_i	Tempo em (s) de cada instante a considerar de acordo com o transiente de temperatura.
T_b	Temperatura na base da peça (próximo a T1),
T_f	Temperatura no porta ferramenta (próxima a ferramenta, T3),
T_{mi}	Temperatura no mancal inferior (próximo a ferramenta T3),
T_{ms}	Temperatura no mancal superior (próximo a T4)
T_Ms	Temperatura no motor da extremidade (próximo a T5)
T_{Mm}	Temperatura motor da mesa (próximo a T6)
T_{b1}	Temperatura motor bomba 1(próximo a T7),
T_{b2}	Temperatura motor bomba 2 (Próximo a T8)
$[T]$	Matriz linha dos termopares
x_1	Coordenada x do ponto de origem.
x_2	Coordenada x do ponto final.
y_1	Coordenada y do ponto de origem.
y_2	Coordenada y do ponto final.
z_1	Coordenada z do ponto de origem.
z_2	Coordenada z do ponto final.
D_n	Distância nominal de cada ponto de origem a cada ponto final.
$dx_1(i)$	Deslocamento em x do ponto de origem no instante i .
$dx_2(i)$	Deslocamento em x do ponto final no instante i .

$dy1(i)$	Deslocamento em y do ponto de origem no instante i .
$dy2(i)$	Deslocamento em y do ponto final no instante i .
$dz1(i)$	Deslocamento em z do ponto de origem no instante i .
$dz2(i)$	Deslocamento em z do ponto final no instante i .
Dxi	Distância no eixo x do ponto de origem ao ponto final mais as suas respectivas deformações no instante i .
Dyi	Distância no eixo y do ponto de origem ao ponto final mais as suas respectivas deformações no instante i .
Dzi	Distância no eixo z do ponto de origem ao ponto final mais as suas respectivas deformações no instante i .
Dn	Distância nominal de cada ponto de origem a cada ponto final
Dmi	Distancia medida após as deformação nos eixos x, y e z no instante i .
Ei	Erro volumétrico entre a distância nominal e a distância medida após os deslocamento em cada instante i .
x	É a distância nominal entre dois pontos em mm.
ya	Margem de erro volumétrico para este caso A.
yb	Margem de erro volumétrico para este caso b.
yc	Margem de erro volumétrico para este caso C.
RNA	Rede Neural Artificial
RNAMCs	Rede Neural Artificial Multi-Camadas
yk	Sinal de saída da rede
dk	Resposta deseja da Rede
$\xi(n)$	Função de índice de desempenho
τ	Taxa de aprendizado da rede
wkj	Peso sináptico entre o neurônio k de uma camada intermediária e o neurônio j da camada posterior
Δw_{kj}	Variação dos pesos sinápticos.
dk	Saída desejada do neurônio k
yk	Saída atual do neurônio k
i	Índice do neurônio da camada intermediária em que se deseja calcular o erro

j	Índice do neurônio da camada posterior
e_i	Erro do neurônio i pertencente a camada intermediária em que se deseja calcular o erro;
y_i	Saída atual do neurônio i ;
p_{ij}	Pesos sinápticos entre o neurônio i de uma camada intermediária e o neurônio da camada j posterior.
w_i	Os pesos para cada iterações
t_j	Matriz de entrada da rede para cada j elemento.
b_i	Bias ou (threshold) de cada neurônios para as n iterações.
$\{t_j(1,i)\}$	Matriz linha formada da leitura de cada tempo de análise.
$\{T_j(1,i)\}$	Matriz linha de cada termopar j para cada incremento i .
$[D_x]$	Matriz linha de cada deslocamento no eixo X para cada incremento i .
$[D_y]$	Matriz linha de cada deslocamento no eixo Y para cada incremento i .
$[D_z]$	Matriz linha de cada deslocamento no eixo Z para cada incremento i .

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1-INTRODUÇÃO

A influência da variação de temperatura em máquinas-ferramenta é um fenômeno físico, que não pode ser completamente eliminada. No entanto, deve ser monitorado e incluído no processo de desenvolvimento da máquina. Os efeitos indesejáveis do calor e principalmente fluxo de calor, são representados por alterações geométricas e o volume estrutural da máquina. Estas alterações provocam um movimento relativo indesejado entre a ferramenta e a peça de trabalho, o que pode influenciar negativamente nas tolerâncias especificadas durante a usinagem ou na exatidão. Mecanismos de compensação são exaustivamente estudados para tentar diminuir os efeitos térmicos (VYROUBAL, 2012). Os erros térmicos ainda são um dos principais fatores que afetam a precisão das máquinas-ferramentas. Pesquisadores têm investigado as influências de erros térmicas na exatidão das máquinas-ferramenta e busca de soluções para reduzir estes erros durante décadas (JIE ZHU, 2008). Abordagens referentes à eliminação dos erros térmicos incluem: redução e relocação das fontes de calor e rearranjo da máquina-ferramenta, estrutura para conseguir robustez térmica, e o uso de materiais com maior resistência térmica. O controle da temperatura ambiente também é utilizado na redução dos erros térmicos, porque o ambiente de trabalho possui flutuações de temperatura e é uma das perturbações de calor importantes. Para a implementação da compensação do erro térmico.

Para atender a essa necessidade, de uma maior precisão de fabricação de peças e outros dispositivos, os construtores de máquinas-ferramentas melhoraram muito o desempenho de seus centros de usinagem. No entanto, os erros dimensionais e térmicos que surgem devido a variações de temperatura, que distorcem vários componentes da máquina-ferramenta, definida como erros térmicos, representam a maioria da perda de precisão de fabricação em máquinas-ferramenta termicamente não compensadas (CREIGHTON et al, 2010).

Atualmente com o grande avanço da tecnologia em todas as áreas do conhecimento, com destaque para a micro e nano eletromecânica, surge a necessidade de máquinas-ferramenta com um elevado nível de exatidão dos componentes, para garantir uma usinagem com alto grau de exatidão e controle dos parâmetros das possíveis causas de erros, provenientes do próprio projeto da máquina ou inerentes ao processo de usinagem, que alteram na ordem de micro ou nano as dimensões das peças usinadas, como também, os elementos das máquinas-ferramenta, que já trabalham com altas velocidades de corte, para garantir a produtividade.

As máquinas-ferramenta CNC possuem um controlador numérico que permite o controle da máquina que é utilizado principalmente em tornos e centros de usinagens. Assim é possível controlar simultaneamente vários eixos, por meio de uma lista de movimentos escrita num código específico (código G). O "Comando" funciona como um sistema operacional dos computadores, gerenciando uma máquina CNC, e possibilitando a comunicação com o operador/programador.

A introdução do CNC na indústria mudou radicalmente os processos industriais. Curvas complexas são facilmente cortadas, estruturas com 3 dimensões tornam-se relativamente fáceis de produzir e o número de passos no processo com intervenção de operadores é drasticamente reduzido. O CNC reduziu também o número de erros humanos (o que aumenta a qualidade dos produtos e diminui o retrabalho e o desperdício), agilizou as linhas de montagens e tornou-as mais flexíveis, pois a mesma linha de montagem pode ser adaptada para produzir outro produto num tempo muito mais curto do que com os processos tradicionais de produção. Acompanhando o desenvolvimento tecnológico da informática e a tendência por uma interatividade cada vez maior com o usuário, o código e a linguagem de máquina também evoluíram. Esta tecnologia se estende até hoje, possibilitando a criação de máquinas-ferramenta (MF) com altas velocidades de corte ou (High Speed Machine, HSM), que aumentou ainda mais a produtividade e é bastante usada nas indústrias aeronáutica e automotiva.

Apesar da alta tecnologia envolvida nas MF, elas geram erros durante o processo de usinagem como já descritos anteriormente, estes erros são provenientes dos erros geométricos e/ou erros térmicos, devido ao projeto da máquina ou calor gerado durante o processo de usinagem, como também o atrito proveniente dos movimentos relativos dos vários elementos existentes nas máquinas-ferramenta.

O principal motivo para os erros dimensionais e geométricos em produção de peças de trabalho nas MF, inclui leis da estática rígida na estrutura das máquinas, desempenho da lei dinâmica de alimentação dos acionamentos usados e deformações térmicas na ferramenta e na peça (WECK et al,1995).

No sentido de aumentar a exatidão de peças usinadas por máquinas-ferramenta CNCs de alta velocidade de corte, através da compensação das deformações, causadas pelas variações térmicas durante o processo, que transforma a energia da usinagem em energia térmica e se propaga na forma de condução, convecção e radiação, sendo esta última desprezada e a concentração dos estudos normalmente se faz apenas na condução e na convecção ou levando apenas em consideração as deformações resultantes de acordo com as fontes de calor envolvidas na máquina.

É importante destacar que é imprescindível o desenvolvimento de metodologias capazes de analisar e avaliar o desempenho das máquinas-ferramenta de alta exatidão e alta velocidade de corte, no que diz respeito aos efeitos das deformações térmicas, sendo esta portanto, a principal motivação do projeto de pesquisa e proposta deste trabalho de tese.

Neste trabalho de tese pretende-se também contribuir para o aumento da exatidão em máquinas-ferramenta, por meio de uma metodologia desenvolvida a partir da análise pelo Método de Elementos Finitos e Redes Neurais Artificiais, que servirá para facilitar a identificação dos deslocamentos térmicos durante o processo de usinagem, simulando a leitura de termopares distribuídos ao longo da máquina com os respectivos deslocamentos térmicos ocorridos na extremidade de uma ferramenta.

1.2-OBJETIVO GERAL

Desenvolver e implementar uma sistemática para determinação e análise dos deslocamentos térmicos de máquinas-ferramenta usando o método dos elementos finitos (MEF) e redes neurais artificiais (RNA) a partir dos valores das temperaturas e dos deslocamentos térmicos em pontos estratégicos da máquina-ferramenta.

1.3-OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Identificar e analisar os erros térmicos por meio de simulações usando MEF para alimentar e treinar uma rede neural artificial;

- b) A partir de uma rede neural artificial devidamente treinada obter os deslocamentos térmicos da máquina-ferramenta em função das temperaturas de pontos estratégicos da máquina.
- c) Contribuir para atender as tolerâncias dimensionais e geométricas das peças usinadas em máquinas-ferramenta;
- d) Otimizar projetos de máquinas-ferramenta, fazendo uso da tecnologia CAE/CAD, com ênfase nos deslocamentos térmicos.

1.4-ESTRUTURA DA TESE

A estrutura deste trabalho de tese foi desenvolvida da seguinte forma:

No capítulo II, é mostrada a fundamentação dos erros térmicos e geométricos, as fontes de erros como também a fundamentação de transferência de calor.

No capítulo III, é apresentada a revisão bibliográfica das principais técnicas utilizadas para análise da performance das máquinas-ferramenta e da compensação dos seus erros no intuito de aumentar a exatidão destas máquinas.

No capítulo IV, é exposto uma breve introdução ao Método dos Elementos Finitos (MEF), mostrando as suas vantagens no uso da tecnologia CAD/CAM utilizando o software NX-7.5, para identificação de problemas de projetos e de comportamento térmico da máquina-ferramenta analisada, assim como o desenvolvimento de uma metodologia baseada em um sistema de medição chamado Ballbar que será implementado nas simulações de forma análoga, para verificação dos deslocamentos térmicos como uma ferramenta de medição virtual.

No capítulo V, é apresentado a aplicação das redes neurais artificiais na determinação e análise dos deslocamentos térmicos da máquinas-ferramenta analisada, mostrando uma fundamentação e aplicação das RNAs, por meio dos programas implementados no ambiente do MatLab 7.10.0 (R2010a).

No capítulo VI, é mostradas as conclusões finais, resumo da metodologia empregada, bem como a contribuição deste trabalho de tese para o aumento da exatidão em máquinas-ferramenta e as perspectivas e sugestões para trabalhos futuros usando a metodologia desenvolvida neste trabalho de tese.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS PARA ANÁLISE DAS MÁQUINAS-FERRAMENTA

2.1 - ERROS DAS MÁQUINAS-FERRAMENTA

Os erros de uma máquina-ferramenta são separados em duas categorias, os erros repetitivos e os não repetitivos (POLLI, 2005). Uma máquina-ferramenta é considerada repetitiva, mas não necessariamente exata, quando se deslocar uma ferramenta de corte à mesma posição relativa com relação à peça toda vez que for comandada para fazê-lo.

Pode parecer que a ideia de que existam erros repetitivos e não-repetitivos seja inconsistente com o princípio determinístico. Particularmente, um erro aparentemente não repetitivo simplesmente pode não estar relacionado a uma fonte de erros conhecida e esta fonte de erro não estará sob controle.

Erros aparentemente não repetitivos possuem fontes que podem ser identificadas, por exemplo, correlacionando os movimentos de uma máquina com mudanças de temperatura no ambiente. Uma vez identificado esse problema, várias ações podem ser tomadas para diminuí-los. Um erro sistemático em particular pode ser identificado entre outros erros. Isso requer a realização de testes que sejam sensíveis para determinados tipos de erros e insensíveis a outros, ou pela eliminação das parcelas dos demais erros através de modelos conhecidos. A separação das parcelas de cada erro requer a realização de calibrações e uma correta manipulação dos resultados obtidos.

Para organizar melhor os erros, (SLOCUM, 1991, apud POLLI et al, 2005) os dividiu em duas categorias principais, os erros mecânicos quase estáticos e os erros causados por forças dinâmicas. Os erros quase estáticos são erros na máquina, sistema de fixação, ferramenta e peça, que ocorrem lentamente. Isso quer dizer que eles ocorrem

numa frequência muito mais baixa do que a banda de movimento que os eixos das máquinas podem utilizar para corrigi-los. Alguns dos erros possuem períodos de horas e até anos, como a fluência em alguns materiais (POLLI, 2005). As fontes desses tipos de erros incluem:

- a) Erros geométricos;
- b) Erros cinemáticos;
- c) Erros induzidos por carregamento externo;
 - 1-Erros causados por carga gravitacional;
 - 2-Erros causados pela aceleração dos eixos;
 - 3-Erros causados pelas forças de corte;
- d) Erros induzidos por carregamentos na montagem da máquina;
- e) Erros causados por expansão térmica;
- f) Erros causados por instabilidade do material;
- g) Erros de instrumentação.

Dentre todos esses erros merecem destaques os erros geométricos e os erros térmicos como pode-se observar na próximas seções.

Os erros causados por forças dinâmicas provocam vibrações na máquina que refletem diretamente no acabamento das peças produzidas. Esses erros possuem como principais fontes:

- a) Vibrações transmitidas pelo piso;
- b) Componentes mecânicos rotativos como motores e transmissões;
- c) Mancais rotativos;
- d) Ciclos limites em *loops* dos Servos;
- e) Turbulência nas linhas de alimentação de fluidos;
- f) Pressão sonora;
- g) Instabilidade aerostática em mancais a ar (martelamento pneumático).

2.2-ERROS GEOMÉTRICOS

Dos erros apresentados, os geométricos que aparecem em todos os componentes individuais da máquina podem ser afetados por diversos fatores, como:

- a) Planeza das superfícies;

- b) Rugosidade das superfícies;
- c) Pré-carregamento dos mancais;
- d) Critérios do projeto elástico versus cinemático;
- e) Filosofias de projeto estrutural.

Como exemplo pode-se citar um centro de usinagem vertical de três eixos, ou seja, seis graus de liberdade. Possui 21 componentes de erros geométricos (OKAFOR et al.,1999), os quais são:

- a) Três erros de posicionamento linear;
- b) Seis erros de retitude;
- c) Nove erros angulares;
- d) Três erros de ortogonalidade entre os eixos.

Considerando a direção de movimento x , como mostrado na fig.2.1, tem-se:

- a) Erro rotacional sobre o eixo x (roll) - $\epsilon_x(x)$
- b) Erro rotacional sobre o eixo y (pitch) - $\epsilon_y(x)$
- c) Erro rotacional sobre o eixo z (yaw) - $\epsilon_z(x)$
- d) Erro de posicionamento ao longo do eixo x - $\delta_x(x)$
- e) Erro de retitude ao longo do eixo y - $\delta_y(x)$
- f) Erro de retitude ao longo do eixo z - $\delta_z(x)$

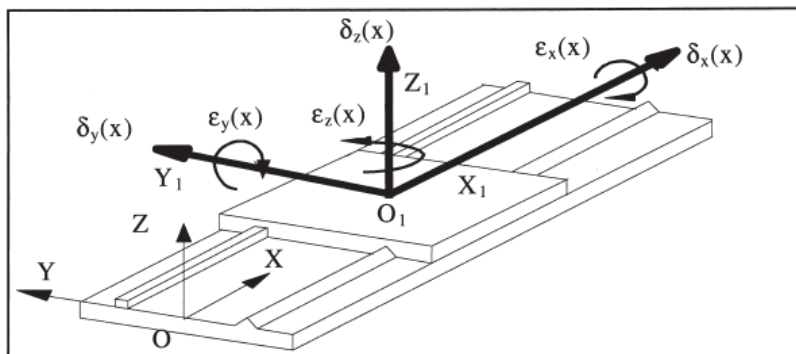


Figura 2.1- Direção dos movimentos considerados (Modificado OKAFOR et al,1999)

2.3-ERROS TÉRMICOS

De todos os erros apresentados, uma atenção especial é dada neste trabalho aos erros térmicos. Os erros térmicos são aqueles que provocam efeitos das deformações

relativas entre a peça de trabalho e a ferramenta, no relato das deformações ou na expansão dos elementos de máquinas, devido ao acréscimo de suas temperaturas. O movimento relativo entre os vários elementos de máquinas geram calor nas zonas de contatos e este calor contribui para deformação de tais elementos.

Existem várias fontes nas MF, que contribuem para a geração de calor e consequentemente para os erros térmicos ou erros termicamente induzidos. Segundo Week, (1984), as fontes de calor numa máquina-ferramenta podem ser divididas em fontes externas e fontes internas.

As fontes externas de calor são:

- a) Temperatura de objetos ao redor da máquina diferente da temperatura da máquina, unidades de refrigeração, paredes aquecidas, outras máquinas, etc.
- b) Irradiação solar;
- c) Temperatura do meio ambiente que possa alterar a temperatura da máquina (ar, fluidos refrigerantes, lubrificantes, etc.);

As fontes internas de calor são:

- a) Transmissão dos motores elétricos;
- b) Atritos nos acionamentos e caixas de engrenagens;
- c) Atrito nos mancais e guias;
- d) Processo de usinagem (ação de corte, cavacos, peça).

Os efeitos dessas fontes de calor são mostrados nas figuras 2.2 e 2.3. As variações térmicas na exatidão de usinagem podem ser determinadas analisando-se o comportamento da geometria e cinemática da máquina considerada, e a distribuição de temperatura, sobre toda máquina. Além dos erros já mencionados, surgem alguns outros erros não só em função da temperatura que se desenvolve ao longo do eixo-arvore, mas também ao longo do tempo (BRYAN, 1990), (LIANG, 1997), (WECK, 1984).

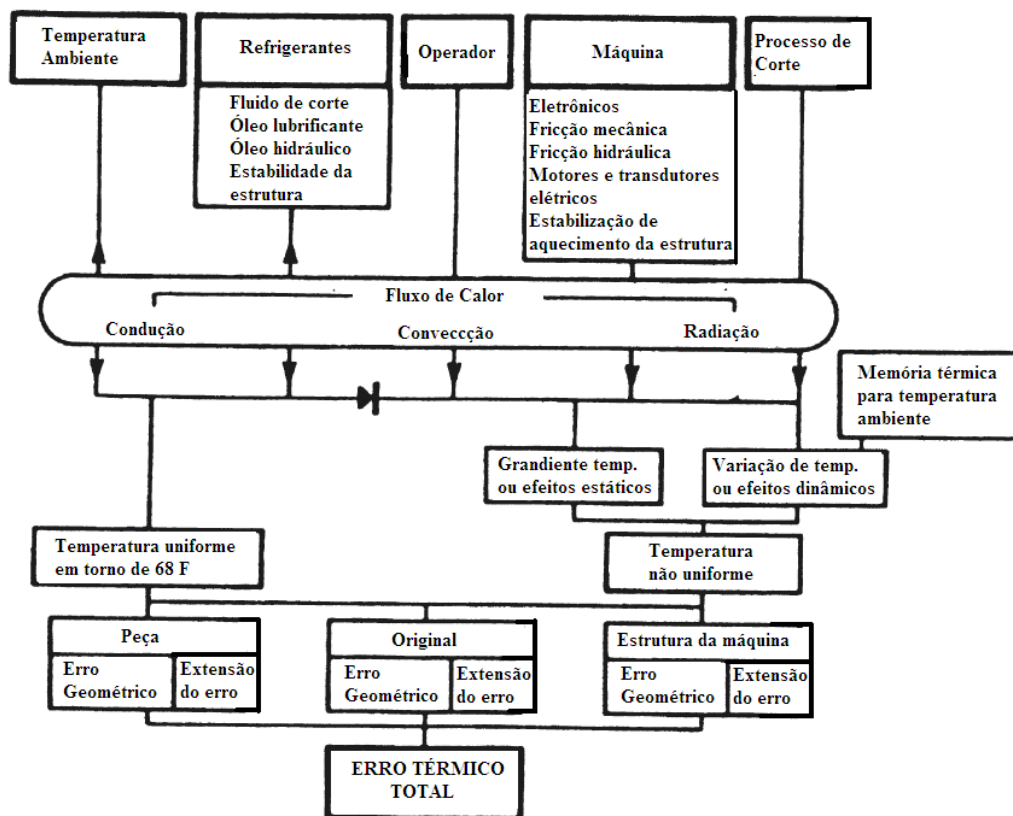


Figura 2.2 – Diagrama dos efeitos térmicos (Modificado de BRYAN , 1990)

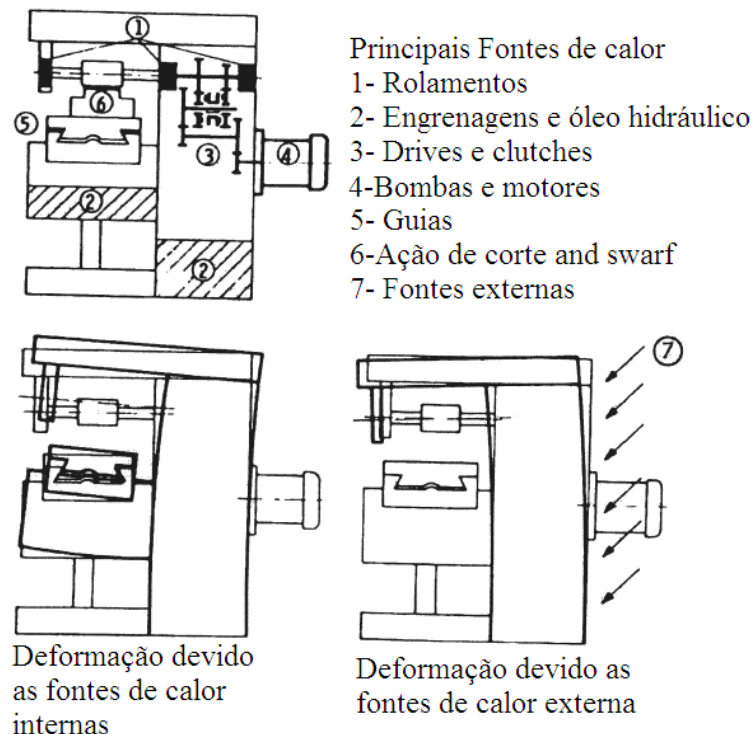


Figura 2.3 – Exemplos de deformações termicamente induzidas na fresadora (Modificado de WECK M., 1984)

Em tais fontes existem as três formas de transferência de calor, condução, convecção e radiação. Essas formas de energia, que interferem diretamente nas propriedades físicas dos materiais das máquinas-ferramenta, provocam consequentemente deformações térmicas, provenientes da expansão térmica dos materiais, tanto da MF como da peça usinada e que influenciam na exatidão e qualidade do processo de usinagem.

Em geral os erros térmicos, ainda podem ser divididos em duas categorias:

Na primeira categoria estão aqueles erros que mudam em função da temperatura, mas não a posição do eixo. Esses erros efetivamente mudam os zeros da máquina e são conhecidos como Erros Térmicos de Posição Independente (ETPI). A segunda categoria dos erros trata dessas mudanças como uma função da posição do eixo, bem como, da temperatura. Eles efetivamente alteram o posicionamento linear da máquina e são conhecidos como Erros Térmicos Dependente da Posição (ETDP). Na simplificação do problema e determinando a técnica mais adequada de compensação, ela é útil para definir essas categorias de erros térmicos. O efeito do ETPI na componente de precisão é firmemente dependente da razão de mudança do ETPI relativo no tempo para chegar a produzir um componente. Mesmo que a grande mudança em um ETPI, o tempo que leva para usinar um componente (RAMESH et al, 2000).

Ao analisar o comportamento da estrutura da máquina-ferramenta sob vários perfis térmicos, a teoria do comportamento termo elástica das juntas das estruturas tem sido aplicada segundo (ATTI et al.1981, apud RAMESH et al, 2000). Esta teoria é baseada no reconhecimento do fato de que a distribuição da pressão de contato ao longo das juntas de controle de transferência de calor de um a outro elemento da estrutura. Em geral, as deformações térmicas são calculadas baseando-se em uma suposição ou perfeito contato térmico, ou uma perfeita isolamento térmico. ATTI et al, 1980, apud RAMESH, 2000, mostraram que a deformação térmica dos elementos estruturais em contato é afetada significativamente pela não uniformidade na distribuição da resistência do contato térmico. O calor atravessa as juntas na estrutura da máquina-ferramenta expondo um comportamento termo elástico resultante não linear.

Dois grupos de fatores afetam o comportamento da junta. O primeiro grupo consiste de fato, do carregamento térmico, a textura superficial e as propriedades dos materiais dos elementos estruturais, enquanto o segundo grupo, consiste na pressão de contato, resistência do contato térmico, área térmica, restrições mecânicas e deformações térmicas dos elementos estruturais.

2.4-FUNDAMENTOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR

2.4.1-Condução

Para a condução térmica, a equação da taxa de temperatura é conhecida como lei de Fourier. No caso unidimensional tem-se:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Sendo, O fluxo térmico q_x'' (W/m²) é a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área perpendicular à direção da transferência, e é proporcional ao gradiente de temperatura, dT/dx , nesta direção. O parâmetro k é uma propriedade de transporte conhecida como condutividade térmica (W/m.K), é uma característica do material (INCROPERA, 2008).

Em geral, o principal objetivo da análise da condução é a determinação da distribuição de temperatura. Uma vez conhecida essa distribuição, o fluxo de calor por condução em qualquer ponto do meio ou da superfície pode ser determinado através da lei de Fourier. Por meio do conhecimento da distribuição de temperatura tornam-se admissíveis análises para verificação da integridade estrutural de um sólido, através da determinação de tensões, expansões e deflexões térmicas. A equação que representa a difusão térmica (INCROPERA, 2008), também conhecida como equação do calor é apresentada na equação 2.2, a seguir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \gamma c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

Sendo:

$\dot{q}$ - taxa de geração de energia interna por unidade de volume (W/m³)

$\gamma c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ – Taxa de variação com o tempo da energia sensível do meio por unidade de volume (J/m³.s)

$\frac{\partial}{\partial x,y,z} \left(k \frac{\partial T}{\partial x,y,z} \right)$ – Fluxo líquido de calor por condução para o interior do volume de controle na direção x, y ou z

2.4.2-Convecção

Independente da natureza específica do processo, de transferência de calor por convecção, a equação apropriada para a taxa de transferência possui a forma da equação 2.3:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

Sendo q'' , o fluxo de calor por convecção (W/m^2), proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície e do fluido, T_s e T_∞ , respectivamente. Essa expressão é conhecida como lei de resfriamento de Newton, e o parâmetro h ($W/m^2 \cdot K$) é chamado transferência de calor por convecção.

2.4.3-Radiação

Uma máquina-ferramenta tanto emite como recebe radiação, devido as fontes internas e externas de calor (WECK, 1980). A taxa líquida de transferência de calor por radiação, equação 2.4, saindo de uma superfície é expressa por unidade de área:

$$q_{rad}'' = \frac{q}{A} = \varepsilon E_n(T_s) - \alpha_1 G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (2.4)$$

Onde, ε emissividade da superfície (em relação ao corpo negro), α_1 absortividade, T_s temperatura da superfície, σ constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$) para um radiador ideal ou corpo negro, E_n (W/m^2) limite superior do poder emissivo, G taxa na qual todas as radiações incidem sobre uma área unitária da superfície por irradiação.

2.5-DESLOCAMENTO TÉRMICO

As relações das deformações térmicas de causa e efeito podem ser calculadas com um detalhamento considerável, se forem utilizados modelos matemáticos simulados em softwares computacionais modernos (análises de elementos finitos ou método dos

elementos finitos MEF e *dinâmica* dos fluidos computacional) e equações básicas da transferência de calor, mas para fazer isso, é necessário um considerável conhecimento sobre o projeto da máquina e o ambiente onde será instalada. Os dados obtidos a partir de sistemas já existentes ou testes específicos devem ser mais fáceis de ser obtidos e justificar como válidos. Alguns modelos simples são apresentados em seguida para fornecer um melhor entendimento dos parâmetros importantes e sua relação com o problema de controle térmico (HOLMAN, 1976).

Supondo que uma barra sólida possua um gradiente de temperatura constante como expresso pela equação 2.5. Calculam-se as rotações e os deslocamentos locais para qualquer ponto na barra relativo ao eixo x , y e z mostrado na figura 2.4. O gradiente de deformação térmica é relacionado com o gradiente de temperatura pelo coeficiente de expansão térmica α_2 . As rotações locais são obtidas pela equação 2.6, através da integração dos gradientes de deformação a partir de uma extremidade fixa. Os deslocamentos locais são obtidos pelas equações 2.7 e 2.8, através da integração da diferença de temperatura ao longo do eixo x e pela integração das rotações em torno dos eixos y e z (HOLMAN, 1976).

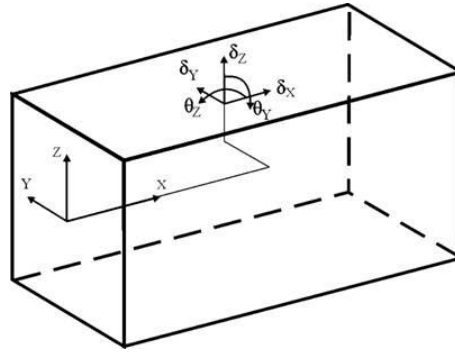


Figura 2.4 – Deslocamentos e rotações no ponto (x,y,z) relativos ao sistema fixo de coordenadas x - y - z e sujeito a um gradiente de temperatura constante (Modificado de HOLMAN, 1976).

$$T(x, y, z) = T_0 + x \frac{\partial T}{\partial x} + y \frac{\partial T}{\partial y} + z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.5)$$

$$\theta_y(x) = \int_0^x \alpha_2 \frac{\partial T}{\partial z} dx = \alpha_2 x \frac{\partial T}{\partial z} \quad \theta_z(x) = \int_0^x \alpha_2 \frac{\partial T}{\partial y} dx = -\alpha_2 x \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.6)$$

$$\delta_x(x, y, z) = \int_0^x \alpha_2 (T - T_0) dx = \alpha_2 x \left(\frac{x}{2} \frac{\partial T}{\partial x} + y \frac{\partial T}{\partial y} + z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.7)$$

$$\delta_y(x) = \int_0^x Q_z dx = -\alpha_2 \frac{x^2}{2} \frac{\partial T}{\partial y} \quad \delta_z(x) = -\int_0^x Q_y dx = -\alpha_2 \frac{x^2}{2} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.8)$$

Frequentemente é mais conveniente especificar um estado de fluxo de calor unidirecional (um fluxo de calor q dividido pela área A) do que um gradiente de temperatura. Por exemplo, a radiação solar está na ordem de 1 kW/m^2 . O fluxo de calor através do material é igual ao gradiente de temperatura multiplicado pela condutividade térmica k . Assumindo que o fluxo de calor é uniforme e escoar em todas as direções x , y e z . O ponto deslocado no final da barra possui a mesma magnitude independentemente da direção do fluxo como mostra a equação 2.9 e a figura 2.5. A propriedade importante do material é a razão de expansão térmica pela condutividade α/k (HOLMAN, 1976).

$$\frac{q_i}{A} = -k \frac{\partial T}{\partial i} \Rightarrow \delta_i = \frac{\alpha_2}{k} \frac{L^2}{2} \frac{q_i}{A}, i = (x, y, z) \quad (2.9)$$

Onde: δ_i é a deformação na direção considerada, L é o comprimento, k é a condutividade térmica, A é a área da superfície, i é a direção considerada x , y ou z , α_2 coeficiente de expansão térmica, q_i é o fluxo de calor na direção considerada.

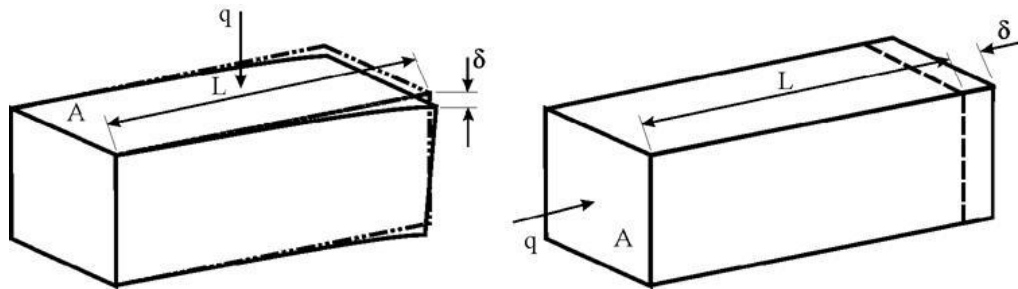


Figura 2.5 – Deslocamento na extremidade devido a um fluxo de calor uniforme especificado através de uma barra sólida. (Modificado de HOLMAN, 1976)

Os problemas térmicos dependentes do tempo envolvem a massa térmica da estrutura interagindo com a transferência de calor por condução, convecção e radiação.

Uma simplificação do problema leva as equações que descrevem cada tipo de transferência de calor separadamente. Começando com a condução, a equação de difusão unidimensional, mostrada na equação 2.1, fornece um importante grupo de propriedades dos materiais que dão uma medida do tempo necessário para o calor se difundir ou dissipar numa estrutura, como é visto na equação 2.10.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\rho C}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \Rightarrow \Delta t \approx \frac{\rho C}{k} (\Delta x)^2 \quad (2.10)$$

Onde: Δt é o intervalo de tempo necessário, ρ é a densidade do material, C é o calor específico, Δx é a variação da distância considerada e k é a condutividade térmica.

2.6-CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

De acordo com o que foi exposto neste capítulo, pode-se constatar que uma máquina-ferramenta repetitiva é muito mais fácil de lidar com relação aos seus erros do que uma que não seja repetitiva. Isto é verdade desde que se esteja procurar eliminar fontes de erros, ou compensá-las.

Um erro aparentemente não repetitivo pode se tornar repetitivo através da determinação de sua relação sistemática com a fonte de erros, ou pode ser reduzido para um nível satisfatório se a sua fonte de erros estiver sob controle ou isolada do sistema. Uma vez que os erros forem sistemáticos, a correção ou compensação dos seus efeitos são meios efetivos de melhorar a exatidão da máquina.

Embora os erros térmicos existam de forma volumétrica, ou seja, irá ocorrer em todas as direções, é claro, que dependendo da complexidade da peça de trabalho, ou do número de eixos que a máquina possua, acontecerá mais significativamente em uma direção. Apesar desses erros térmicos terem sido divididos com relação às diversas fontes, todos possuem sua parcela sistemática e aleatória. Assim, a separação dessas parcelas é a chave para futuras compensações dos erros térmicos.

Uma máquina-ferramenta tanto emite como recebe calor, embora existam técnicas de resfriamento para tentar minimizar os efeitos térmicos e consequentemente diminuição dos erros térmicos provenientes das diversas fontes de calor. Ainda assim não é suficiente para o grau de exatidão que se tenta estabelecer nas máquinas-ferramenta CNCs atuais.

Embora se procure materiais com baixo coeficiente de dilatação térmica e baixo nível de condutividade térmica, para fabricação de determinados elementos mecânicos, de máquinas-ferramenta, ainda ocorrem deformações devido o surgimento de calor gerado durante o processo de fabricação, como já mencionado, causando alterações dimensionais comprometendo a qualidade e consequentemente a precisão do produto acabado.

Sendo assim, propõe-se neste trabalho uma contribuição para redução destes efeitos, para garantir um alto desempenho das peças fabricadas por este tipo de processo de usinagem.

CAPÍTULO III

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1-PROGRESSO DA PESQUISA DOS ERROS TÉRMICOS

Neste capítulo são apresentados alguns dos trabalhos dos principais pesquisadores em máquinas-ferramenta, bem como o progresso das pesquisas nesta área com suas respectivas técnicas para a diminuição ou compensação dos erros termicamente induzidos em máquinas-ferramenta.

Ao longo do tempo foi descoberto que os erros térmicos são as maiores causas de inexactidão em máquinas-ferramenta e significantes melhorias nesta área foram alcançadas na eliminação ou diminuição efetiva do mesmo. O alto custo envolvido para a resolução deste problema pode ser profundamente diminuído pelo ganho, que possibilita ser alcançado ao minimizar este problema em médio prazo. A redução dos erros térmicos, obviamente em atividades de rotina requer medidas de controle de qualidade estatística e garantia da redução dos desperdícios e melhor repetitividade das máquinas CNCs.

A maioria das pesquisas atuais é focada na previsão dos erros térmicos para dados de temperaturas discretas. Técnicas analíticas tentaram captar todo perfil de temperatura em um número finito de leitura. Modelos empíricos são também usados para a leitura de temperatura e deslocamentos térmicos.

3.2 - PESQUISAS DOS ERROS TÉRMICOS EM ORDEM CRONOLÓGICA

Em 1931, na reunião do International Committee of Weights e Measures em Paris foi acertado que a temperatura padrão da leitura de comprimentos de objetos seria a 20°C. Podendo assim ser entendido que alguns erros que existem na máquina quando medindo ou

usinando uma determinada peça diferente da temperatura de referência, produz erros termicamente induzidos em relação aos seus comprimentos originais tomando como base a temperatura de referência de 20 °C.

YOSHIDA et al (1969) analisaram os efeitos dos deslocamentos térmicos na precisão de erros térmicos em uma máquina de retífica cilíndrica. Como é muito difícil de medir a exata distorção das guias, a mesma foi calculado de uma equação desenvolvida a partir da base de distorção de temperatura e deslocamento térmico da máquina. A base da máquina foi considerada uma viga simples. A deflexão térmico da viga foi calculada sobre várias relações do gradiente de temperatura. Neste mesmo trabalho os seus pesquisadores chegaram a equações que podem ser usadas para o cálculo da temperatura induzida em erros cilíndricos. A distribuição de temperatura na retífica foi encontrada através de 50 pontos, por meios de termistores com gravação da leitura de temperatura de saída. Com o objetivo de medir os deslocamentos térmicos. Testes padrões foram realizados ao redor da máquina e “strain gauges” foram montados em 30 pontos de leituras diferentes.. Os pontos foram principalmente instalados rodeando a seção superior no fundo do plano horizontal da máquina. A distribuição térmica dos termistores foram realizadas dentro da máquina após seis horas rodando em uma carga específica. O aumento da temperatura na parte traseiro foi mais alto que a do lado frontal. Dos experimentos realizados, foi concluído que a variação da exatidão cilíndrica da peça de trabalho foi causada pelos deslocamentos térmicos do fundo da máquina de retífica e esses erros podem ser determinados pela leitura dos termistores, através da distribuição de temperatura, e das deslocamentos térmicos da máquina medidas por meio dos “strain gauges.

SPUR et al, (1969) analisaram a fundamentação teórica para descrever o comportamento térmico de uma máquina-ferramenta. Três diferentes tipos de máquinas foram analisadas de acordo com a orientação dos eixos, um torno mecânico, uma plaina e tipo misto de fresadora “knee”. Os diferentes modelos de deslocamentos térmicos foram avaliados como: expansão térmico linear, curva térmica no caso da face simples de travamento e curva térmica no caso de apoio livre e métodos improvisados do comportamento térmico para resfriar a estrutura da máquina na tentativa de minimizar os erros térmicos.

YUAN et al (1998) identificaram sete componentes de erros em uma coluna de deslocamento térmico, sendo dois componentes de retilineidade, um componente angular, um componente rotacional (yaw), um componente das guias de rolos ao longo do eixo y e

erros de perpendicularidades entre os pares de eixos x-y e y-z. Usando um sistema telescópico ballbar para medir os erros volumétricos, foram medidos em alguns pontos durante o volume de trabalho e os componentes de erros estimadas usando algoritmo de cinemática inversa. Um total de 19 sensores foram usados, como é mostrado na figura.3.1, para os sete componentes de erros analisados.

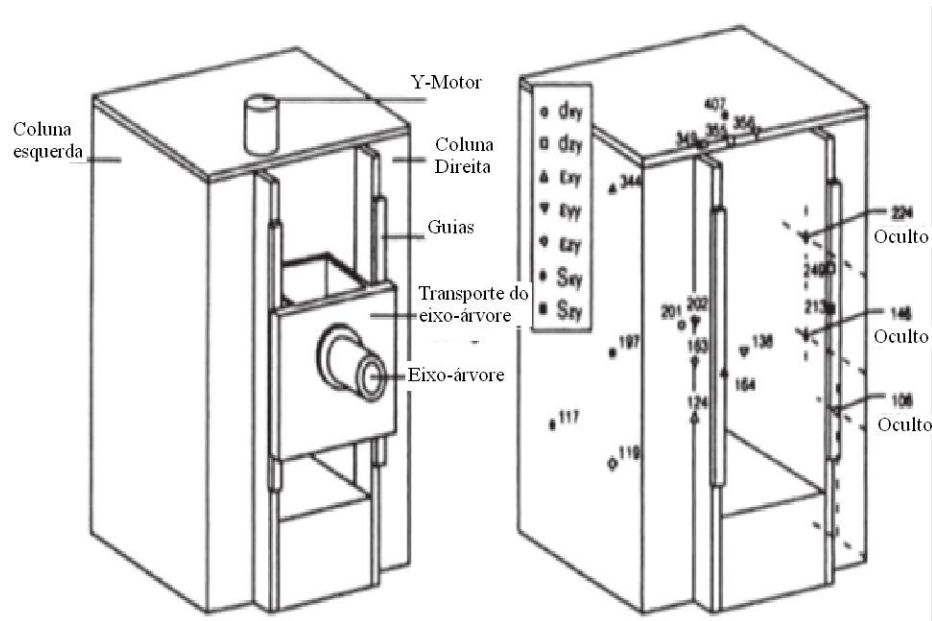


Figura 3.1 – Localizações dos sensores óticos na coluna da máquina (Modificado de YUAN et al, 1998)

Este método foi usado nesta pesquisa, com o objetivo de compensar o erro térmico. Dados em relação à temperatura, posição de deslocamento etc., foram coletados em tempo real e as componentes de erros foram estimadas pelo modelo de erro desenvolvido. A resultante dos erros entre a ponta da ferramenta e a peça de trabalho foi calculada usando um modelo de erro sintetizado. Os sinais de compensação foram então enviados para o controlador CNC que altera o deslocamento original da ferramenta. O diagrama de blocos do sistema de compensação em tempo real utilizado é mostrado na figura 3.2.

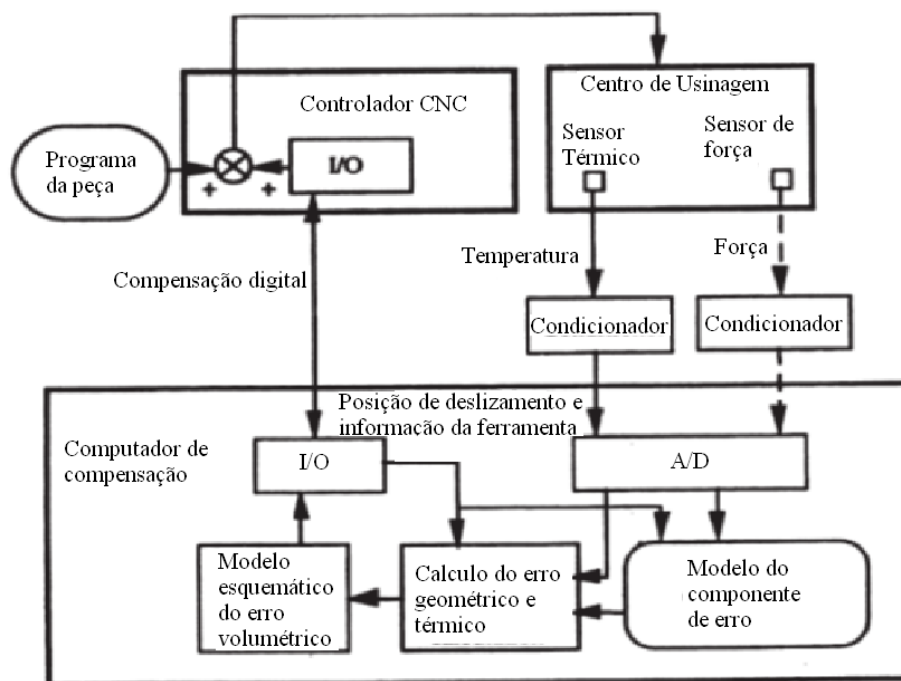


Figura 3.2 – Diagrama de bloco do sistema de compensação de erro em tempo real
(Modificado de YUAN et al, 1998)

VENUGOPAL et al (1986) identificaram que os deslocamentos térmicos em algum ponto particular no tempo são dependentes da temperatura em um instante particular. O procedimento adotado foi calcular o perfil térmico no domínio do tempo de interesse e nesse domínio, determinar o deslocamento resultante, por solucionar a associação das equações termoelásticas usando o método das diferenças finitas. A técnica de elemento finito foi explorada para obtenção das deslocamentos que foram usadas depois para análises. Assim usando o MEF, a exatidão da MF pode ser prevista medindo a temperatura em alguns pontos da estrutura da máquina analisada.

Experimentos realizados pela Purdue University (VENUGOPAL et al, 1986) mostraram os efeitos térmicos na exatidão de máquinas-ferramenta de comando numérico que pode ser previsto pelo monitoramento da temperatura de alguns pontos selecionados na estrutura da máquina. Um interferômetro a laser foi usado nas medidas dos componentes de erros. Quatro termômetros montados em pontos ao redor da máquina foram usados para monitorar a faixa de temperatura. Ambos os sistemas de aquisição de dados e o interferômetro interligado ao microcomputador. Para os dados obtidos, foi fundamental que os erros de posicionamento fossem significantes e pudessem ser facilmente

compensados usando uma referência externa, a exemplo, uma escala magnética. Os outros erros foram previstos como função da temperatura da máquina-ferramenta.

No entanto, medidas de temperatura e componentes de erros é somente o primeiro passo em direção a meta de melhorar a exatidão da máquina-ferramenta (NI, 1987). O outro importante passo a se fazer é a correção destes erros em tempo real, tal que o efeito desses erros na exatidão seja minimizado. Muitos trabalhos de pesquisas já foram mencionados antes deste ponto de vista, avaliando as técnicas de modelagens que foram exploradas.

As medidas de temperatura geralmente tinham sido monitoradas através do uso de termopares. Os termopares são em geral construídos do tipo de alumínio, ou tipo T ou tipo J, cada tipo possui uma pequena variação das propriedades que diz respeito a sensibilidade e a faixa de leitura. Os sensores são colados geralmente em cima da superfície da fonte de calor e os dados monitorados periodicamente.

SPUR et al (1988) estudaram a transferência de calor, trabalhando nas proximidades do eixo árvore e na extremidade. Duas técnicas para compensação dos deslocamentos térmicos do eixo-árvore foram desenvolvidas. Na primeira técnica, o deslocamento axial da parte frontal do eixo foi medida apresentando-se um valor constante, devido a utilização do sistema de arrefecimento de calor. Um balanço de calor na máquina foi realizado para o sistema do eixo, com o objetivo de determinar a quantidade de calor para a compensação do deslocamento térmico do eixo-árvore. Com o balanço energético de calor e as deslocamentos medidas, para uma velocidade constante do eixo árvore, a quantidade de calor e a constante de tempo foram determinadas usando um técnica de regressão não linear. O resfriamento necessário para compensação foi avaliado pela mudança de velocidade de rotação do eixo-árvore. A expansão do elemento longitudinal é proporcional ao seu comprimento, ao aumento de temperatura e ao coeficiente de expansão térmico. Na faixa de temperatura de 0 a 100 °C, a resistência térmica é também uma função da temperatura, podendo ser considerada linear. Se a resistência do termômetro, no contato térmico, é considerada como um componente, a expansão da qual precisa ser medida, o aumento da resistência do termômetro influencia diretamente na expansão linear do componente. O sinal obtido por meio da resistência do termômetro pode diretamente ser usado na máquina-ferramenta CNC com o objetivo de se conseguir o correto posicionamento da peça de trabalho em relação à ferramenta de corte.

O projeto de uma máquina-ferramenta tem que ser otimizado o máximo antes da compensação de qualquer tipo de erro. Acredita-se que a correção em tempo real para os deslocamentos térmicos, pode eliminar defeitos de projetos simultaneamente com o fenômeno térmico (BRYAN, 1990).

Pesquisas têm usado termopares para a monitoração das temperaturas. Termopares de resistência de platina e termistores para as medidas da variação de temperatura de diferentes elementos da máquina-ferramenta. Uma das técnicas inovadora foi usada nas medidas de temperatura da rotação da peça de trabalho, que consistia em colocar um termopar no fluido hidráulico que refrigera a peça de trabalho e mantém fiel a temperatura de usinagem (BRYAN, 1990).

BALSAMO et al (1990) expressaram um modelo de erros térmicos como uma equação matemática relacionando a temperatura em cada ponto da máquina como uma função das coordenadas do ponto. O modelo encontrado foi um polinômio de segunda ordem em três coordenadas. A máquina foi concebida consistindo-se de quatro volumes independentes pelo menos: Três rolamentos guias, no qual três eixos de coordenadas foram estudados juntamente com a peça. O modelo de deslocamento foi relacionado entre o deslocamento térmico e a distribuição da temperatura.

JEDRZEJEWSKI et al (1990) também usaram a técnica de elementos finitos para determinar a distribuição de temperatura e então determinar a distorção ou deslocamento térmico como resultado do trabalho. A otimização foi conduzida, por meio dos elementos, que contribuíram para geração de calor e com os elementos de apoio estrutural que contém as fontes de calor. Assim a otimização de parâmetros como também a otimização estrutural foi conduzida. A principal meta de otimização foi minimizar os erros de usinagem devido as distorções térmicas da estrutura da máquina-ferramenta.

JEDRZEJEWSKI et al (1992) apresentaram um novo método de modelagem do comportamento térmico de máquinas-ferramenta baseado na determinação da perda de potência dos componentes do sistema cinemático. Os fatores que influíam nos estados térmicos da MF são mostrados na figura 3.1. Este método foi baseado na suposição que a soma da energia dissipada dos componentes particulares do sistema cinemático é um função das condições operacionais. Mais uma vez as fontes de calor são identificadas e os parâmetros operacionais como velocidade do eixo-árvore, potência de corte, temperatura ambiente, tempo operacional etc, são conhecidos. Os valores de perda de potência em todos os componentes do sistema de drives, assim como as temperaturas e os

deslocamentos térmicos podem ser determinadas automaticamente. A vantagem do modelamento da estrutura completa é mostrada nas figuras 3.3 e 3.4.

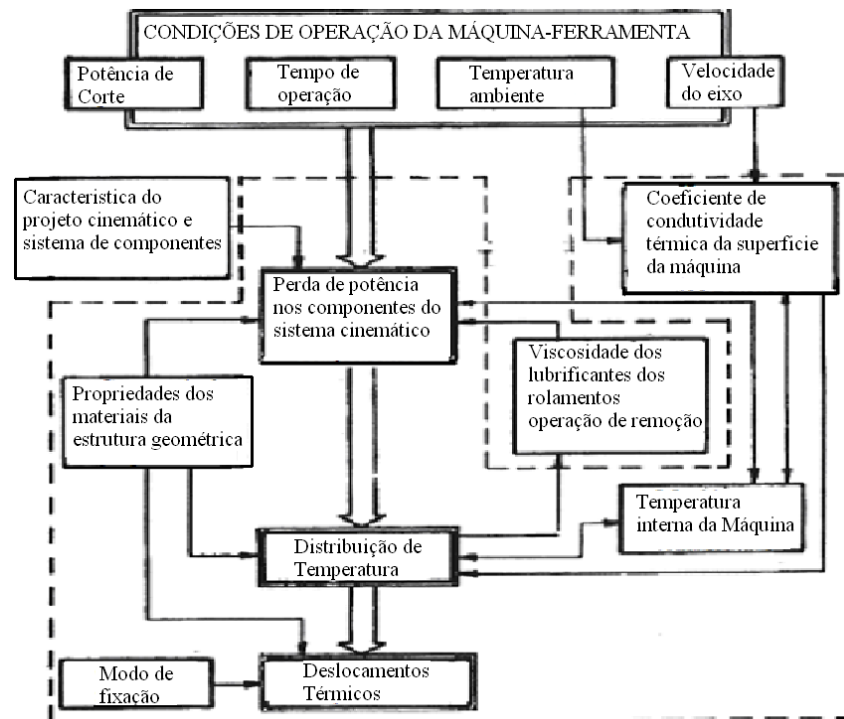


Figura 3.3- Relação entre os fatores afetados nos estados térmicos da máquina ferramenta (Modificado de JEDRZEJEWSKI et al, 1992)

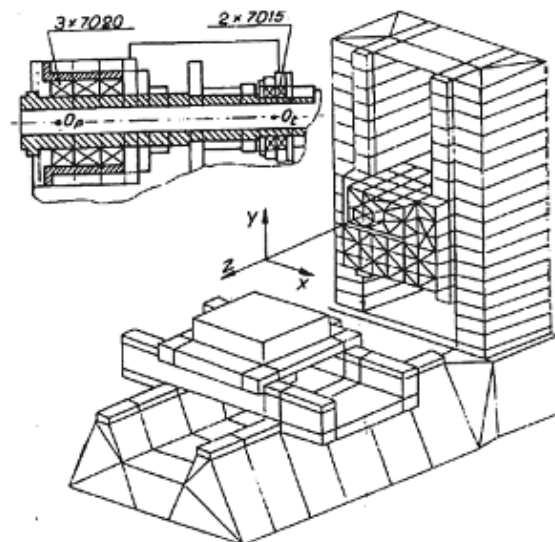


Figura 3.4 - Modelo em elementos finitos da estrutura geométrica de uma máquina-ferramenta (Modificado de JEDRZEJEWSKI, 1992)

A medida de temperatura é um parâmetro essencial no estudo das deslocamentos térmicos em máquinas-ferramenta. ATTIA et al (1993) enfocaram os fatores como a distância entre os termopares e a fonte de calor, os efeitos do fluxo de calor ao longo dos arame dos termopares e etc., que afetam a leitura da temperatura. A exatidão da temperatura na superfície medida é profundamente reduzida pelos seguintes fatores:

- a) A distorção do gradiente de temperatura na área da superfície,
- b) A presença da camada superficial (exemplo: Tinta) a qual age como barreira térmico adicional,
- c) Contato imperfeito entre os termopares e a superfície,
- d) A associação incerta da localização exata da junção efetiva dos termopares.

Existem 21 componentes de erros geométricos em uma máquina-ferramenta de três eixos, no entanto CHEN et al (1993) propuseram um novo modelo com 32 componentes de erros sintetizando os erros geométricos como também os erros térmicos. Os 11 erros adicionais foram usados para representar os efeitos térmicos de um centro de usinagem. Até mesmo sem nenhum movimento nominal do eixo árvore, a posição da ponta da ferramenta ficaria gradualmente mudando na descrição da distorção térmica do eixo árvore e da coluna da máquina. CHEN et al.,(1993) montaram 17 termopares em um centro de usinagem, como é mostrado na figura 3.5, depois realizaram os primeiros experimentos.

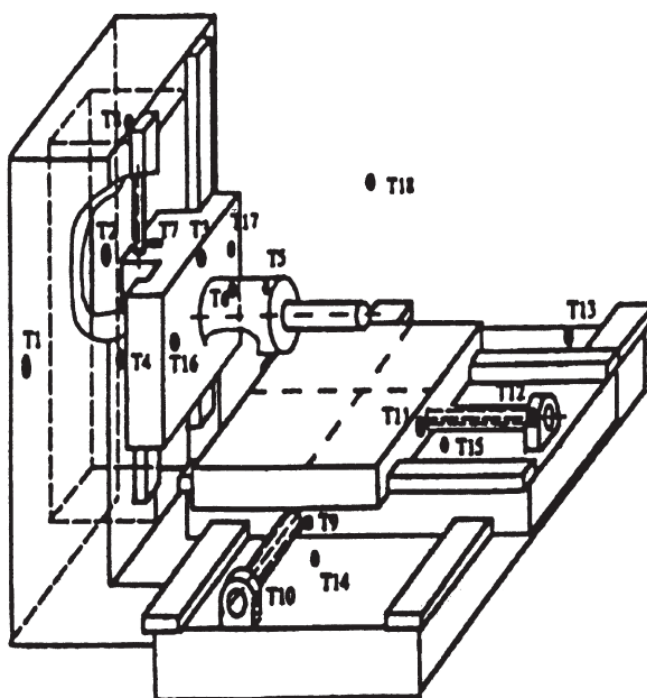


Figura 3.5 – A montagem dos termopares no centro de usinagem (CHEN et al, 1993).

Um termopar extra (T18) foi usado para leitura da temperatura ambiente. O campo de temperatura sob três condições de velocidade selecionadas é mostrado na figura 3.6. Um controlador de compensação baseado em um microcomputador foi implementado no centro de usinagem horizontal para compensar o erro. A compensação do erro volumétrico era efetivada a cada 10ms, por meio da compensação de sinais recebidos pelo controlador.

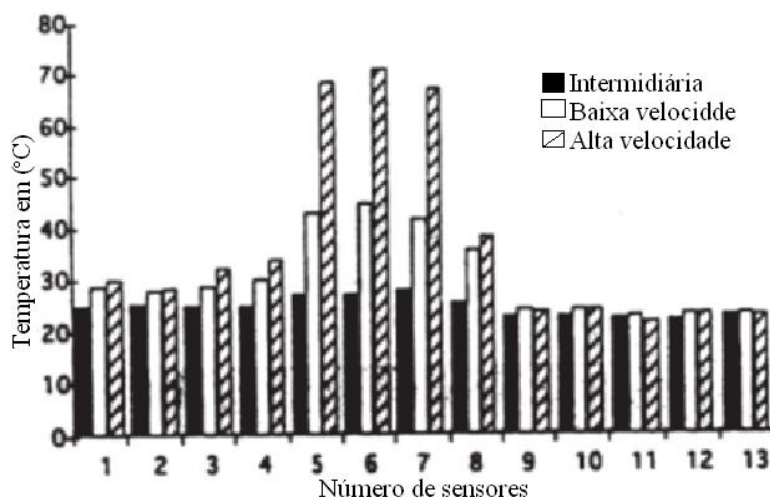


Figura 3.6 - Campo de temperatura sob diferentes condições (Modificado de CHEN et al, 1993).

Os erros dos deslocamentos termicamente induzidos na extremidade corte para um centro de usinagem vertical, resultam da combinação da expansão do eixo árvore, do rolamento do braço em balanço, da expansão no eixo z etc. Consequentemente, o posicionamento dos erros volumétricos na ponta da ferramenta de corte é uma variante espacial na região na peça de trabalho. A variação no tempo abrange também o tempo de corte.

C.H. LO (1994) descreveu um modelo sintetizado em 2 D de quatro eixos do centro vertical e transversal de dois eixo-árvores para explicar os erros de posicionamento na máquina. Com a realização de um sistema que relacionava com a usinagem da máquina. Quatro coordenadas na estrutura foram analisadas e matrizes de transformações apareciam em cada relação. A posição da ferramenta, como parte medida, foi relacionada com respeito a parte da coordenada da estrutura. 11 componentes de erros foram introduzidas neste modelo. A matriz de transformação de erros foram obtidas pela diferença entre a posição atual e a posição da ferramenta desejada.

C.H. LO et al (1995) usaram 80 termopares em vários locais na máquina em pontos estratégicos como identificados na tabela 3.1. Baseado no conhecimento da maioria das fontes de calor, que possivelmente causaram as distorções térmicas.

Tabela 3.1 - Localização dos termopares na máquina	
Número do Sensor	Localização dos termopares
13	Final do guia eixo X
15,16,17,18	Final do fuso de esferas no eixo X e Z
24	Rolamento do eixo-árvore
27	Canto traseiro do fuso
82,83	Face frontal direita da coluna
84,85	Ponto médio da face frontal da coluna
88	Face esquerda da frente da coluna (no meio)
90	Meio da fixação do eixo duplo
94	Topo da face posterior da coluna
96	Ambiente

Dos 11 componentes de erros identificados, 8 foram medidos usando o laser interferométrico, enquanto 3 erros no eixo foram medidos usando um sensor capacitivo sem contato. A localização dos sensores que foram utilizados são mostrados na tabela 3.1.

Severas condições da sequência de corte e aspectos propício para cobrir a maioria das condições comumente encontradas foram usadas. Para os experimentos estudados, foram observados que a maioria dos componentes de erros ou grande transição ocorre no deslocamento linear ao longo do eixo Z, enquanto o maior erro angular foi o erro “yaw” ao longo do eixo Z. Todos os componentes dos 11 erros foram identificados. Todos empiricamente medidos sobre diferentes condições térmicos. O sistema de compensação consistiu de um computador IBM, e módulo de interface com quatro diferentes placas para um modelo de software. Dados da máquina em relação a posição dos eixos, valores de temperatura, comprimento da ferramenta etc. Foram usados para alimentar as vários placas de interface. O sistema de controle e compensação de erros, em tempo real, é mostrado na figura. 3.7.

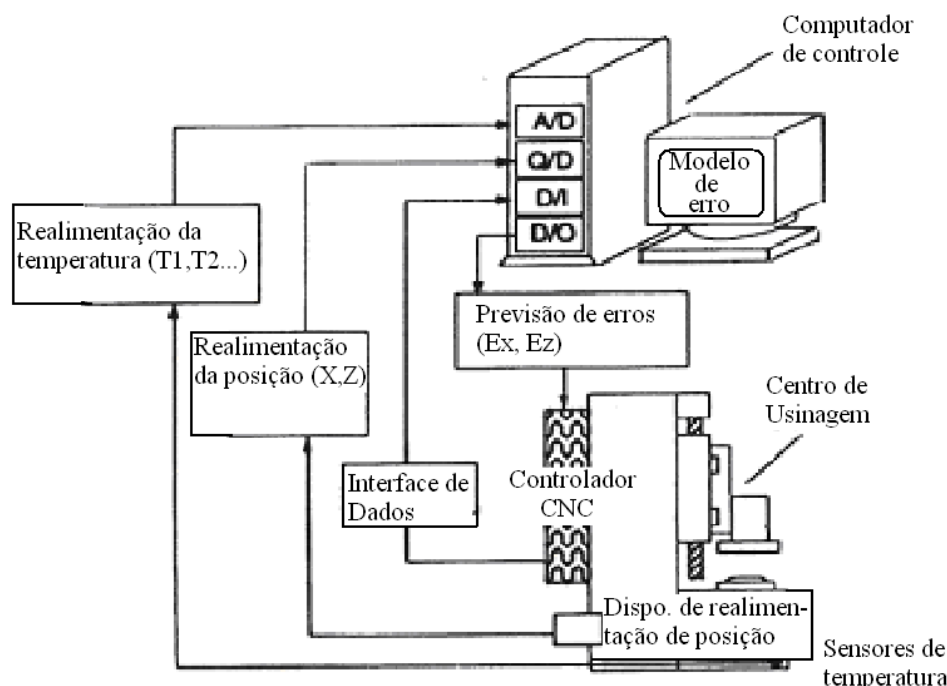


Figura 3.7 - Sistema de controle e compensação de erro em tempo real (Modificado de C.H. LO et al, 1995)

Dois sistemas de compensação de erros foram desenvolvidos para a ação de um melhor desempenho. O quadrante de correção foi usado para interromper o encoder de realimentação e adicionar ou subtrair os pulsos do quadrante para cumprir a fazer necessária compensação. Os valores de erros compensados foram então mandados e endereçado para um porta I/O de um controlador CNC, a ferramenta usada como teste foi deslocada durante o corte. Estes valores são enviados para o controlador da máquina baseados nos valores de compensação calculados por um modelo de erro. Uma vês a compensação alcançada, as medidas a lazer assim como o corte atual foram verificadas, o desepenho e a eficácia do sistema proposto. Os resultados mostraram que 90% dos erros da máquina foram corrigidos.

SRIVASTAVA et al (1995) empregaram MTHs na modelagem de erros em um centro de usinagem vertical de cinco eixos CNC. O formato do modelo considerado e o conjunto de transformações para inexactidão, relacionam-se e se uniram usando um pequeno anglo de aproximação chegando ao erro volumétrico total como função de todas os erros possíveis. Consequentemente, erros devidos a inexactidão relacionadas, erros devido a inexactidão de rotação, erros de deslizamento nos guias e erros no eixo de rotação que foram considerados no modelo desenvolvido.

MOU et al (1995) usaram uma técnica baseado na análise de fratura para melhorar a exatidão de uma máquina CNC. Com a ajuda de suposição baseado na cinemática de corpos rígidos. Os modelos dos erros geométrico-térmicos foram generalizados. Cada componente de erro foi caracterizada como um parâmetro de uma função da posição da ferramenta e o perfil de temperatura da ferramenta na estrutura da máquina. Foi também usado o método de regressão estatístico.

Considerando um modelo como uma cadeia cinemática com severas ligações conectadas em série por articulação prismática e rotação dos eixos. Em fim, a cadeia considerada foi fixada a mesa de trabalho enquanto a outra parte fixado a ferramenta no eixo árvore. Um ponto na mesa de trabalho serviu como coordenada de referência do sistema, que foi expressada no eixo árvore através de um sistema de coordenada em sequência, para obter uma matriz de erro completa.

HUANG et al (1995) usaram análise de múltiplas variáveis de regressão em sequência para desenvolver uma fundamentação matemática capaz de analisar um fuso do sistema de acionamento. Os erros térmicos foram expressos como uma função crescente temperatura. Os coeficientes do modelo foram estimados para as amostras de dados coletadas.

CHEN et al (1995) usaram o métodos de transformação de coordenadas homogenias, para desenvolver um modelo cinemático de três eixos em um centro de usinagem vertical. Quando o método mapeia os erros, consome-se tempo. A geometria e os erros térmicos na máquina foram relacionados e medidos. Esses erros foram sintetizados por um modelo construído baseado na configuração específica da máquina (ou seja, um modelo específico para a máquina). A posição dos vetores da ferramenta e da peça de trabalho foram transformadas num sistema global de coordenadas usando as MTHs. A diferença entre os dois vetores foi considerada como uma leitura da posição relativa do erro. O modelo cinemático do centro de usinagem foi assim desenvolvido. Uma rede neural artificial (RNA) multi-camadas foi alimentada usando o mapa dos valores de temperatura medidos juntamente com o erro térmico.

No trabalho desenvolvido pelo (HUANG, 1995), foi bastante complicado a montagem de termopares para os rolamentos e porcas do fuso. Um sensor de deslocamento localizado no final da extremidade do fuso foi usado para medir o seu erro térmico. Um sistema de aquisição de dados PCL-818 e PCLD-889, juntamente com uma placa AMP/MUX foram usados para coletar amostras de dados. Observou-se que havia uma

relação de distância entre o erro térmico e o incremento da medida de temperatura em relação as medidas das posições realizadas.

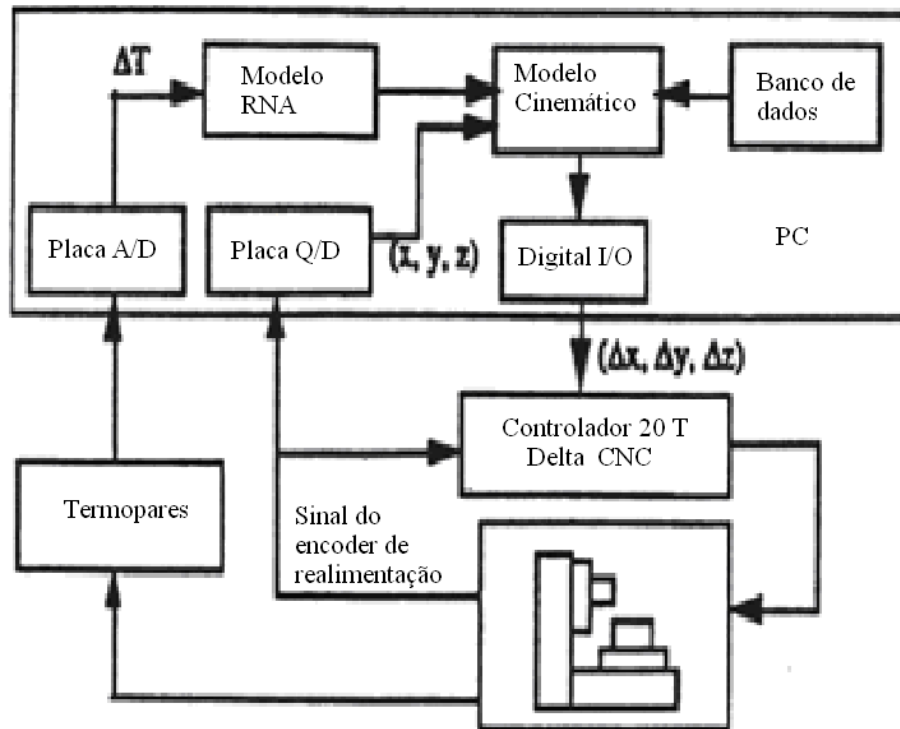


Figura 3.8 – Diagrama de blocos do esquema de compensação de erro (Modificado de CHEN et al, 1995).

CHEN et al (1995) colocaram 23 termopares na estrutura da máquina e os dados desses sensores foram escaneados pelo um conversor de 16 bit A/D atualizado por uma taxa de aquisição de 2s. Sensores capacitivos foram usados para medir o deslocamento térmico do eixo. Os erros térmicos foram medidos usando um laser HP interferométrico e um nível eletrônico diferencial. Um PC básico e um controlador de compensação (como mostra a Figura. 3.8), foram usados para compensação do erro em tempo real.

A posição do deslocamento dos três eixos horizontais do centro de usinagem foi acessada por uma placa Q/D. Os dados dos termopares e o encoder de feedback alimentaram as placas A/D e Q/D, do respectivo PC. O Modelo cinemático utilizado na compensação, incorporados nos três eixos, adquirem os dados da placa Q/D e o modelo RNA de erro térmico. O controlador de compensação em seguida envia os valores de compensação para o controlador lógico programável (CLP) do quadro de controle CNC por uma porta I/O digital. A eficácia da compensação foi verificada usando um laser

interferométrico HP. Foi verificado que a exatidão aumentou depois da compensação utilizada.

VELDHUIS et al (1995) trabalharam na identificação de um número ideal de termopares, assim como a sua localização, para uma melhoria significativa na exatidão de uma máquina de cinco eixos. Inicialmente um grande número de termopares foram montados na estrutura da máquina e verificou-se que alguns eram irrelevantes. Os que não contribuíram significativamente no cálculo da compensação final foram eliminados. A região de deslizamento do eixo e a coluna foram identificadas como os locais de maior geração de calor, em que grandes componentes estruturais foram deformados. 17 termopares foram montados no braço da superfície de apoio do eixo e a coluna do eixo Z da máquina. Os erros de posição e orientação entre a ferramenta e a peça de trabalho foram medidos usando um interferômetro a laser. A saída do treinamento da rede neural, provida dos valores de compensação, foi aplicada diretamente no controlador da máquina. Como um resultado de compensação, o erro foi reduzido de 0,06 mm para 0,02mm em testes realizados com uma ferramenta de aço P20, durante o período de operação analisado.

VELDHUIS et al (1995) esboçaram uma estratégia para compensação em uma máquina de cinco eixos baseada em redes neurais artificiais. A configuração inicial da rede foi explorada com dados baseados em resultados de simulação da máquina. As MTHs e pequenos ângulos de aproximação foram empregados na simulação. A rede neural foi treinada por 20000 iterações com a simulação de dados. Duas redes foram usadas: Uma para o erro de posição no eixo Z e outra para o erro angular. As duas redes usaram uma função de ativação sigmoide enquanto as camadas de saídas usaram uma função linear. Cada rede tem três camadas ocultas, a primeira com 30, a segunda com 15 e terceira com sete neurônios, respectivamente. O modelo de rede neural foi depois otimizado com a leitura dos dados. Cinco diferentes testes foram realizados em um período de 10 horas.

MOU et al (1995) usaram a técnica de análise de falha para melhoria do desempenho da máquina. A máquina usada foi um centro de usinagem de dois eixos. Nove tipos de erros foram examinados nesta máquina-ferramenta incorporados no modelo térmico geométrico. Os erros analisados foram: Deslocamento linear em x, deslocamento linear em z, desvio em x (yaw), desvio em z (yaw), retitude do movimento de x em relação a z, retitude do movimento de z em relação a x, esquadro do eixo x com o respectivo eixo árvore, paralelismo do eixo z com respectivo eixo e o movimento do eixo árvore. A

variação de temperatura associados a esses erros foram monitorados por 39 termopares fixados na máquina, como mostrado na figura 3.9.

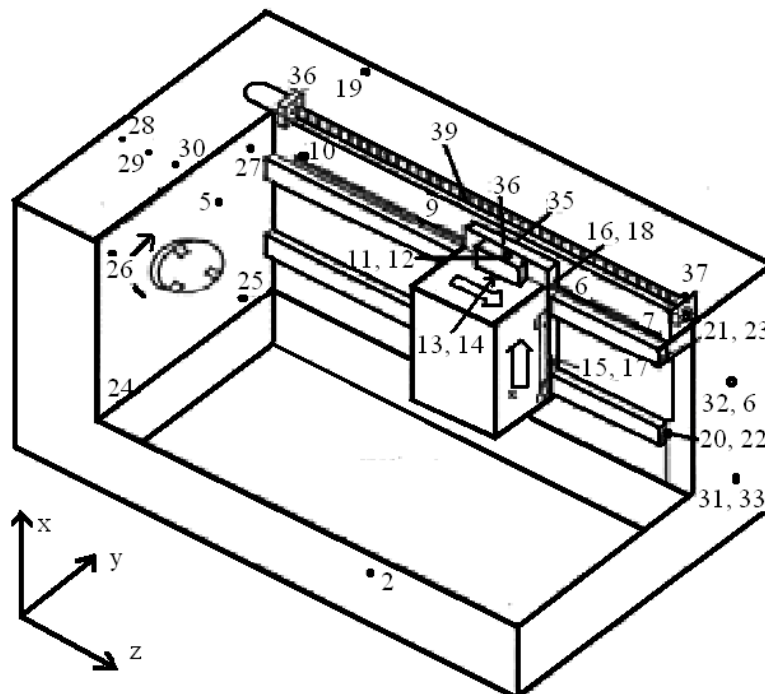


Figura 3.9 – Diagrama esquemático do centro de usinagem, mostrando a localização dos termopares (Modificado MOU et al, 1995)

Para caracterização de cada erro, foram usados sensores para o Set up e detectar respectivamente os erros geométricos e os termicamente induzidos na posição atual da máquina e na posição solicitada pelo controlador. Um sistema usando laser interferométrico foi usado para medir várias componentes de erros. Um probe capacitivo foi usado para medir o enquadramento do eixo x com o respectivo eixo árvore. Dois probes óticos foram usados para medir o paralelismo do eixo Z com o respectivo eixo árvore. O probe capacitivo e o probe ótico foram usados para detectar o movimento do eixo. Os erros foram monitorados e gravados em um intervalo de tempo por uma série de períodos, fazendo as análises de aquecimentos e resfriamento.

Dos nove tipos de erros analisados, quatro foram usados no treinamento com 500 iterações cada um, e o quinto foi reservado apenas para teste.

CHEN et al (1996) usaram uma rede neural artificial baseado em um modelo para mapear a relação entre os erros térmicos e as medidas de temperatura. Três camadas feed forward de RNA usando a função sigmóide foram empregadas. A rede foi treinada por um

ajuste consistindo de 540 pares de treinamento dos vetores de entrada (temperatura) com os vetores de saída (erro térmico), que foram colecionados para várias condições de corte.

Segundo (VANHERCK et al, 1996), a exatidão em máquinas-ferramenta é limitada pelas deslocamentos térmicos, embora as deslocamentos possam ser minimizadas através de um bom projeto, não podendo ser evitadas, dependem das condições operacionais. Neste caso, mostraram que a redução e/ou compensação dessas deslocamentos é mais importante quando exploramos graus de liberdade adicionais, o qual é uma motivação a mais para esforços em pesquisas, mas a qualidade superficial também pode ser melhorada. No entanto, já foi comprovado, que quando se aumenta o número dos eixos de rotação, aumenta também as deslocamentos térmicos, segundo VANHERCK et al (1996). Um modelo neural foi usado para compensar os deslocamentos térmicos de uma fresadora durante de cinco cortes . Uma rede neural foi usada, porque ela pode aproximar multivariáveis complexas com relações não lineares. Primeiro, um computador de controle foi usado para fazer os testes de set up. Foi instalado para coletar, treinar e testar dados. Em seguida, a rede neural foi alimentada e treinada para a estimativa dos deslocamentos térmicos, para uma determinada leitura de temperatura. Um algoritmo de realimentação foi usado, modificado de acordo com impulsos e uma razão adaptativa de aprendizado. O máxima deslocamento foi reduzido utilizando uma simples camada de quatro neurônios. Finalmente, o modelo neural foi testado sobre condições operacionais. Duas peças foram medidas, uma com e outra sem compensação. O modelo neural foi capaz de reduzir os erros de deslocamentos térmicos da máquinas de 75 μm para 16 μm . Com aproximação apresentada, conseguiram alcançar resultados bem sucedidos em um período relativamente curto, após a primeira tentativa ter falhado em reduzir os deslocamentos apenas “resfriando as fontes de calor”.

Já na metodologia aplicada no trabalho de (VANHERCK et al, 1996), foi utilizada apenas para compensar o deslocamento térmico em um dos eixos analisados. A máquina teve seu próprio software de compensação térmico, sendo capaz de: (1) Analisar as causas destas deslocamentos, (2) Preceder uma compensação para elas, (3) Conseguir resultados experimentais para avaliação aproximada. Os eixos da máquina analisada é mostrada na figura 3.10

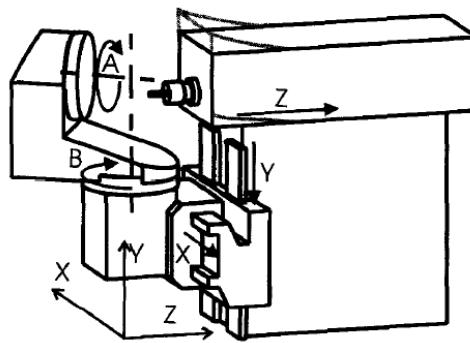


Figura. 3.10 - Definição dos cinco eixos(X,Y,Z, A, B) da fresadora (VANHERCK et al, 1996).

Com uma câmara infravermelha, fazendo uma varredura na estrutura da máquina, foram localizadas e visualizadas as fontes de calor figura 3.18. O que foi bastante surpreendente, o calor gerado foi produzido pelas transmissões das engrenagens e pela rotação dos eixos árvores principal, e não pela pré-carga dos rolamentos, nem pela bomba, nem por um motor elétrico.

As causas do surgimento do gradiente de temperatura na estrutura são ilustradas na figura 3.11. Devido o calor gerado pelos elementos descritos anteriormente. Embora os deslocamentos angulares da estrutura sejam considerados pequenos, os resultados dos deslocamentos das ferramentas tonam-se importante, devido comprimento da estrutura. O comprimento foi medido pela substituição da ferramenta pela exatidão de um dispositivo esférico, e pelo acompanhamento dos deslocamentos através dos sensores colocados na mesa da peça de trabalho.

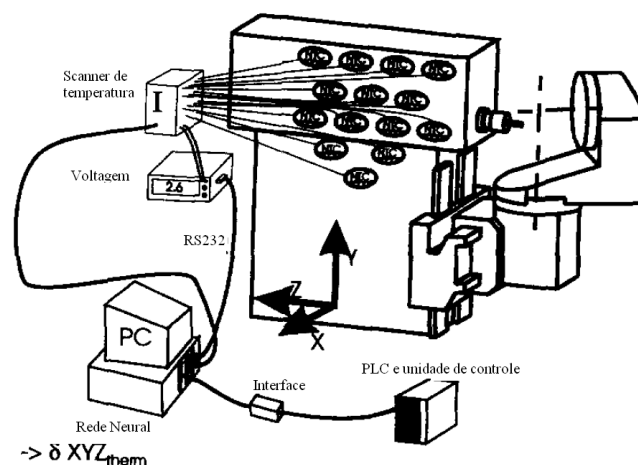


Figura-3.11- Set up experimental. (Modificada de VANHERCK et al, 1996)

Desvios acima de 0,15mm foram encontrados na peça de trabalho. Daí a necessidade de uma solução ter sido desenvolvida. As fontes de calor não têm como serem eliminadas. Além disso, tentou-se resfriar a área da estrutura, mas não há meios canalizados na máquina. Também, injetou-se óleo frio para tentar reduzir o calor, mas não foi possível ser removido o bastante. Se mais óleo fosse usado, o nível de óleo ficaria exagerado, aumentado a vazão da bomba hidráulica, bem com sua potência, e consequentemente um acréscimo na produção de calor. Além disso, somente alguns 100 Watts são dissipados e a temperatura superficial não pode exceder 50^o C na estrutura da máquina.

A relação entre a distribuição de temperatura na estrutura e os desvios térmicos na ferramenta, é complexa e não linear. As redes neurais são adequadas para este tipo de problema, como elas são aproximadamente universais e são fáceis de usar para sistemas MIMO (multiple-input multiple-output). Com o objetivo de gerar um grande treinamento suficiente e estabelecer testes automaticamente, um computador de controle de seleção da velocidade do eixo foi usado, juntamente com controle de uma série de dados, figura. 3.18. As temperaturas foram medidas em um dos lados da estrutura, como são simétricas não foi preciso medir do lado oposto da estrutura. Todo o sistema de resfriamento da máquina foi desligada. Sete padrões foram usados na programação. Sendo a causa da estrutura deformar com as temperaturas acima (em uma sequência definida). Um teste padrão foi realizado em 10 horas. A cada minuto, as 14 temperaturas e os três desvios mutuamente foram medidos. Dois adicionais padrões foram usados como dados experimentais. Um deles foi o padrão DIN 8602.

CHEN et al (1996) estudaram um modelo de análise de regressão de múltipla variáveis (ARMV), baseado em um modelo RNA construído para o controle do ar (condições ambientes) e reais condições de corte. Três camadas feed-forward de RNA com uma função de ativação sigmóide foi usado para mapear a leitura da temperatura como também a calibração dos erros térmicos. O modelo ARMV tem a vantagem do significado físico ser facilmente interpretado. O modelo também é robusto para diferentes condições em relação aos modelos usados em cálculos. A vantagem do modelo da RNA sobre o modelo ARMV é que múltiplos erros térmicos podem ser facilmente modelados e assim modelos complexos podem ser automaticamente passado pelo um processo de aprendizado da rede. Mas o sentido físico do modelo de erro é difícil de interpretar.

Em geral, matrizes de transformação homogenia podem ser usadas para modelar os erros da máquina. Principalmente no caso de erros geométricos, uma relação cinemática da máquina-ferramenta é estabelecida entre as várias relações dos eixos e a ferramenta. Em alguns casos, no entanto, a técnica em análises em elementos finitos pode ser usada para gerar um modelo tridimensional da fonte de calor, ou em máquinas de grande porte, com o objetivo de mapear o fluxo de calor no sistema. A partir de um modelo, a distribuição de temperatura e a deslocamento termo elástico da estrutura pode ser avaliada. Embora estes processos, ambos as fontes de geração de calor e mesmo a estrutura, podem ser estudadas. “Redes neurais” é um método popular que é adaptado no modelamento dos erros térmicos. Medidas de temperaturas nos pontos críticos da MF são feitas e essas são então correlacionadas com as medidas dos erros térmicos. Estes deixam uma correlação entre o estado térmico do sistema e a esperada exatidão da máquina. As Redes neurais também tem sido usadas acompanhadas com modelos de erros usando MTHs para modificar iterativamente os coeficientes do modelo de erros.

CHEN et al (1996b) trabalharam no centro de usinagem vertical, onde 15 termopares (tipo E) foram usados e seis erros térmicos foram medidos. A localização e monitoração dos erros térmicos através de cada termopar são determinadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2- Monitoração e localização do erro térmico através de cada termopar		
Termopares	Localização	Erro térmico monitorado
T1	Eixo-árvore	Dilatação térmica do eixo árvore
T2,T3	Lado superior e inferior	Flexão térmica da viga
T4,T5	Porcas e rolamentos do eixo z	Verificar a expansão térmica do fuso
T6,T7	Os quatro lados da coluna	Flexão térmica da coluna
T10,T11	Base da máquina e ambiente	Temperatura de referências
T12,T13	Porcas e rolamentos do eixo x	Verificar a expansão térmica do fuso
T14,T15	Porcas e rolamentos do eixo y	Verificar a expansão térmica do fuso

Um rápido set-up e um sistema de medida de múltiplos-erros constituídos através de probe, foi desenvolvido. Sete pontos de leituras foram selecionados sobre a zona estudada, no qual um ponto localizado no centro do artefato foi usado como referência. Os componentes dos valores de erros foram medidos da diferença de pontos do artefato. Os efeitos térmicos na localização da zona de trabalho em nenhum momento foram interpolados entre esses setes pontos analisados. Portanto, a medida de erro foi conseguida

usando um probe na máquina e com o set up do artefato. Os artefatos usados são mostrados na figura 3.12 que serviram como referência.

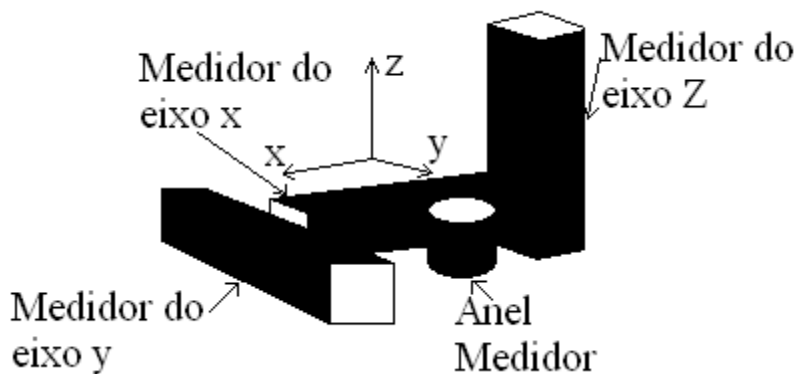


Figura 3.12 – Layout dos artefatos (Modificado de CHEN et al, 1996).

Um PC baseado no controlador de compensação foi empregado para a correção necessária. A máquina de coordenada foi acessada por uma placa Q/D enquanto os valores de temperatura foram acessados por uma placa A/D. Esses erros, como também os erros estáticos e as coordenadas da máquina, foram sintetizados para conseguir o erro total, do qual alimenta o controlador CNC pela placa digital I/O. Os erros de contornos foram medidos por um teste circular ballbar. A ponta radial assim como a ponta de direção na mudança dos quadrantes foi considerada e observada. O controle de feedforward foi usado para eliminar o erro radial enquanto o feedforward da compensação do torque foi usado para reduzir a proteção das mudanças de quadrantes. Como resultado dessa técnica, os erros de contornos foram reduzidos. A exatidão de posição foi também melhorada com a ajuda do modelo de erro térmico.

HATTORI M. et al (1996) publicaram um trabalho que realizava o cálculo das deslocamentos térmicos em máquinas-ferramenta usando técnicas de redes neurais, com o objetivo de reduzir o consumo de energia em fábricas de ar-condicionados. Um novo método para compensar os deslocamentos térmicos usando redes neurais foi estudado. Três camadas feedforward de redes neurais foram treinadas usando dados experimentais, de uma fresa vertical. Depois de confirmado o potencial deste método, os esforços foram concentrados em compactar o trabalho das redes e redução do treinamento da mesma. Os resultados experimentais mostraram que a seleção do parâmetro de medida da temperatura é o mais aconselhável do que usar a velocidade do eixo como um parâmetro de entrada, e a

preparação do treinamento da rede têm que ser obrigatoriamente sob as mesmas condições de operação para os dados de teste, que serão úteis na produção de um compacto e eficiente trabalho das redes neurais. A técnica com redes neurais foi usada para manter a temperatura do ambiente de trabalho controlada, através do controle de temperatura do ar condicionado.

Os erros termicamente induzidos são processos de variação no tempo não linear causada por uma variação não uniforme de temperatura na estrutura da máquina. A interação entre a localização da fonte de calor, a intensidade, coeficiente de expansão térmica e a configuração do sistema da máquina, cria um comportamento térmico complexo (MOU, 1997). Pesquisadores têm empregado várias técnicas como, análise em elementos finitos, métodos de transformação de coordenadas, redes neurais etc., na modelagem do comportamento térmico. Alguns dos trabalhos que utilizam estas técnicas bem como a tentativa de modelamento dos erros térmicos são descritas a seguir:

Nas condições atuais de fluxo de calor pode ser adequadamente relatada para o modelo térmico tridimensional da MF, foi usando método dos elementos finitos. Em um relato resumido do trabalho, a técnica usada de elemento finito em 3D foi também explorado por (JEDRZEJEWSKI et al, 1997) para simular o comportamento térmico da MF baseado na perda de energia, distribuição de temperatura e deslocamento térmico. Um modelo preditivo dos deslocamentos térmicos foi construído usando análise de regressão, descrevendo a relação entre incrementos de temperatura e deslocamento.

KIM et al, (1997) analisaram a distribuição de temperatura ao longo de um sistema de parafuso sem fim (fuso), usando método dos elementos finitos (MEF) com um tipo de elemento bilinear (quadrilateral, 4 nós). O calor induzido, levando em conta o atrito é a principal fonte de deslocamento no sistema do fuso, o calor gerado toma forma dependendo da precarga, da lubrificação da porca e condições de montagem. O modelo proposto em MEF foi baseado na suposição que a haste do parafuso e a porca é um sólido, respectivamente. O problema foi definido como condução de calor transiente e não considerado o deslocamento média devido a radiação. A folga dos elementos que foram considerados para gerar calor foi inserida entre a haste do parafuso e a porca.

KIM et al (1997) usaram seis termopares tipo T com 0,1 s de tempo de resposta, usado nas medidas de temperaturas em pontos específicos. Sendo a principal fonte de calor, o atrito desenvolvido entre o movimento da porca e rotação do rolamento, os termopares foram especificamente organizados para registrar a mesma variação de

temperatura. Sensores foram assim colocados na direção e posicionados sobre as superfícies dos rolamentos. Três diferentes superfícies de porcas e um na parte interna da porca (5mm apenas do diâmetro interno da porca ao longo da direção radial). O que estava dentro da porca foi usado para medir a temperatura de contato da área entre o parafuso e a porca. Para os dados obtidos foram considerados que a distribuição de temperatura e o deslocamento térmico da haste do fuso pode ser considerada somente a variação na direção axial.

Experimentos foram apresentados de acordo com o procedimento acima, o set-up realizado na ordem estimada da transferência de calor e deslocamento. O padrão de aquecimento foi gerado por movimentos repetitivos da porca do fuso e os outros decorrendo o tempo em cada fim de curso do fuso. Os pontos de temperatura foram medidos usando os sensores, enquanto a distribuição de temperatura medida, usando um termopar infravermelho de radiação. Foi observado que os intervalos de paradas como também a velocidade afeta o acréscimo de temperatura.

No trabalho desenvolvido por (LIANG et al, 1997) constataram que coluna da máquina estaria teoricamente produzindo seis componentes de erros na ponta da ferramenta, mas considerando que os erros de rotação do eixo árvore não tenham efeito na posição da ponta da ferramenta, somente cinco erros foram considerados. Estes formando o primeiro grupo de erros térmicos. O segundo grupo considerado foi os deslocamentos térmicos dos eixos na temperatura ambiente. Estes ficariam criando nove componentes de erros adicionais, mas somente seis foram considerados, assim como um dos três eixos foi usado como referência. O modelo volumétrico foi desenvolvido usando matriz de transformação homogênea (MTH). Os vetores de posição da ponta da ferramenta foram expressos no eixo árvore pelo sistema de coordenadas e depois transformados no sistema de coordenada da máquina. Similarmente, a peça de trabalho foi utilizada para fazer o cruzamento do sistema de coordenadas e depois comparada com o sistema de referência.

O trabalho foi direcionado na parte central de compensação dos erros térmicos. Dois tipos de dados foram obtidos como erro térmico em relação as coordenadas e a temperatura. Um modelo diferente foi criado para cada componente de erro exceto ortogonalidade e erros de paralelismo. Os componentes dos erros térmicos dependente da posição (ETDP) foram matematicamente modelados e sintetizados usando modelo sintético de erros para o propósito do erro de compensação em tempo real

MOU et al, (1997) apresentaram um trabalho com uma aproximação simplificada do problema de modelamento térmico e análise usando redes neurais. Como primeira análise, um modelo generalizado foi desenvolvido usando MTHs que relatava os erros de posicionamento na estrutura e os erros cinemáticos. Cada relação em conjunto foi modelada como uma relação da matriz de transformação e uma matriz de restrição conjunta, respectivamente. A previsão dos erros da máquina foi então usada para generalizar o sinal de compensação. Leituras de temperaturas foram combinadas com as leituras dos erros de posicionamento. A saída da rede neural foi usada para iterativamente modificar os coeficientes do modelo de erro.

CHEN et al (1997) chegaram em um rápido sistema de medida de set-up consistindo de um probe na máquina e artefatos, com objetivo de calibrar esses erros térmicos. O deslocamento do eixo-árvore foi calibrado usando um eixo montado do probe MP7 e um bloco padrão fixado na mesa de trabalho. A expansão térmica linear do eixo horizontal foi determinada pela variação do calibre de comprimento do tubo quartz colocado em paralelo com o eixo, enquanto que a leitura do eixo vertical foi conseguida usando um medidor de alto granito. A curva da coluna da máquina foi calibrada medindo as coordenadas do bloco padrão em dois níveis do eixo z. Quatro testes foram analisados na saída com o objetivo de estudar as características dos erros térmicos sob diferentes condições de corte.

CHEN et al (1997) usaram três camadas de RNA com um algoritmo supervisionado com backpropagation para o mapa de erros térmicos nas medidas de temperaturas. Um múltiplo modelo híbrido da RNA foi observado após cuidadosamente ser considerado que precisa-se usar uma simples saída da RNA (uma para cada erro térmico). Sendo, depois usada com grande eficiência em ambas as interpolações e extrapolações da previsão, sendo ineficaz quando a temperatura padrão foi totalmente diferente para estes modelos de cálculos. Foi então, por conseguinte, usado um modelo híbrido de RNA com múltiplas saídas.

TSENG et al (1997) verificaram todas as medidas de distribuição de temperatura possíveis, no Centro de Usinagem Vertical (CUV), tal como a temperatura do eixo, temperatura dos rolamentos em cada eixo e faixa de temperatura. Durante uma série de operações de corte na máquina-ferramenta, as leituras de temperatura mostram-se significativamente a geração de calor nas superfícies e guias de deslizamento. Consequentemente, as treze maiores medidas de deslocamentos térmicos foram

identificadas. Inclusive na estrutura da máquina, os rolamentos nos eixos x,y e z, as guias(em dois locais) e seis diferentes localizações do eixo. A faixa de temperatura foi monitorada para servir como referência. Um processo de corte em zigzag foi executado em trinta minutos com uma ferramenta de corte. Depois a ferramenta foi substituído pelo um probe ótico e os deslocamentos térmicos foram medidas. Os erros encontrados foram sucessivamente reduzidos entorno de 4 micrometros para cortes em geral.

MOU et al (1997) experimentaram conduzir estudos, variando no tempo os efeitos térmicos na exatidão da máquina ferramenta. 40 termopares foram instalados em vários lugares no centro de usinagem vertical. Na NAS979, peças padronizadas foram primeiramente medidas na MMC e os dados foram usados como referência. Estas partes foram instaladas na tabela da máquina, para interligar a sonda da máquina com o ciclo de usinagem disponível e utilizado. Esta sonda na máquina foi usada para repetidos perfis de temperatura no estudo da variação do tempo e dos efeitos térmicos na exatidão de posicionamento da máquina. O modelo de rede neural usava os valores de temperatura e os erros de posição para chegar em um sistema de previsão de posicionamento de erro. Uma vês que, após a rede treinada, ela permite prever os erros baseada nos valores de temperatura dos termopares. Usando o princípio da cinemática inversa, a compensação dos valores foram generalizados para os erros obtidos.

No caso da máquina-ferramenta hexapod (SOONS, 1997), o deslocamento térmico foi considerado a maior fonte de erro, proveniente da expansão térmico, devido a geração de calor pelo atrito no telescópio e no acionamento do fuso. A leitura da temperatura foi conseguida usando 34 termopares localizados principalmente nos suportes da máquina. Somente o atrito e o deslocamento observado da ferramenta, podem ser previstos, devido as dificuldades na determinação da distribuição de temperatura no fuso, sendo usado sensores na superfície externa da base da peça.

ALLEN et al (1997) desenvolveram várias técnicas para a análise do comportamento térmico de uma máquina. Uma das técnicas adotadas foi a gravação da sequência da imagem térmico enquanto a máquina realizava um simples ciclo. Como alguns elementos estruturais da máquina possuem uma condutividade térmico melhor que outros, estes elementos são responsáveis pelos maiores erros térmicos. Essas gravações das imagens térmicas desenvolveram um completo quadro da distribuição de temperatura na estrutura. Sensores sem contato e um laser interferométrico foram também usados para uma leitura direta das distorções térmicas entre a ferramenta e a peça de trabalho. Um

computador foi integrado com o sistema CNC de um centro de usinagem para conseguir alcançar um abrangente sistema de erros que compreendesse corte, erro térmico e geometria para o sistema de compensação. As informações térmicas foram coletadas de termistores em tempo real. As posições correntes dos deslocamentos foram lidas do controlador. O sistema de aquisição de dado, também coletou dados do interferômetro a laser e sensores capacitivos para o propósito da calibração.

O modelo de erro sintetizado avaliou o erro planar em duas direções. Os valores de erros foram então transferidos para o controlador CNC com objetivo de realizar a compensação do erro em tempo real.

JEDRZEJEWSKI et al (1997) estudaram o problema de correção dos deslocamentos térmicos nos três eixos de uma máquina-ferramenta. Na máquina analisada, as leituras dos pontos de temperatura foram primeiramente fixadas na estrutura da máquina perto dos rolamentos. As características técnicas do centro de usinagem foram determinadas assumindo alguns parâmetros operacionais. Valores de temperatura e deslocamentos térmicos foram medidos e usaram os coletores de dados. A previsão dos erros térmicos foi alcançada.

LI et al (1997) analisaram o atrito nos rolamentos do eixo-arvore, que é uma das maiores fontes de calor na máquina-ferramenta. E conseguiram a medida dos erros térmicos usando um simples conjunto de esferas em 1D. Este conjunto foi usado para medir os 21 erros geométricos de um centro de usinagem vertical de três eixos assim como os erros térmicos. Os deslocamentos térmicos da máquina de coordenadas podem ser rapidamente avaliados, pois este sistema de medidas é muito rápido. Como o atrito no eixo-árvore foi a maior fonte de calor, somente a influência deste eixo foi considerada. A compensação foi alcançada pela correção constante de parte do programa do CN. A cada 10 min os erros térmicos na direção Z foram calculados usando o modelo pré-estabelecido. Mais uma vez os valores foram obtidos, o programa foi corrigido pela adição da correção ΔZ no eixo considerado. Os erros térmicos foram assim compensados diante da usinagem realizada.

YANG et al (1998) trabalharam na previsão dos erros térmicos usando duas esferas. Trinta termopares foram instalados na máquina. O sistema de medição considerou o toque do probe em um artefato com duas esferas usadas como referência e os dados térmicos de um computador pessoal, figura 3.13.

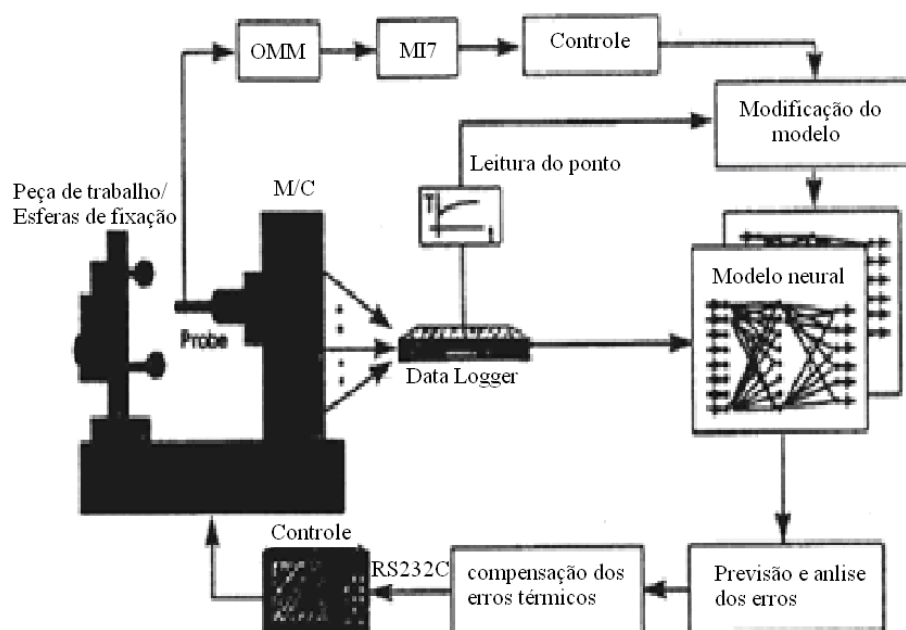


Figura 3.13 – Configuração do sistema de inspeção (Modificado de YANG et al, 1998)

Os valores medidos e os dados de temperatura são carregados no PC pelo o controlador do NC e Data logger, respectivamente. Erros térmicos volumétricos foram divididos em escalas. Os erros volumétricos foram representados pela diferença entre os valores medidos de duas esferas em um tempo “t” e os valores de referência das coordenadas de medidas da máquina de medição por coordenada (MMC). Os erros resultantes nas direções x, y e z foram assim determinados, usando os erros térmicos das esferas de referências e os erros térmicos volumétricos.

WANG et al (1998) trabalharam na suposição que havia também somente seis erros para cada eixo: Um erro de posição, dois erros de retitude, um erro “pitch”, um erro “roll” e um erro “yaw”. Uma máquina ferramenta de três eixos foi estudada para as 21 componentes de erros inclusive os três erros de perpendicularidade entre cada eixo. A matriz de transformação homogenia foi utilizada na análise do movimento volumétrico da máquina considerada como um corpo rígido.

YUAN et al (1998) mapearam um procedimento geral para a compensação geométrica, térmico e erros provocados pelas forças de corte. O modelo sintetizado dos erros para os erros térmicos e geométricos baseados no corpo rígido e suposição de pequenos erros. Usando MTHs, as coordenadas da ferramenta foram transformadas para a parte do sistema de coordenadas de referência. A componente de erro foi estimada usando um algoritmo de cinemática inversa. O vetor de erro volumétrico em qualquer posição foi

então formulado usando o modelo de síntese de erros. Este modelo é fundamentado a partir de um sensor local otimizado. O modelo de erros térmicos tende a ser linear e tem boa capacidade de interpolação e extrapolação para este caso.

KRULEWICH et al (1998) trabalharam na suposição que a distribuição de temperatura em uma região determinada pode ser estimada por um polinômio. A mesma pesquisa, embora seguida por outras anteriormente, envolvendo o uso de 100 sensores para capturar a completa distribuição térmica. O fato é que o erro térmico é relatado para integrar parte do perfil de temperatura ao invés de fazer uso do perfil completo. A necessidade de capturar o perfil completo foi assim eliminada. O método de integração Gaussiana foi usado e os dados obtidos para um número mínimo de pontos, a solução exata foi generalizada. Este método, embora aplicado somente para a posição independente do erro, foi também estendido para posição dependente dos erros usando um procedimento de integração semelhante.

YANG et al (1998) usaram o modelo generalizado da regra delta para prever o escalar do posicionamento e os erros térmicos volumétricos das máquinas-ferramenta de acordo com a mudança de temperatura ocorrido em cada ponto. Foram usadas duas camadas do modelo de redes neurais, consistindo de oito neurônios na entrada, nodos correspondendo aos sensores de leitura de temperatura e seis nodos de saída correspondendo a seis medidas de erros térmicos.

Na publicação, por OKAFOR et al (1999), baseados na cinemática dos corpos rígidos, desenvolveram uma metodologia para compensação dos erros volumétricos, por meio de um modelo matemático usado para calcular e prever o vetor do erro resultante na interface ferramenta-peça de trabalho para compensação do erro, modelados através de matrizes de transformação de coordenada homogenia. Contabilizados para a geometria e erros térmicos em um centro de usinagem vertical (CUV). A máquina ferramenta investigada foi a Cincinnati Milacron CNC Sabre 750 de 3 eixos, com arquitetura de controle aberta. Os erros paramétricos da máquina são modelados usando técnicas estatísticas tal como análises de múltipla regressão ou redes neurais artificiais. Estes modelos experimentais são então atualizados em tempo real usando sensores de temperaturas estrategicamente fixados na estrutura da máquina. Como resultado encontrado, o erro volumétrico de compensação dos valores, é carregado como compensação de erros de tabela do controle da máquina para aplicar o software baseado em erros de compensação.

Uma das mais importantes considerações é o controle de temperatura (RAMESH et al, 2000). Este controle é imprescindível a máquina-ferramenta, no que diz respeito à temperatura ambiente, além do fato que na máquina existe várias fonte de calor.

Uma generalização aproximada que tem sido proposta por muitos pesquisadores, na direção de amenizar os problemas de temperatura não uniforme, é que todos as soluções recaem em uma das três seguintes categorias (RAMESH et al, 2000).

- a) Controle do fluxo de calor no ambiente das máquinas-ferramenta.
- b) Reprojetado do sistema da máquina-ferramenta para reduzir a sensibilidade ao fluxo de calor.
- c) Compensação dos erros através do software e do sistema de controle da máquina.

O comportamento termo elástico das máquinas-ferramenta é um dos mais importantes fatores na determinação da capacidade de exatidão de usinagem. Devido a inexatidão do conhecimento das fontes de calor, das condições térmicos de contorno, mecanismos de transferência de calor etc. A previsão exata do comportamento da máquina é muito difícil e complexa. Aonde matérias com baixo coeficiente de expansão, incluindo um bom projeto do sistema de controle de temperatura são usadas, possibilitando alcançar a mínima distorção térmico sendo (WEEK, 1995, apud RAMESH et al, 2000), mas ainda não suficiente.

O fluxo de calor na operação de corte é a maior fonte de erro térmico na consideração final da exatidão de trabalho em uma peça usinada. Embora esta exatidão dependa da taxa de remoção do material usinado, a qual é menor no corte final ou no acabamento. A intensidade de calor gerada é resultado dos violentos efeitos de operação na exatidão obtida. Este fato tem prioridade sobre todas as outras fontes de geração de calor, principalmente no caso de grande volume de produção. A principal solução destes problemas, consegue-se através do alto volume do fluido refrigerante que é usado para dissipação de calor. Até novas soluções foram conseguidas quando se usa máquinas de alta velocidade corte e técnicas que desviam o calor do cavaco da peça de trabalho. Uma das sugestões para chegar a minimizar o problema dos erros térmicos é o uso de caixas de controle de temperatura. Esses recintos são designados para conter a máquina e fornecer uma atmosfera controlada. Na tentativa de manter constante a temperatura durante o processo de usinagem de cada peça, parece ser a melhor opção do ponto de vista de projeto. As caixas têm a vantagem de ser movidas juntamente com a máquina. As

construções de salas de temperatura controlada são de alto custo, além do fato de dificultar a manutenção.

Até a instrumentação é concentrada, pesquisas têm usado termopares para a monitoração das temperaturas. Termopares de resistência de platina e termistores para as medidas da variação de temperatura de diferentes elementos da máquina-ferramenta. Uma das técnicas inovadora foi usada nas medidas de temperatura da rotação da peça de trabalho, que consistia em colocar um termopar no fluido hidráulico que refrigera a peça de trabalho e mantém fiel a temperatura de usinagem (BRYAN J., 1990 Apud RAMESH et al, 2000).

Como foi constatada em uma parcela das pesquisas mostradas a cima, sempre existe o objetivo de criar uma sistemática de compensação de erros, a partir das técnicas de modelamento descritas, os dois maiores parâmetros que precisam ser identificados na saída do modelo são a temperatura ao longo da máquina e a medida do deslocamento térmico resultante na ponta da ferramenta, que servirá posteriormente para fazer a compensação do erro. Foi verificado também que existem vários pontos críticos na máquina em que a temperatura precisa ser monitorada em um período preestabelecido. Diferentes métodos foram explorados para análise dos dados obtidos, com o objetivo de desenvolver um adequado método de compensação.

3.2.1-Pesquisas recentes na análise dos deslocamentos térmicos em máquinas-ferramentas

No trabalho desenvolvido por (TSUTSUMI E SAITO, 2003) apresentam um algoritmo para identificar deslocamentos térmicos individuais, assim como desvios angulares lineares em torno de eixos rotativos em centros de usinagem de 5 eixos. Neste estudo, três tipos de movimentos simultâneos nos eixos de análises são concebidos para cada eixo rotativo, identificando os desvios. Na medição, dois eixos de translação e um eixo de rotação são simultaneamente controlados para manter a distância constante entre a ferramenta e uma mesa de trabalho. Um sistema ballbar foi utilizado para medir os deslocamentos em relação ao comprimento nominal de referência do volume de trabalho, porque este instrumento é um dispositivo, cujo seu comprimento é livremente alterado. No controle do três eixos em movimentos, o sentido sensível do ballbar é mantido constante. A fim de determinar os desvios, obtiveram-se oito equações apartir da relação entre as

excentricidades obtidas e as trajetórias circulares medidas e as devidas aproximações, apartir do modelo matemático com base nas simulações. Na simulação, o modelo matemático considerando os desvios determinados é desenvolvido e, em seguida, os diagramas característicos são preparados para cada desvio e deslocamento do movimento de controle dos três eixos. Baseado nestes resultados, propuseram um procedimento para identificar os deslocamentos e desvios térmicos específicos em centros de usinagem de cinco eixos.

No trabalho publicado por YUAN et al, (2007) propuseram um método modificado que combina feed-forward de uma rede neural (RN) e filtros híbridos para melhorar a precisão e reduzir o tempo de processamento computacional para a previsão do deslocamento térmico de uma máquina-ferramenta. O filtro híbrido consiste na regressão linear (RL), média móvel (MM) e autoregressivos (AR). Suas saídas servem como entradas de uma RN, que são estimadas pelas relações estáticas e dinâmicas entre as distribuições de temperatura e deslocamentos térmicos. Este método modificado permite a precisão de propagação entre a entrada e a saída das camadas da RN, assim como a estática a ser melhorada e o tempo de aprendizagem a ser reduzido. Além disso, o método modificado é comparado com outros três, os quais são: Média móvel e autoregressivos tradicional, RN e RN combinado com regressão linear por análise numérica e dados experimentais. Na análise, as margens de erro das diferentes abordagens são comparadas usando um modelo de elemento finito, mostradro na figura 3.14, que é determinado para as relações entre o deslocamento térmico e a distribuição da temperatura.

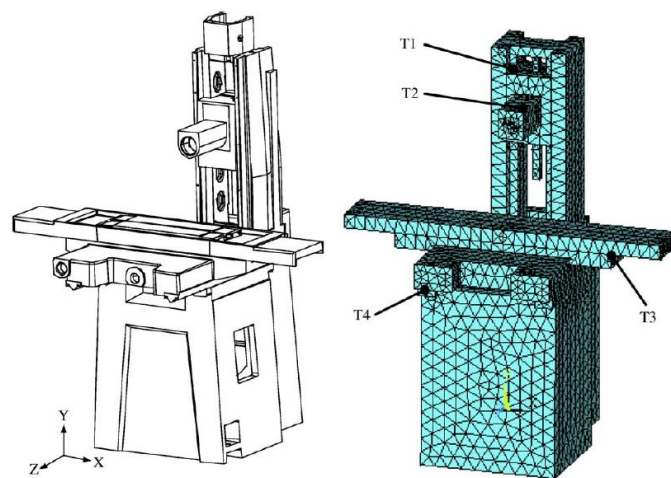


Figura 3.14- Desenho original da máquina e modelo prático em elementos finitos com alguns termopares (Modificado de YUAN et al, 2007).

Além disso, experimentos práticos destas abordagens para uma máquina de usinagem foram realizados para comparar as previsões de deslocamento de acordo com as medições de temperatura.

JEI ZHU (2008) teve como objetivo na sua pesquisa desenvolver uma metodologia sistemática, para melhorar a precisão de projetos de máquinas-ferramentas de cinco eixos, testando também na fase de aplicação prática. Para atingir o objetivo final da sua pesquisa ele propôs as seguintes tarefas:

(1) Aplicar a análise térmica em elementos finito. Análise nodal térmica foi explorada para a estratégia de localização de sensores de temperatura e modelagem de erro térmico. A análise de elementos finitos (AEF) foi utilizada como ferramenta para analisar a essência do processo térmico dos elementos de máquina. Experimentos práticos e simulações com métodos numéricos foram realizados para ilustrar a existência e viabilidade da análise térmica nodal.

(2) Propor a análise de loop térmico. A máquina-ferramenta é decomposta em várias fontes térmicas, que são analisadas separadamente com base na análise térmica nodal, ao longo do ciclo térmico. Os erros térmicos totais são obtidos através da soma vectorial. Esta metodologia associada à análise nodal térmica facilita a compensação de erro térmico para vários tipos de máquinas-ferramenta.

(3) Desenvolver um ajuste eficiente entre o eixo rotativo e a metodologia de compensação. O componente de erro térmico provocado pelo movimento de rotação pode ser identificado pela análise de cinemática inversa. A formulação matemática e lógica por trás deste método é analisada. Algoritmo de calibração para uma correção eficaz do erro geométrico é determinado para melhorar o posicionamento e a precisão de uma máquina-ferramenta de cinco eixos. As principais contribuições desta pesquisa incluíram a aplicação prática da análise nodal térmica para os elementos de máquinas-ferramenta, o desenvolvimento de um ciclo térmico inovador, a proposta de um quadro de compensação do erro térmico generalizado, a identificação e medição de componentes de erro geométricos do eixo rotativo para os cinco eixos da máquina-ferramenta analisada.

Segundo CREIGHTNON et al (2010) relataram que os erros termicamente induzidos são as maiores causas para a maioria das perdas de precisão em máquinas-ferramenta na fabricação de peça sem compensação. Esta questão é particularmente relevante no campo dos deslocamentos térmicos e características dimensionais de peças fabricadas pelo processo de usinagem. O eixo-árvore de uma máquina ferramenta é a

principal fonte de erros térmicos. Outras fontes de erros térmicos incluem elementos de drives, calor gerado nos motores lineares e rolamentos. Nos processos de fabricação possuem também influências térmicas externas, tal como as variações da temperatura ambiente. As estratégias básicas para diminuir a magnitude desses erros térmicos podem ser alcançadas pela falta de sensibilidade térmica, controle e compensação em máquinas-ferramenta. Neste intuito, CREIGHTNON et al (2010) descreveram um esquema de compensação em relação a expansão do eixo em uma direção, para reduzir os erros térmicos na fabricação de peças usinadas por máquinas-ferramenta. A implementação deste plano é naturalmente simples e pode ser facilmente executado em um ambiente industrial com a mínima mão de obra e modificações em componentes da máquina. Inicialmente uma análise em elementos finitos (AEF) é realizada sobre o eixo árvore. Esta AEF correlata o aumento de temperatura, devido o aquecimento dos rolamentos do eixo e do motor com os deslocamentos térmicos estruturais. Adicionalmente, os deslocamentos estruturais ao longo do eixo com as mudanças de temperatura até as variações dos pontos crítico são experimentalmente obtidas por um sistema de leitura de termopares e leitor de capacitância. Os valores experimentais medidos de temperatura e os deslocamentos estruturais qualitativamente do eixo estão bem de acordo com os resultados obtidos pela AEF. Consequentemente um modelo dos deslocamentos térmicos de eixos de micro máquinas de alta velocidade é formulado para obter previamente resultados experimentais, isso efetivamente prever os deslocamentos no eixo em relação as variações de velocidade. A implementação deste modelo de pesquisas em máquinas-ferramenta é esperado para reduzir os deslocamentos térmicos induzidas no eixo em até 80%. Levando em consideração um teste aleatório de forma geral, com variações da velocidade do eixo.

Em máquinas-ferramenta de controle numérico, o erro térmico no fuso de esferas recirculantes induz a um erro de posição direta. A alta velocidade do sistema do fuso naturalmente gera mais calor e resulta em maior expansão térmica, prejudicando a precisão do posicionamento. No trabalho publicado por (Z.Z. XU et al, 2011), discutiram a colocação de um sistema de refrigeração a ar em um eixo do fuso de esferas recirculantes para diminuir os erros térmicos e atingir o equilíbrio térmico da máquina mais rápido. A fim de estimar o erro térmico do sistema de Fuso de Esferas Recirculantes (FER) e a eficácia do sistema de arrefecimento de ar. Os modelos de comportamentos térmicos utilizando, o método do elemento finito (MEF) e de um método modificado de capacitância aglomeradas foram desenvolvidas separadamente. A geração de calor, a partir

da fonte principal considerando o sistema de FER e outras condições de contorno. Os modelos completos foram usados para simular uma distribuição de temperatura, o deslocamento térmico e desempenho do sistema de refrigeração a ar. Comparando-se as experiências mostram que estes métodos podem também prever o comportamento térmico do sistema de fusos e o desempenho do sistema de arrefecimento. A precisão do posicionamento melhorou significativamente com o uso do sistema de arrefecimento a ar no sistema da unidade de fuso de esferas recirculantes.

Uma das áreas fundamentais na usinagem de alta precisão é representada pelo monitoramento da máquina-ferramenta no estado térmico. A compreensão deste estado fornece informações importantes sobre o estado geral da máquina, tais como o desempenho adequado do sistema de arrefecimento, bem como a compensação dos deslocamentos térmicos da máquina durante a fabricação de peças, através de softwares. VYROUBAL (2012) apresenta um método focado em compensação dos deslocamentos térmicos da máquina-ferramenta analisada nas direções dos eixos, com base na análise de decomposição dos elementos estruturais da máquina, figura 3.15.

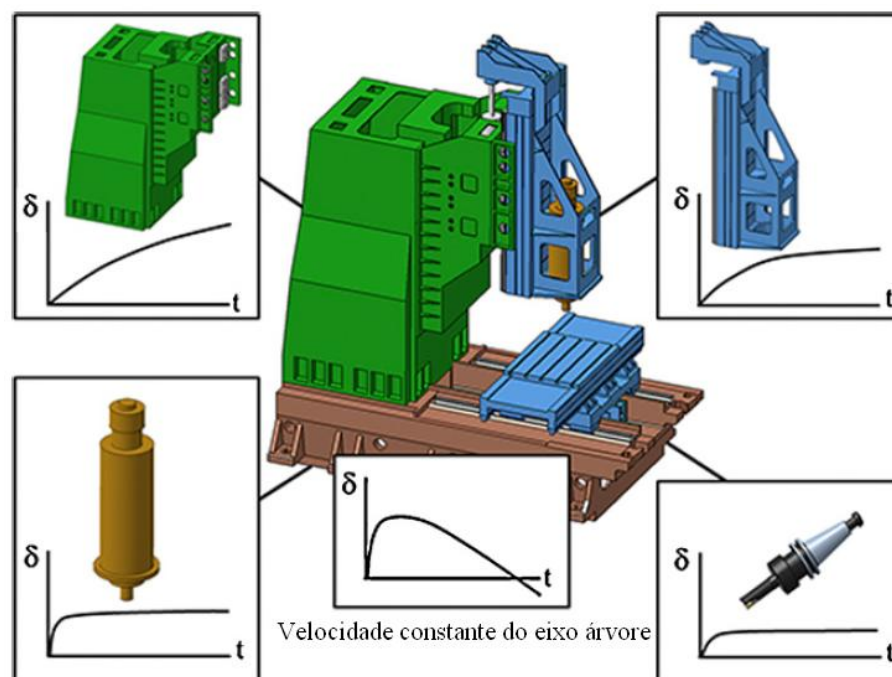


Figura 3.15- Elementos estruturais da máquina-ferramenta analisada com seus respectivos deslocamentos (δ) ao longo do tempo(t) (Modificado de VYROUBAL, 2012)

A decomposição da máquina é realizada com a ajuda da armação de medição especialmente desenvolvida, o qual é capaz de medir o deslocamento da coluna da máquina, do cabeçote do fuso, e da ferramenta simultaneamente. A compensação é calculada como uma soma de equações de regressão multinomiais usando a leitura de temperatura. São usados novos locais de medida de temperatura, como o líquido de refrigeração do fuso ou do no espaço de trabalho da máquina. São utilizados também, para melhorar a precisão do cálculo, um processo de decomposição térmica dinâmica que permite descrever cada parte da máquina de forma mais precisa do que a curva do deslocamento habitual, normalmente usada para a máquina completa ou geral. O deslocamento residual térmico da máquina é consideravelmente reduzido com esta estratégia de baixo custo e eficaz. A vantagem é também na simplicidade do método apresentado, que é clara e pode ser usado também com máquinas com sistemas mais lentos de controle e sem um sistema computacional forte.

3.4-CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Sempre com o foco de eliminar ou minimizar os erros térmicos em máquinas-ferramenta, seja qualquer tipo ou modelo, trabalhos extensivos, como os descritos neste capítulo, foram e estão sendo realizados constantemente nos limites das medidas e compensação dos erros. Com o objetivo de simular as distorções térmicas, a máquina é colocada normalmente num ciclo contínuo em diferentes velocidades do eixo-árvore. Já que não é possível simular exatamente as condições de corte ou usinagem. A máquina é geralmente projetada para trabalhar em parâmetros consideravelmente acima do normal, tal que o calor gerado é semelhante ao gerado no ambiente de produção. Uma das primeiras atividades na fase de medição é a leitura da temperatura nos pontos críticos ou estratégicos na estrutura da máquina. Em geral, os termopares são utilizados para medir esta grandeza. Os dados destes sensores são então transmitidos normalmente para um PC dando a continuidade do processamento. No meio tempo, os diferentes componentes de erros da máquina são também medidos usando, laser interferométrico, probe capacitivo, probe ótico ou artefatos para fazer a verificação do erro térmico em comparação a leituras de referência ou nominais. Em alguns casos, sensores capacitivos sem contato foram usados também para medir as distorções térmicas da estrutura da máquina, particularmente na ponta ferramenta. Os dados dos erros térmicos e a leitura de temperatura, de acordo com a

sequência de chegada, são lançados para o modelo de erro generalizado que pode prever o erro dependendo dos valores das leituras de temperaturas, durante a usinagem ou simulação. Os valores de erros previstos são então convertidos, dependendo do número de eixos existente na máquina, nas componentes de erros individuais com a ajuda da matriz de transformação homogênea. Todas essas técnicas descritas, armazenam dados de temperatura, sinais do encoder de feedback da máquina e a geração do mapa de erros térmicos correlacionados com temperatura. A avaliação da compensação pode ser analisada a cada eixo de saída e interferindo nos dados da máquina, são todos analisados na saída por um PC ou microcontrolador situado externamente. Os dados compensados são então transferidos para o controlador CNC que carrega a saída com a atual compensação. A compensação é realizada ou pela interrupção do encoder de feedback e adicionando ou subtraindo os pulsos de quadratura ou alterando a origem dos eixos durante o corte. Assim a compensação dos erros térmicos em tempo real pode ser realizada.

Diante de tantas técnicas utilizadas para identificação e compensação dos erros térmicos em máquinas-ferramenta, constata-se que a previsão dos erros térmicos é mais utilizada que a tentativa de realizar tal procedimento em tempo real, visto que ocorrendo a compensação, a taxa de remoção do cavaco é alterada e consequentemente o calor gerado não será o previsto, pois a taxa de aquisição de dados por mais rápida que seja o processamento, ainda existe um certo delay. E na maioria das técnicas, verificou-se ser mais eficiente a aquisição dos dados de temperatura através de termopares, para fazer a correlação com os deslocamento térmicos resultante na ponta da ferramenta, seja qual for a máquina.

Os sistemas de verificação dos deslocamentos e eficácia da mesma, ainda estão muito complexos e de difícil instalação, além de modelos de erros sintetizados, seja por MTHs, ou método de integração Gaussiana, ou por polinômios, por exemplo. Logo não basta apenas desenvolver a técnica mais eficiente, mais sim, desenvolver também a mais prática. Tanto que possam serem implementadas nas máquinas já em uso, como nas futuras máquinas que serão fabricadas.

A questão das instalações dos sensores de deslocamentos nas máquinas se torna de difícil acesso e de difícil implementação, sendo, portanto o mais fácil e rápido de instalar o sistema de medição ballbar, que pode simultaneamente medir tanto os erros térmicos como os geométricos, resultantes na ponta da ferramenta em relação a base da peça a ser usinada.

Como também na coleta de dados que servirão de “alvo” ou “valor desejado” de uma possível RNA.

A técnica da RNA parece ser a mais adequada para o problema de deslocamentos térmicos, seja qual for o número de eixos que a máquina possua, ou o número de termopares instalados, pois pode trabalhar com sistemas MIMO, para a correlação das leituras de termopares localizados em pontos estratégicos da máquina, dependendo das fontes de calor, e o deslocamento de cada eixo de uma máquina-ferramenta ou do erro volumétrico. Podendo ser auxiliada ou não com o MEF ou AEF na comparação dos deslocamentos reais ou simuladas de qualquer máquina-ferramenta. Sendo deslocamentos lineares ou não, pois a rede pode passar por um processo de aprendizagem de acordo com cada máquina ou processo adaptativo, dependendo da sua topologia, número de neurônios e função de ativação, independente do tipo de peça a ser usinada e da quantidade de horas que a máquina possa trabalhar. A rede, dependendo é claro, da sua otimização, é capaz de prever os deslocamentos com grande exatidão, após ter passado pelo um processo de “aprendizagem” em relação ao comportamento térmico da máquina, para cada situação diferente e utilizar esse aprendizado para possíveis correções ou compensações. Com o objetivo de conseguir uma maior exatidão da máquina, embora a exatidão não dependa somente da rede, mais sim de todo o conjunto de sensores, a forma como foram instalados, o contato ideal ou não, a atuação do controlador na máquina, nas correções das coordenadas, que serão compensadas, o tempo total de usinagem etc. Em fim, de todo o sistema de compensação de erros térmicos. O ideal é que cada máquina tenha seu próprio software de compensação ou sua rede neural, o que acontecerá em um futuro muito próximo, mediante tantas pesquisas e metodologias desenvolvidas nesta área.

CAPÍTULO IV

APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS TÉRMICOS DE MÁQUINAS- FERRAMENTA

4.1-INTRODUÇÃO

Neste capítulo é abordada uma introdução sobre a fundamentação do método de elementos finitos, assim com seu uso em uma estrutura idealizada de máquina-ferramenta, por meio do software NX-7.5 (Solve Nastran), enfocando os deslocamentos térmicos da máquina analisada, tanto em um estado permanente como em um estado transiente de temperatura. Será usado um princípio de medição semelhante a um sistema Ballbar para fazer a leitura das deformações em pontos específicos como também na extremidade de um ferramenta, relacionando estas deformações com as temperaturas coletadas próximas as fontes internas de calor consideradas, através de nós que simbolizam o uso de termopares para aquisição da leitura de temperatura, durante as simulações nos tempos especificados para cada caso. Além disso é verificado se as técnicas desenvolvidas neste trabalho, possibilita a determinação da margem de erro tanto em máquinas de medição por coordenada como em máquinas-ferramenta.

4.2-CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos é um método de solução aproximada de cálculo de sistemas contínuos. A estrutura, o componente mecânico ou, de forma geral, o corpo contínuo é subdividido em um número finito de partes (os elementos), conectados entre si

por intermédio de pontos discretos, que são chamados de nós e o conjunto de nós e elementos formam a malha da estrutura a ser analisada. A montagem dos elementos, que constitui o modelo matemático, tem o seu comportamento especificado por um número finito de parâmetros. Em particular, nos problemas de análise estrutural, os parâmetros são os deslocamentos nodais, que são as incógnitas do problema.

É próprio da mente humana subdividir os sistemas em seus componentes individuais, ou em seus elementos. Assim, surge a ideia de que, a partir do entendimento do comportamento de cada elemento, é possível entender o comportamento do conjunto, por mais complexa que possa parecer, ou seja, compreender o todo entendidas as partes. Para um engenheiro, um técnico em geral, um cientista, este é um caminho natural para abordagem de um problema. Esse raciocínio tem implicações também nos métodos matemáticos utilizados para a descrição do comportamento dos sistemas (ALVES, 2002).

Segundo SOUSA (2005), certos problemas da engenharia para serem solucionados necessitam da idealização do objeto de estudo, neste caso a estrutura, definindo um modelo de cálculo. A definição desse modelo passa pelo entendimento do problema físico a ser simulado.

A abordagem do equilíbrio estático/dinâmico de uma estrutura ou de uma máquina pode ser efetuada considerando-a um sistema discreto. É o que acontece quando se trabalha com o modelo ou Método de Elementos Finitos (MEF). A solução aproximada simula a estrutura como uma montagem de elementos que tem um comprimento finito (e não diferencial). Assim, o sistema é subdividido em um número finito de partes ou elementos, sendo assim a estrutura inteira é modelada por um agregado de estruturas “simples”.

No sistema discretizado não se pretende calcular os deslocamentos dos infinitos pontos da viga ou da placa ou da estrutura, ou mesmo de uma máquina, como no caso contínuo. Em uma primeira instância, são calculados somente os deslocamentos de alguns pontos, que são os nós do modelo. Porém, julga-se que o número de pontos discretos escolhidos seja suficiente para representar o deslocamento do conjunto inteiro de forma aproximada.

O MEF foi utilizado neste trabalho de tese, como ferramenta confiável e consolidada que representa uma aproximação bastante considerável do comportamento real da máquina-ferramenta estudada. Mas que pode ser aplicado em qualquer outra máquina.

4.2.1-Análise térmica utilizando método dos elementos finitos

Quando o problema envolve encontrar a temperatura, cuja distribuição é função do espaço e do tempo a função aproximada, segundo (SILVA, 2003 apud VIEIRA, 2011), assume a forma da equação 4.1:

$$T = \sum_i^n [N]^i \{T\}^i \quad (4.1)$$

Sendo:

$[N]^i$ – Matriz das funções de forma no espaço analisado.

$\{T\}^i$ – Temperatura para cada nó em um determinado instante

A partir da Equação 2.2, no capítulo II, que representa a equação de condução de calor e através do teorema de Gauss, segundo SILVA (2003) os fluxos de calor nos contornos se apresentam como descritos na equação 4.2:

$$\int_{\tilde{U}} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} [N]^i d\tilde{U} - \int_{\tilde{U}} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial N}{\partial z} \right]^i \begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix} = \int_{\tilde{U}} Q [N]^i d\tilde{U} - \int_{\tilde{A}} (qn) [N]^i d\tilde{A} \quad (4.2)$$

4.3-SISTEMA DE MEDIÇÃO BALLBAR

Atualmente, o Ballbar telescópico, figura. 4.1, é o instrumento de medição aceito universalmente como o mais prático, conveniente e flexível para a avaliação da exatidão de medição de contorno de máquinas-ferramenta CNC. Ele nos fornece a variação das coordenadas nos eixos X, Y e Z, por meio de simples movimentos de trajetória semiesférica a partir de uma extremidade de referência segundo o fabricante RENISHAW.

O Ballbar telescópico, que não deve ser confundido com o Ballbar de comprimento fixo utilizado para Máquina de Medição por Coordenadas (MMC), permite uma verificação simples e rápida do desempenho de posicionamento da máquina-ferramenta CNC em relação às normas internacionais (por exemplo. ISO, ASME, etc.), auxiliando os

usuários a comparar e acompanhar o desempenho das suas máquinas e rapidamente diagnosticar os problemas que requerem solução.

Tal instrumento de medição possui exatidão do sensor Ballbar na ordem $\pm 0,5 \mu\text{m}$ (a 20°C) e Resolução do sensor $0,1 \mu\text{m}$ ($4 \mu\text{in}$). Sendo, portanto, capaz de detectar as deformações térmicas que ocorrem na máquina durante o processo de usinagem.

O modelo lançado em 1992 (QC10) continuou em produção até outubro de 2009, quando foi substituído pelo sistema QC20-W. O novo sistema QC20-W baseia-se em um projeto de sensor completamente novo, com tecnologia sem fio Bluetooth e capacidade de teste e análise consideravelmente ampliada. Os Ballbars já foram adotados por milhares de usuários de máquinas-ferramenta ao redor do mundo e são considerados equipamentos vitais pela maioria dos fabricantes de máquinas-ferramenta (Fabricante RENISHAW).

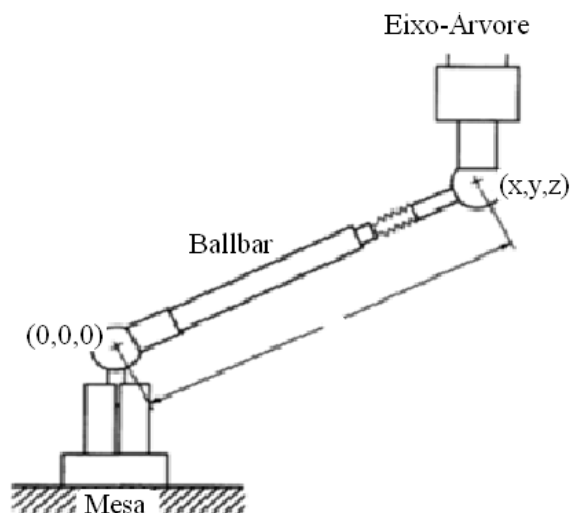


Figura 4.1- Ballbar telescópico (Modificado de HEUI, 1997)



Figura 4.2- Demonstração do uso do Ballbar (Fabricante RENISHAW)

Considerando a máquina-ferramenta tipo coluna de três eixos, figura 4.3, tem-se como exemplos das deformações térmicas, ocorridos nas direções indicadas do centro de usinagem tipo coluna nos planos mostrados na figura 4.4, utilizando o sistema ballbar de medição, semelhantemente ao exemplo mostrado na figura 4.2.

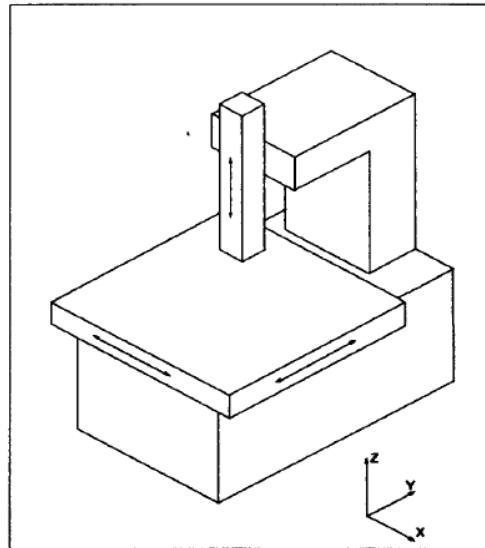


Figura 4.3- Centro de usinagem tipo coluna (Modificado de HEUI, 1997)

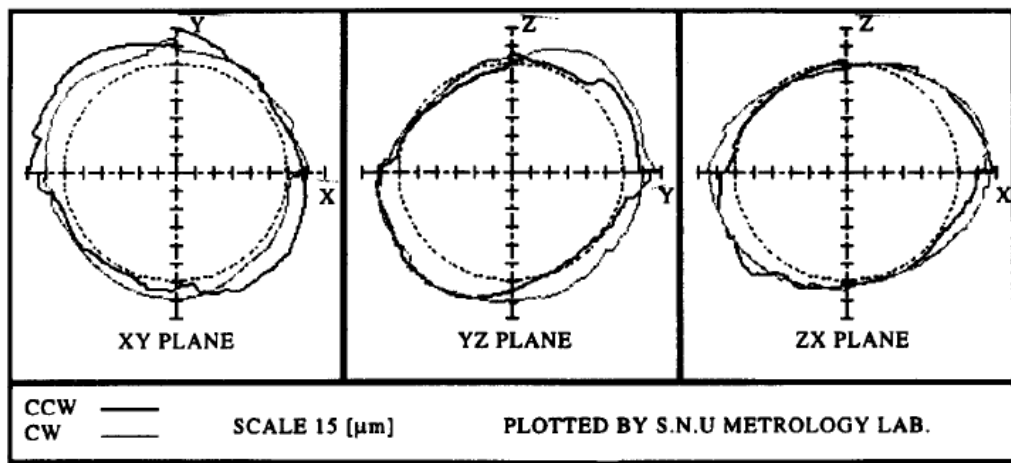


Figura 4.4- Plotagem dos dados do sistema Ball Bar da máquina tipo coluna (Modificado de HEUI, 1997)

O Ballbar é fixado nas superfícies de referências através de suas bases magnéticas e a variação do seu comprimento nos planos considerados é então reconhecida através de um sistema de aquisição de dados.

4.4-ANÁLISE EM MEF USANDO UM BALL BAR VIRTUAL

A metodologia que foi empregada para um levantamento dos erros térmicos apresentados em máquinas-ferramenta por meio do sistema de medição Ballbar agora de forma virtual nas análises em MEF. Foi adaptada em uma máquina virtual semelhante a da figura 4.3, que é uma máquina-ferramenta tipo coluna de três eixos, Este modelo simplificado de máquina-ferramenta foi redesenhada no software de simulação em elementos finitos NX-7.5, figura 4.5, de forma simplificada, cuja as considerações são vistas logo adiante. A figura 4.5 que se encontra em perspectiva poderá ser vista em maiores detalhes no apêndice A.

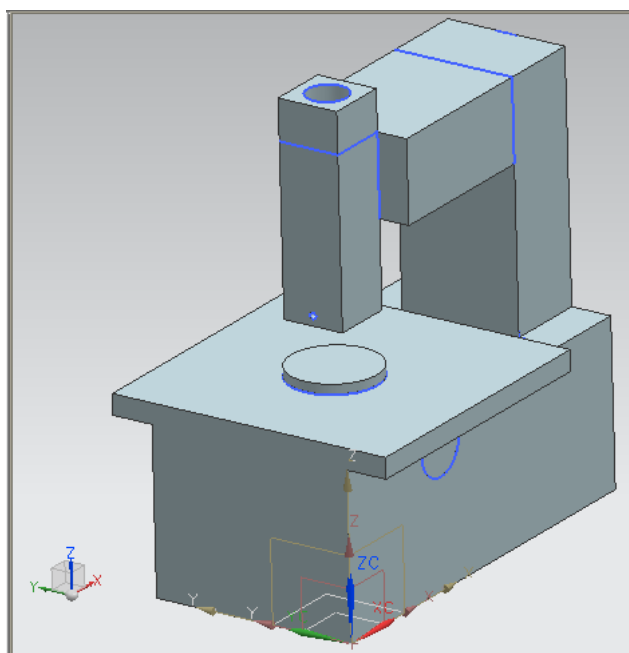


Figura 4.5- Centro de usinagem tipo coluna redesenhada no ambiente do NX.

4.5- CONSIDERAÇÕES DA PRIMEIRA ANÁLISE EM ESTADO PERMANENTE DE TEMPERATURA

O modelo de máquina-ferramenta usada para análise estrutural foi o centro de usinagem tipo coluna como mostrado na figura 4.3, a máquina foi desenhada no software NX-7.5 no ambiente de MEF e em seguida criada a malha de toda estrutura conforme figura 4.6.

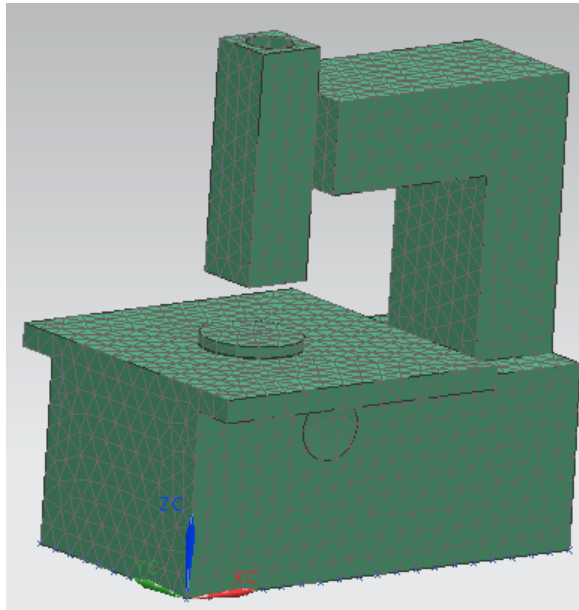


Figura 4.6- Centro de usinagem tipo coluna redesenhada em MEF

Os parâmetros iniciais para análise estruturais, figura 4.7, estão relacionados abaixo:

- Material da Máquina-Ferramenta: aço de densidade $7.829 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
- Condições de contorno estrutural e base da Máquina-ferramenta engastada
- Tamanho do elemento: 50mm
- Tipo do elemento: tetraedro com quatro nós
- Tempo de análise: 3600s

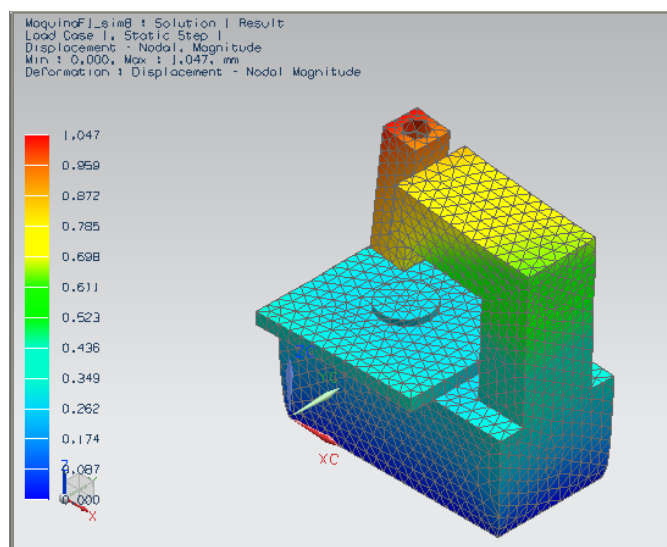


Figura 4.7- Analise estrutural para 3600s, base engastada.

Os parâmetros iniciais para análise térmica, figura 4.8a, estão listados abaixo:

- Fontes de calor: Algumas fontes internas de calor existentes em uma máquina-ferramenta.
- Tempo de análise: De 0 a 3600s
- Mapeamento térmico realizados para os tempos: 0, 360s, 720s, 1080s, 1440s, 1800s, 2160s, 2520s, 2880s, 3240s, 3600s
- Variação de temperatura: de 20 a 120°C
- Condições de contorno térmica: Temperatura estipulada em cada face da máquina-ferramenta em contato com os motores, com os mancais e o par ferramenta peça, como mostrado na figura 4.8a e 4.8b.

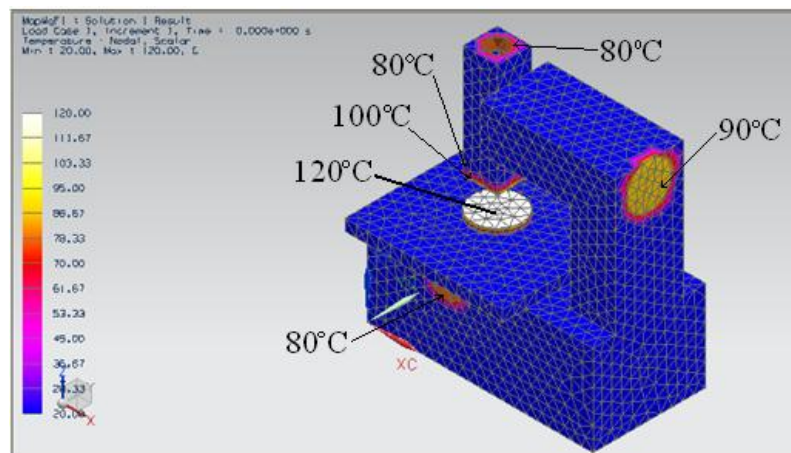


Figura 4.8a- Analise térmica para 0s

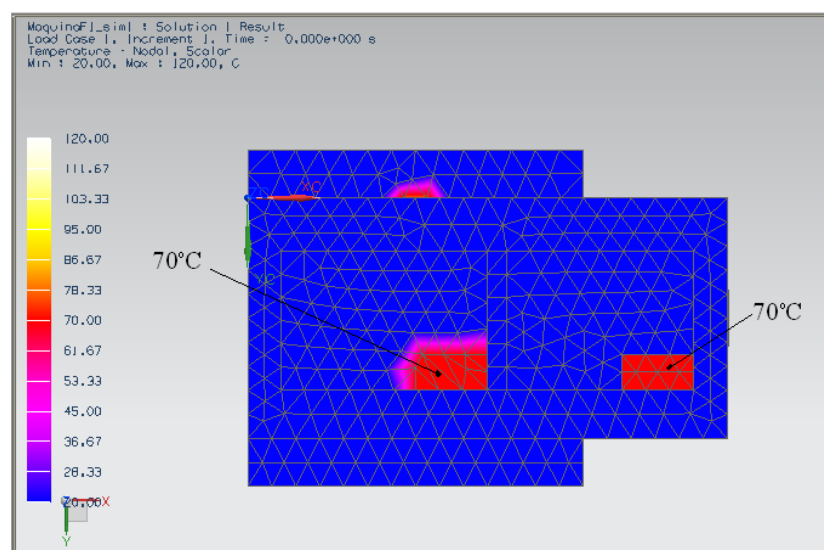


Figura 4.8b- Analise térmica para 0s

4.5.1 Aplicação de um Ballbar virtual usando MEF

Primeiramente foram analisados os deslocamentos na base da peça ou círculo base(Cb) como mostrado na figura 4.9. Pontos entornos de uma base circular, onde presuppõe que será fixada a peça a ser usinada.

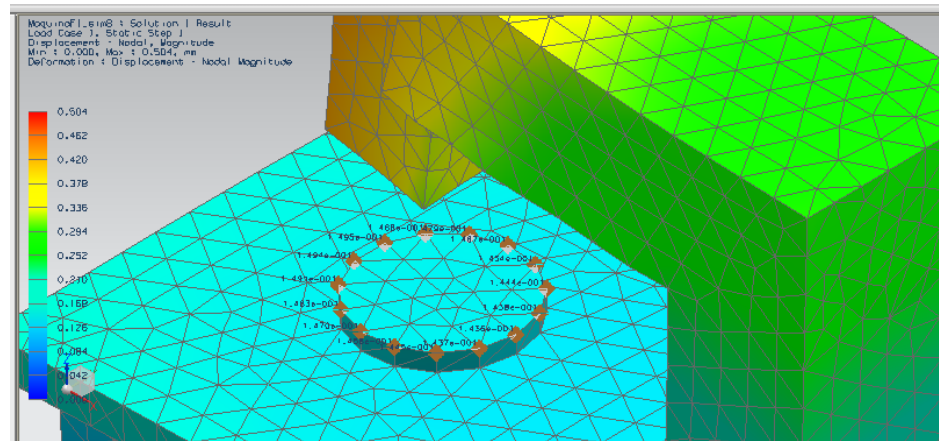


Figura 4.9- Pontos do Círculo base analisados

As condições de contornos estão ilustradas nas figuras 4.7, 4.8a e 4.8b, ou seja as temperaturas das fontes de calor para análise térmica e engaste na base da máquina para a análise estrutural. O próximo passo foi referenciar a distância de um ponto fixo do porta ferramenta (PF), nó 3248 conforme figura 4.10. Para simular o posicionamento de um Ballbar virtual tanto em relação ao círculo base como também a um ponto fixo do porta ferramenta.

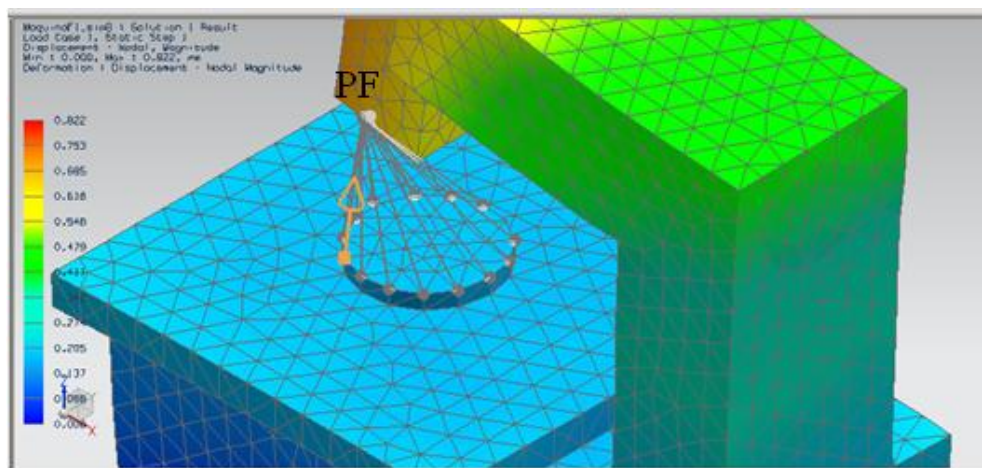


Figura 4.10- Medidas da distância de um ponto fixo à base circular

Após realizado o procedimento anteriormente descrito obteve-se nos gráficos a seguir os deslocamentos relativos a 15 pontos da base circular em relação a um ponto fixo no porta ferrameta (PF), simulando o sistema de medição Ballbar, para os tempos considerados na análise de estado permanente, no período de 3600s. Como mostrado na figura 4.10.

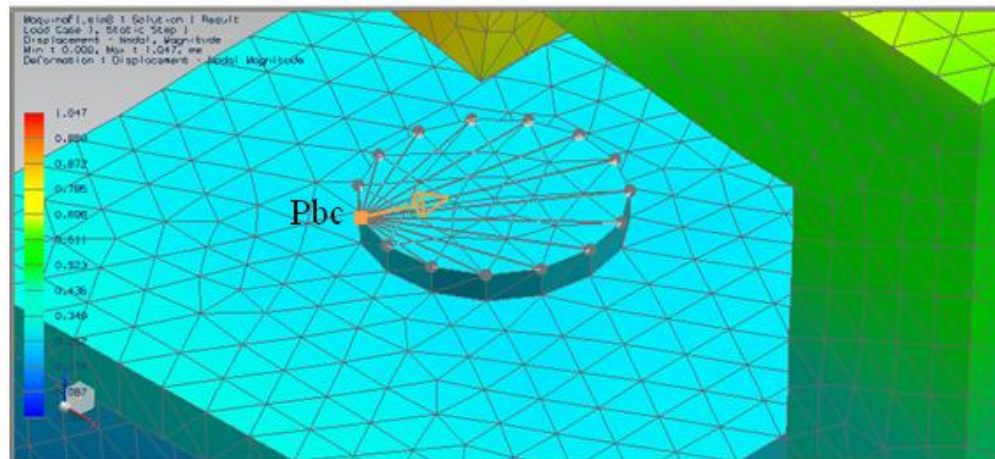


Figura 4.11- Medidas entre um ponto fixo e os demais pontos restantes do círculo base.

Em seguida, realizou-se as simulações para deslocamentos da Base Circular(BC), figura 4.11, relacionando a distância entre um ponto fixo (Pbc) (nó 3172) a cada um dos 14 pontos restantes da BC com seus respectivas deslocamentos térmicos. Como são considerados os nós na figura 4.11. Com o objetivo de verificar os deslocamentos na base da peça.

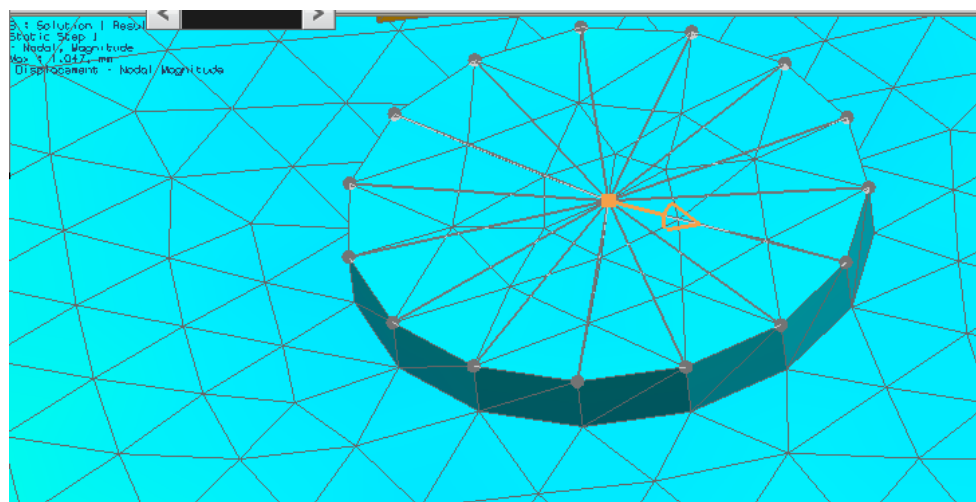


Figura 4.12- Leitura de um ponto fixo próximo ao centro e os demais pontos

Como o sistema de medição Ballbar mostra os erros em um plano específico, em dois eixos, através dos dados coletados, foi possível também mostrar gráficos semelhantes ao Ballbar real, porém até com mais eixos, no mesmo plano, usando o MEF para fornecer ao MatLab os dados necessários para traçar as curvas semelhantes ao sistema Ballbar de medição, também usado do mesmo modo em relação ao ponto próximo a centro do círculo base como referência, figura 4.12.

Coletados os dados das coordenadas e das deformações nos tempos analisados, foi possível alimentar os programas desenvolvidos no ambiente do MatLab. Usando os procedimentos a seguir:

No sistema de coordenadas cartesianas a circunferência pode ser descrita pela equação 4.3 (MANDARINO, 2007):

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (4.3)$$

Onde: a e b são as coordenadas do centro da circunferência e r o raio.

Utilizando-se as equações paramétricas, encontram-se as equações 4.4 e 4.5:

$$x = a + r \cos(t) \quad (4.4)$$

$$y = b + r \sin(t) \quad (4.5)$$

Onde: t pode variar de 0 a 2π

Usando também a equação da reta, equação 4.6 (DAN, 2009), para traçar 12 retas no plano cartesiano, com um ângulo de 30 graus entre elas. Para as escalas das respectivas retas, foi utilizado um arco de 10 graus para cada graduação da escala em cada reta.

$$y = ax + b \quad (4.6)$$

Onde: a o coeficiente angular e b termo independente.

Se considerar todas as retas partindo da origem tem-se:

$$y_j = a_j x \quad (4.7)$$

Onde: j é o número de retas plotadas no plano considerado e x a faixa de trabalho considerada.

Portanto para desenvolver um plano que contenha as informações relevantes e semelhante ao sistema Ballbar real, as equações 4.6 e 4.7, tornaram-se as equações 4.8 e 4.9:

$$x_i = r_k \cos(t_i) \quad (4.8)$$

$$y_i = r_k \sin(t_i) \quad (4.9)$$

Onde: $k=1,2,3$ e 4 ,números de escalas em cada reta e $i=1,2,3...13$, número de intervalos dos ângulos para cada arco considerado.

Com $a=b=0$, ou seja o centro de todos os arcos e da circunferência centrado na origem. Através dos dados provenientes das simulações, foi possível desenvolver a leitura dos pontos considerados, como estão mostrados nas figuras 4.13, 4.14 e 4.15.

Na plotagem do gráfico da figura 4.13, a partir da simulações realizadas encontram-se apenas os deslocamentos em cada eixo de resolução de $10 \mu\text{m}$, nos quinze pontos analisados do círculo base (base da peça), para três tempos distintos conforme é ilustrado nesta mesma figura 4.13.

Na figura 4.14, encontram-se os resultados para as mesmas simulações, porém agora com símbolos que mostram a variação dos deslocamentos térmicos do raio do círculo base e consequentemente a variação da circunferência para três tempos distintos, que foram mais significativos na análise total de 1h ou 3.600s.

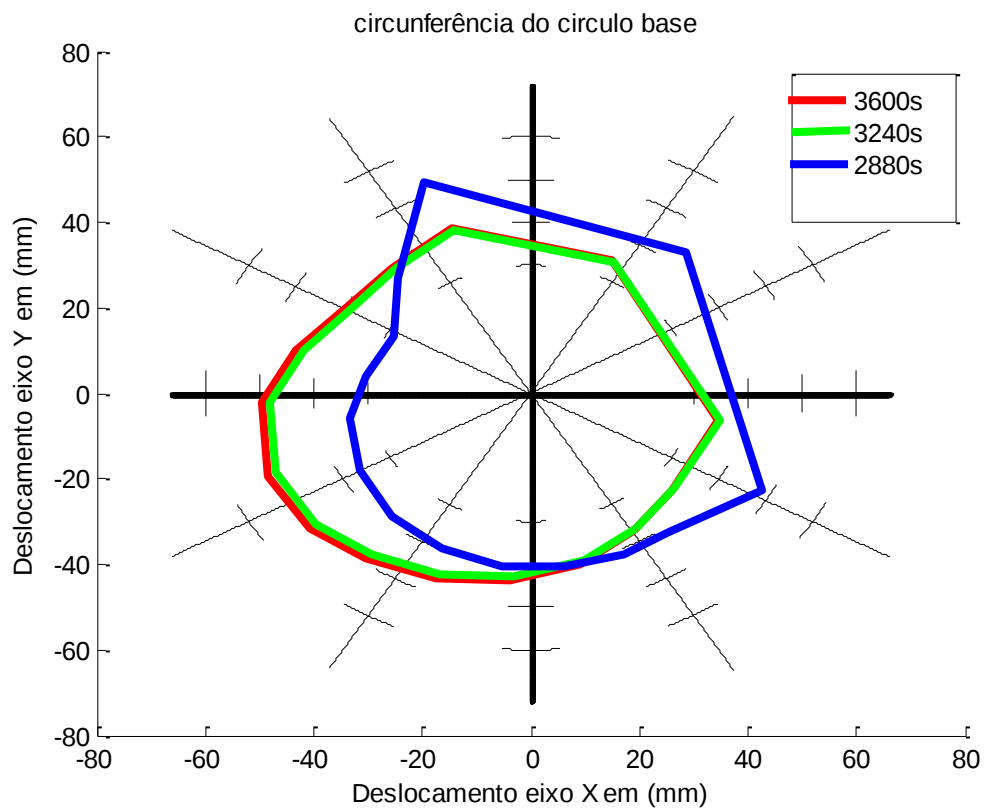


Figura 4.13- Gráficos das deformações do Cb para três tempos distintos

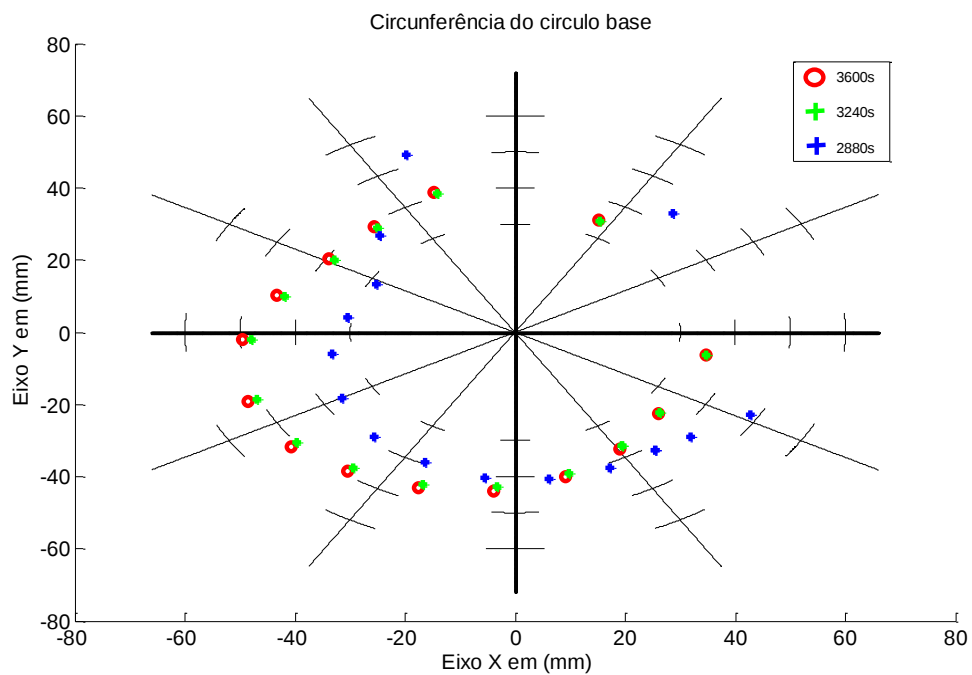


Figura 4.14- Gráfico dos deslocamentos do Cb para três tempos distintos com símbolos

Na figura 4.15, encontram-se as deformações de cada raio analisado para os quinze pontos em três tempos distintos, que apresentaram maiores deformações e uma circunferência proporcional, com um raio de referência sem deformação, linha preta. Com a mesma graduação de cada uma das retas, possuindo 10 micrometros de resolução. Observa-se que alguns pontos se contraem e outros se expandem em relação a circunferência de referência.

Na figura 4.16, realizou-se uma simulação para traçar a circunferência do círculo base, linha preta, mais as deformações dos respectivos pontos analisados, linha vermelha, porém praticamente não se percebe a diferença, devido as deformações serem na ordem de micrometro e a resolução do sistema de medição para este caso, ser na ordem de 5mm em cada reta, figura 4.17.

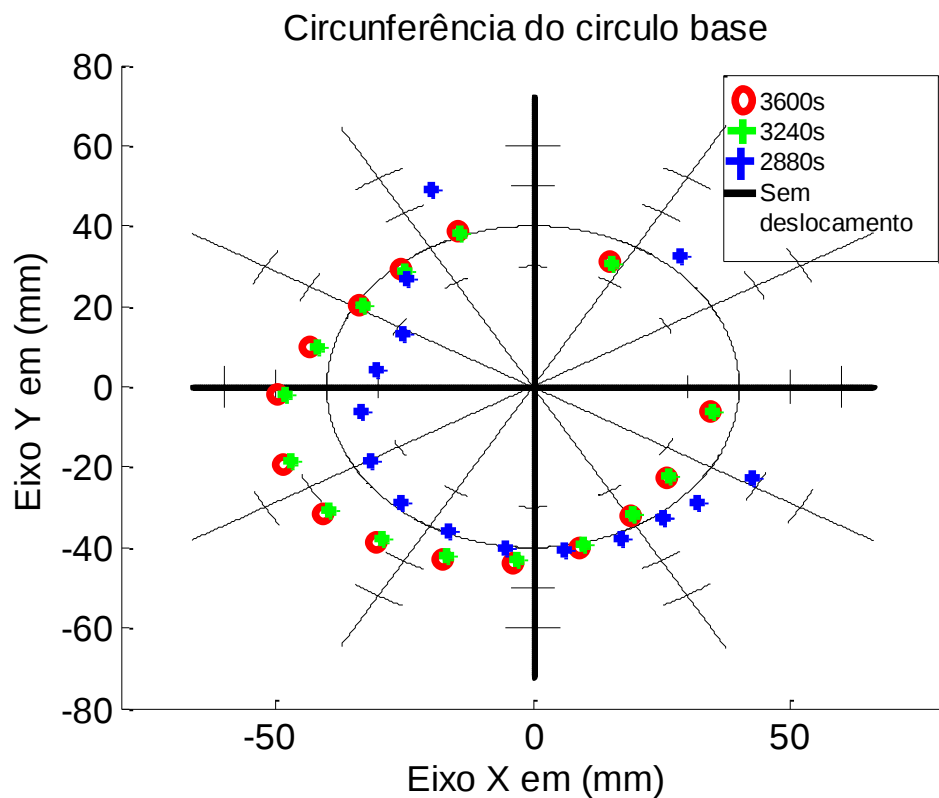


Figura 4.15- Deformações dos 15 pontos mais circunferência de referência

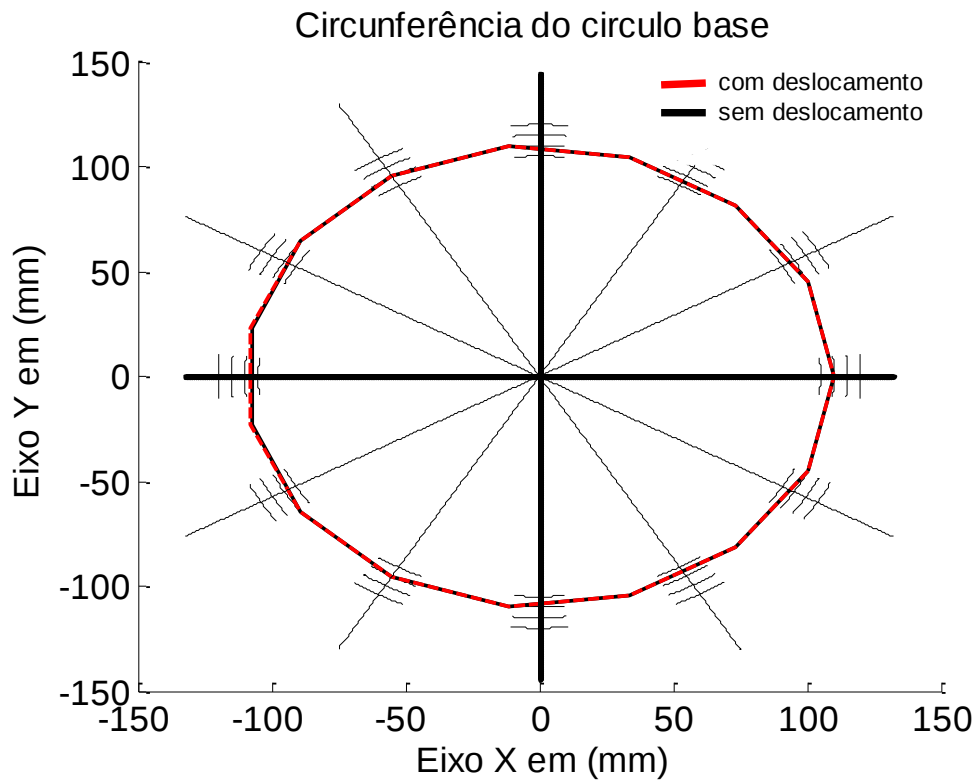


Figura 4.16-Gráfico de resolução de 5mm para o Cb com e sem deslocamentos térmicos.

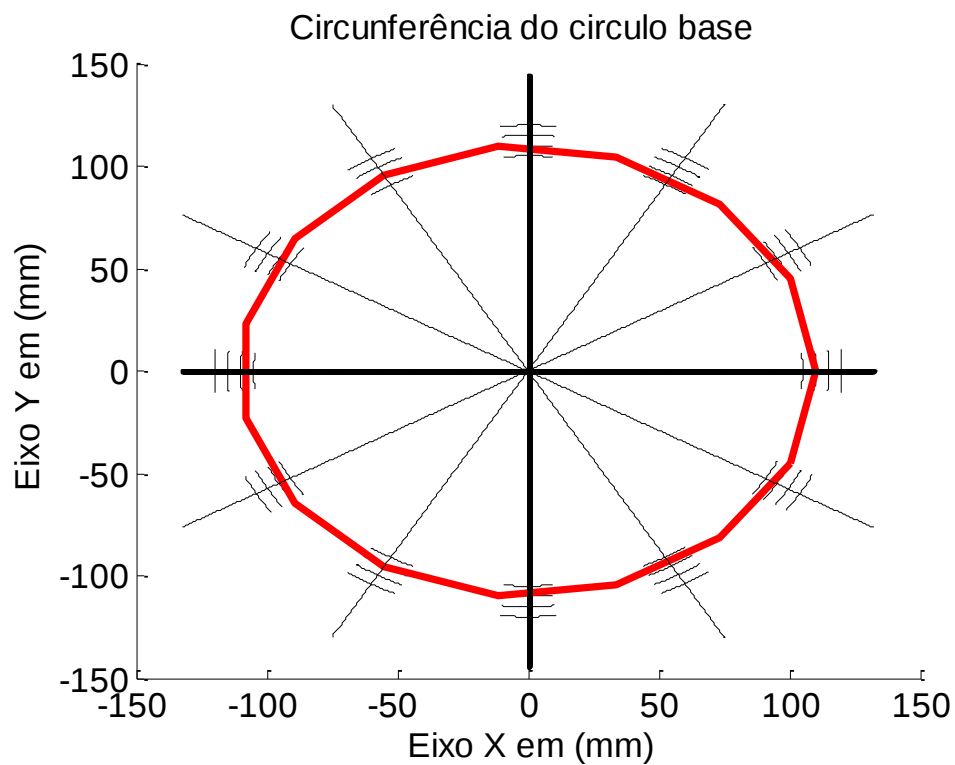


Figura 4.17- Gráfico de resolução de 5mm para o Cb com deslocamentos térmicos

Para a execução do programa que realizou estes gráficos, foram precisos apenas a introdução das coordenadas com suas respectivas deformações no ambiente de programação do MatLab. Os pontos, os deslocamentos e os traços das circunferências, foram coletados através das simulações no programa de elementos finitos NX. Mostrados nos gráficos apenas os três últimos tempos da análise para não sobrecarregar os gráficos e ficar de difícil interpretação, mas agora pode-se fazer para qualquer tempo ou circunferência desde que alimente o programa de forma correta e desloque os centros das circunferência para a origem do plano cartesiano, de modo a ficar mais fácil a comparação dos dados.

Após consolidada a técnica, o gráfico da figura 4.18 representa como ficaria o sistema de medição traçado com o Ballbar virtual no padrão de um Ballbar real, do círculo base ou círculo nominal, bem com a resolução para esta escala, cujo o menor raio que pode-se medir é de 105mm e o raio nominal 110mm conforme é mostrado na leitura.

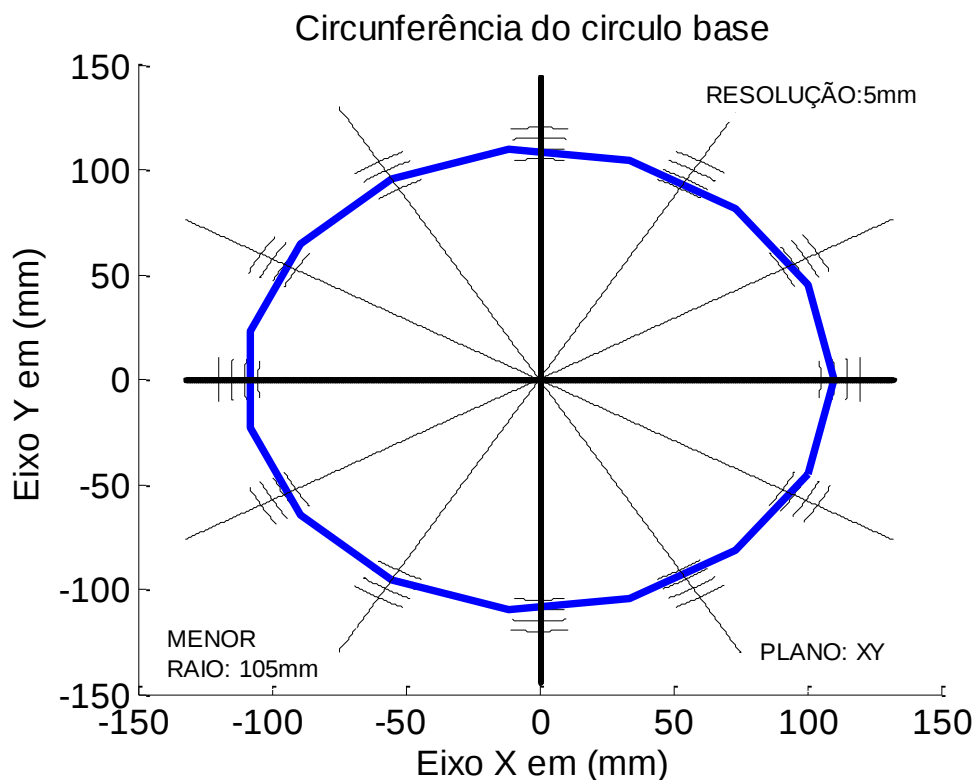


Figura 4.18- Gráfico no padrão do sistema Ballbar real

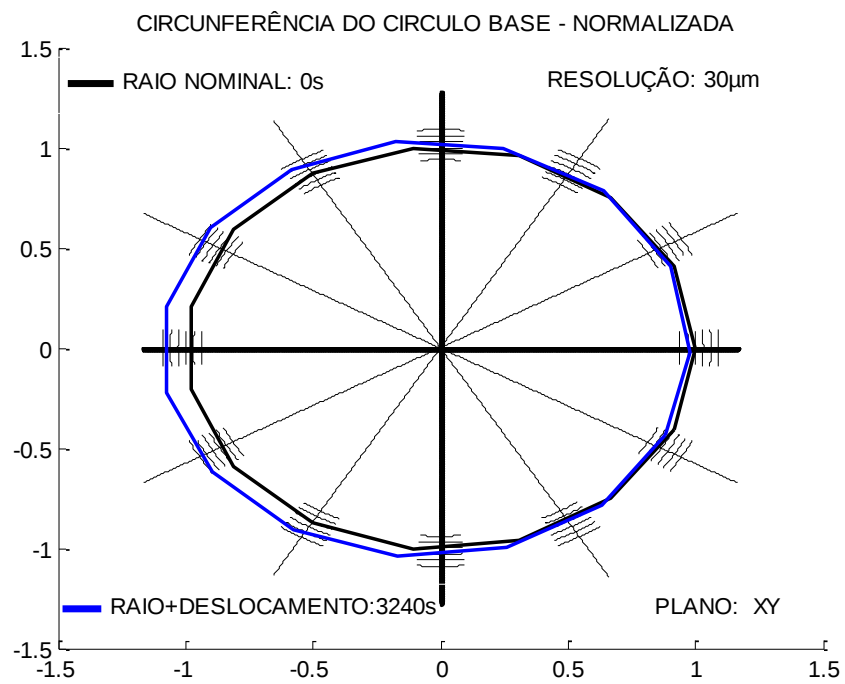


Figura 4.19- Comparação entre dos círculos de forma normalizada p/ 3240s

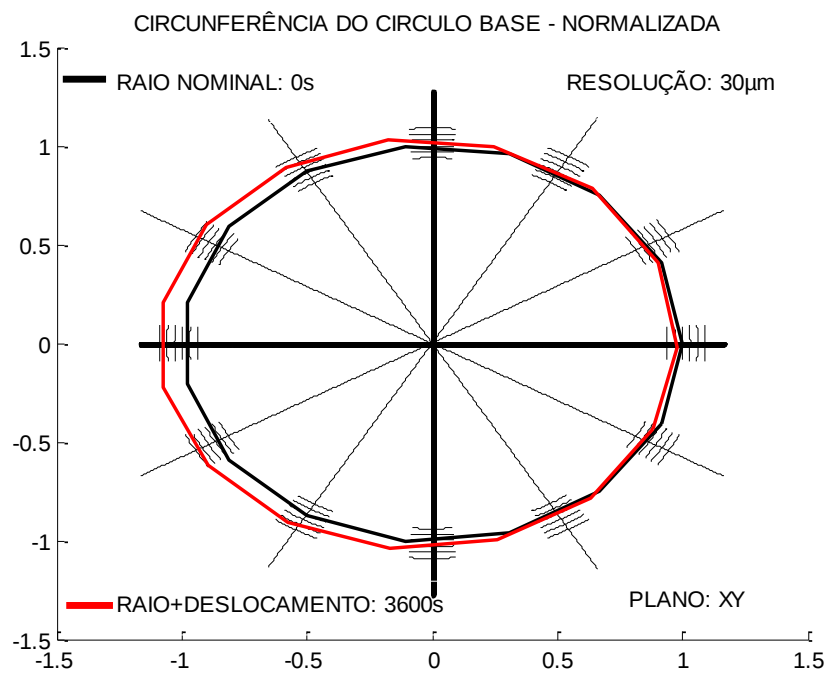


Figura 4.20- Comparação entre dos círculos de forma normalizada p/ 3600s

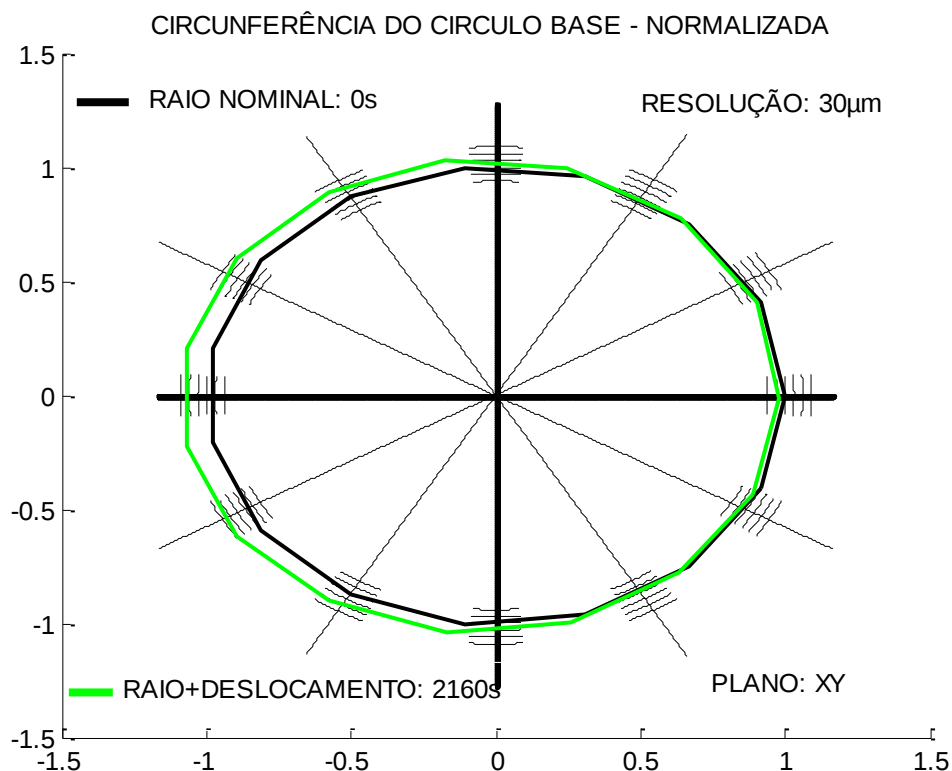


Figura 4.21- Comparação entre dos μ círculos de forma normalizada p/ 2160s

No gráfico da figura 4.19, encontra-se a leitura do círculo base (consequentemente o raio nominal) em “0s” e a leitura deste mesmo círculo após decorridos 3240s de modo normalizado, onde nota-se um desalinhamento como também a deformação de um em relação ao outro. Idem para as figuras 4.20 e 4.21, visualmente existe pouca diferença entre eles, mas a diferença é na ordem de 2 a 5 micrometros e a melhor resolução que foi encontrada para estas leituras é de 30micrometro, conforme é mostrado nos gráficos. Mas foi mostrado desta forma para verificar a versatilidade desta técnica.

Será realizado na próxima seção simulações com condições de contornos diferentes, que possam fornecer dados para o mapeamento térmico da ponta da ferramenta durante um período de tempo determinado, as quais fornecerão as deformações térmicas nos três eixos com os respectivos tempos e as temperaturas consideradas. Quanto a fazer simulações no NX e cálculos no MatLab, que se aproxime do sistema de medição Ballbar, isto foi constatado que é plenamente possível, fazendo a centralização dos círculos analisados de acordo com as deformação nos nós envolvidos, para cada intervalo de tempo preestabelecido. Esta mesma técnica servirá para complementar os estudos dos

deslocamentos térmicos na máquina-ferramenta estudada, bem como na coleta de dados para este trabalho de tese.

4.5.2-Máquina-ferramenta com ferramenta cônica

Otimizando a máquina-ferramenta para situações mais próximas do real, foi redesenhada, conforme figura 4.22.

Simulando uma ferramenta de ponta cônica (semelhante a uma broca) no porta ferramenta da máquina e o sistema de medição virtual, conforme ilustrado na figura 4.23. Desenhou-se este tipo de ferramenta apenas para facilitar o posicionamento do nó, mas a metodologia usada pode ser aplicada a qualquer tipo de ferramenta. Fez-se o levantamento da variação da distância (D) entre a ponta da ferramenta (nó 1692, análise estrutural) e o centro do círculo base da peça (nó 1652), através da equação 4.10 (VENTURI, 2004), para o intervalo de tempo inicial de 1 hora. Conhecendo, através do NX, as coordenadas e as deformações em cada nó durante o tempo analisado.

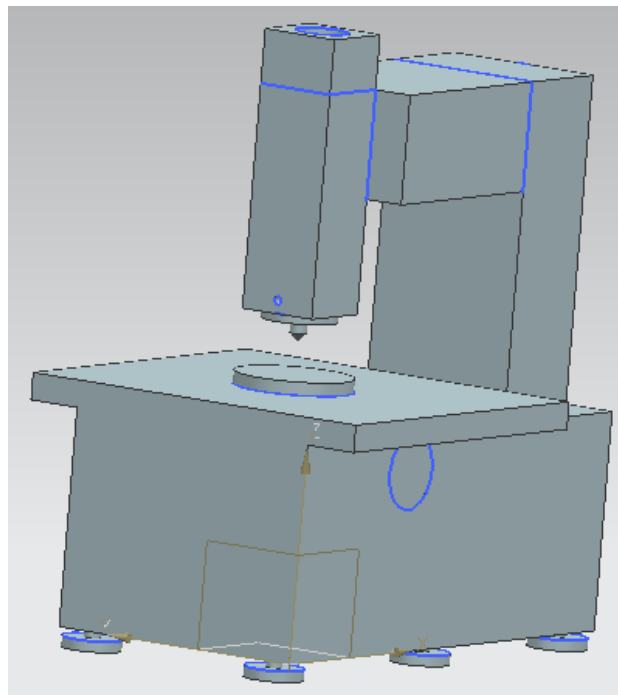


Figura 4.22- Máquina-ferramenta redesenhada com os pés e uma ferramenta

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (4.10)$$

Onde: x_1 , y_1 e z_1 são as coordenadas do ponto central do círculo base; x_2 , y_2 e z_2 são as coordenadas da ponta da ferramenta somadas as seus respectivos deslocamentos térmicos.

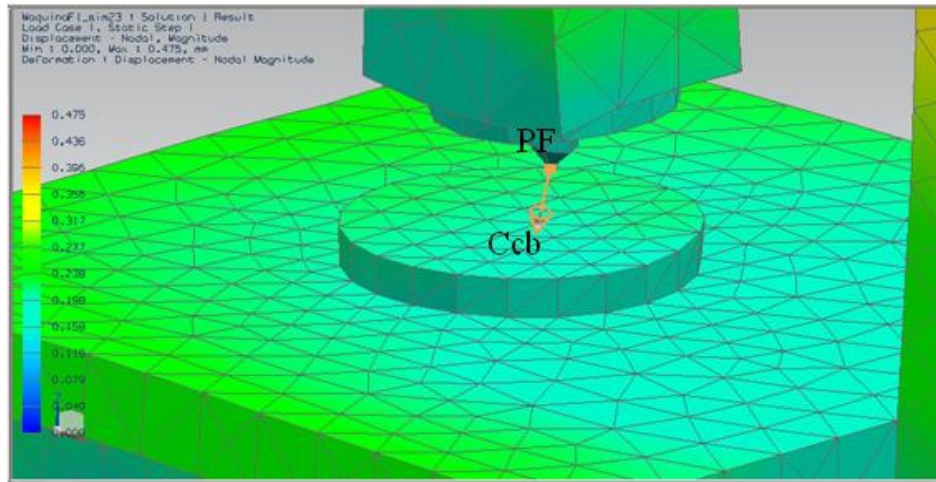


Figura 4.23- Ballbar virtual medindo a distância da ponta da ferramenta e o nó no círculo base

4.5.3 Análise dos deslocamentos térmicos para estado permanente de temperatura no período de 1h.

No gráfico da figura 4.24 encontra-se a variação da distância ao longo do tempo da ponta da ferramenta (PF) com as fontes de calor atuantes. Para onze análises ao decorrer o intervalo de tempo de 3600s.

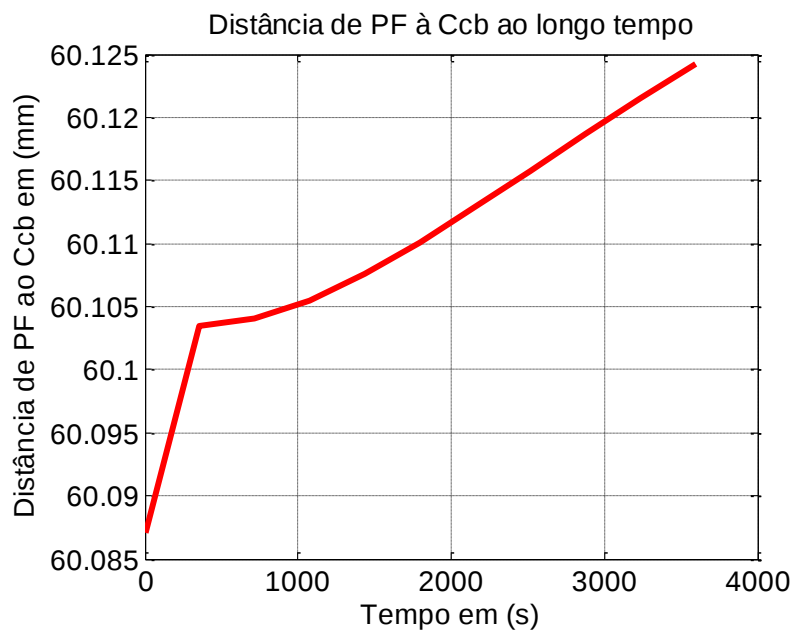


Figura 4.24- Variação da distância do PF ao Ccb durante o tempo analisado

Assim como é possível verificar o quanto a ferramenta sofre variação em relação a base da peça, devido as deformações térmicas, também é possível verificar a deformação em cada eixo, no nó correspondente a ponta da ferramenta em relação ao sistema de coordenadas X, Y e Z nos gráficos das figuras 4.25, 4.26 e 4.27 respectivamente

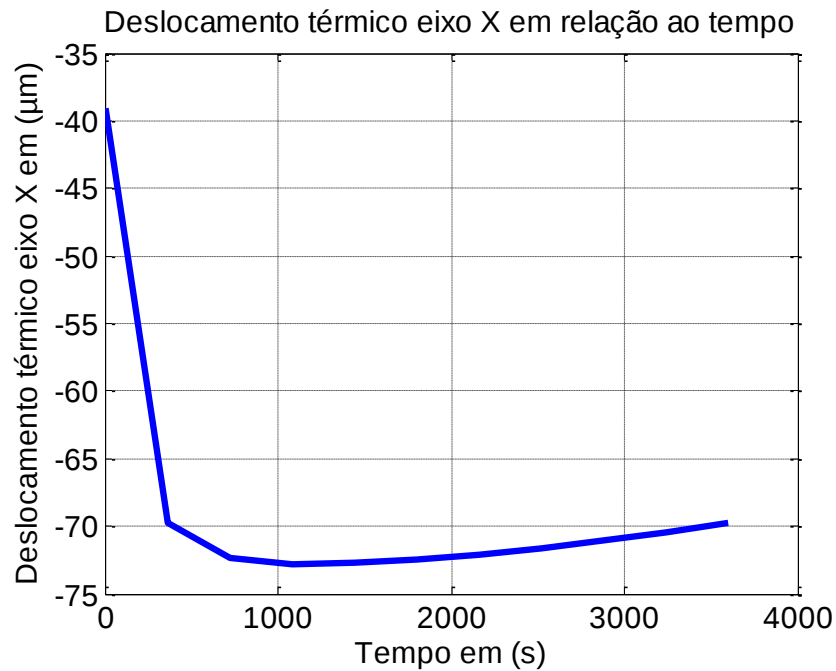


Figura 4.25- Deformação do eixo X em (μm) ao longo do tempo

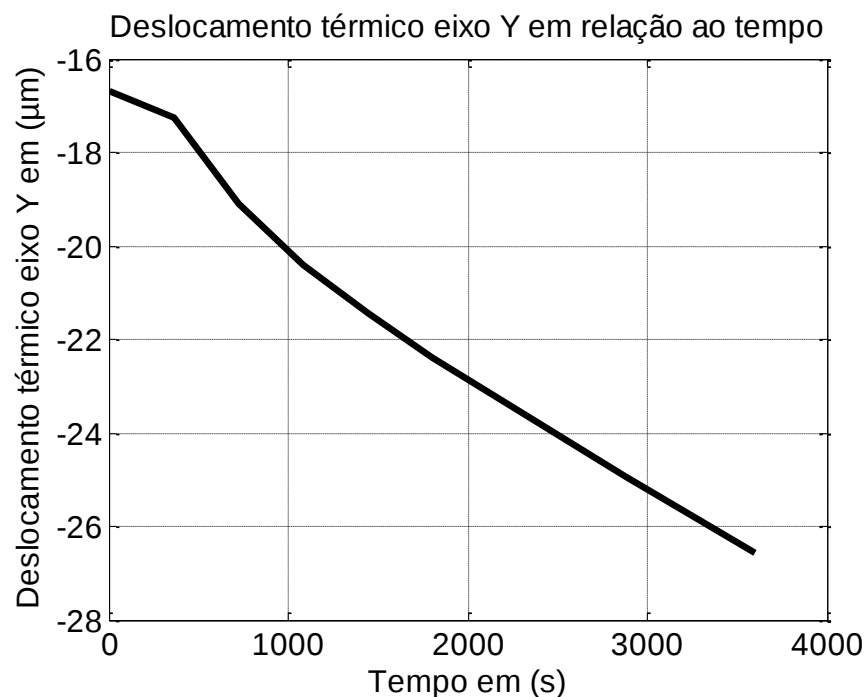


Figura 4.26- Deformação do eixo Y ao longo do tempo

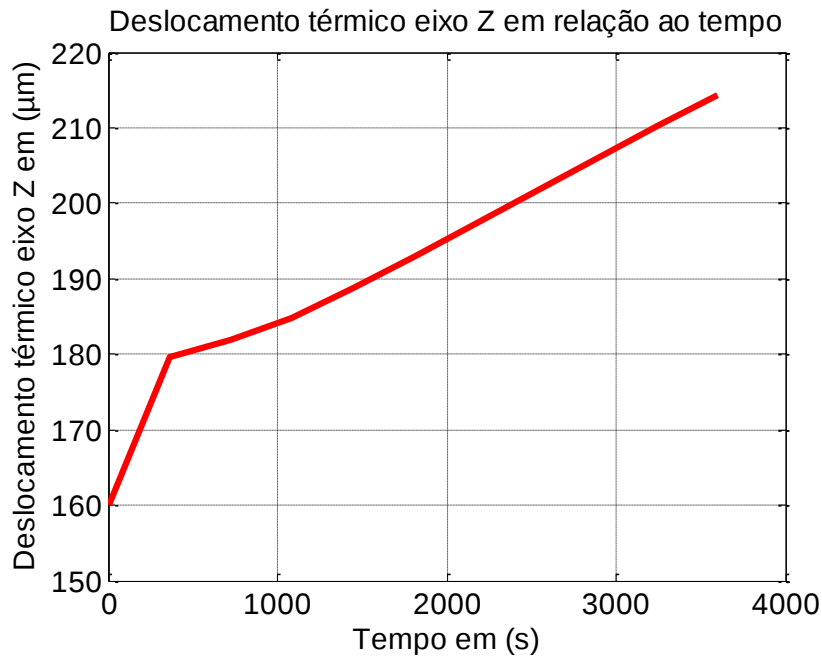


Figura 4.27- Deformação do eixo Z ao longo do tempo

Nota-se que as maiores deformações se encontram no eixo Z, causando os maiores erros térmicos na máquina analisada. No gráfico da figura 4.28, pode-se constatar melhor esta afirmação, verificando as deformações ocorridas nos três eixos simultaneamente na extremidade da ferramenta ou na ponta da ferramenta.

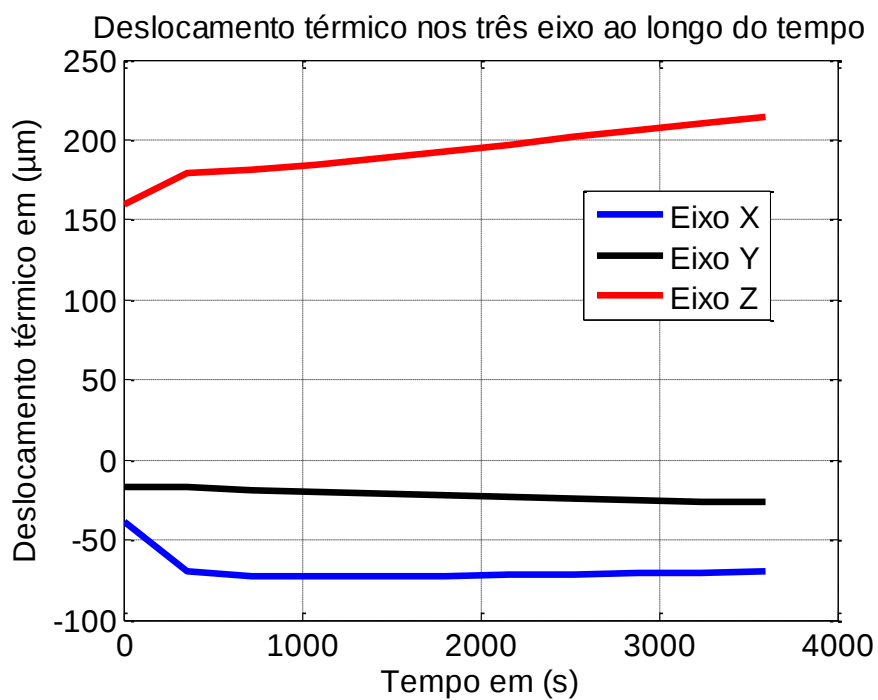


Figura 4.28- Deformações nos eixos X, Y e Z em relação a ponta da ferramenta

Nota-se ainda, que no tempo inicial a ponta da ferramenta já apresenta deformações, isto acontece neste tipo de simulação, devido as condições de contornos para este caso, ou seja, as fontes de calor já se encontram na temperatura de estado permanente, causando deformações iniciais, para em seguida, haver a propagação de calor pela estrutura da máquina.

4.6-ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS TÉRMICOS PARA UM PERÍODO DE OITO HORAS NO ESTADO PERMANENTE DE TEMPERATURA

Nesta seção, além das deformações analisadas é exposto o comportamento térmico da máquina com a leitura de oito nós simbolizando termopares virtuais introduzidos em pontos estratégicos como ilustrado na figura 4.29 e 4.30. Durante um turno de oito horas.

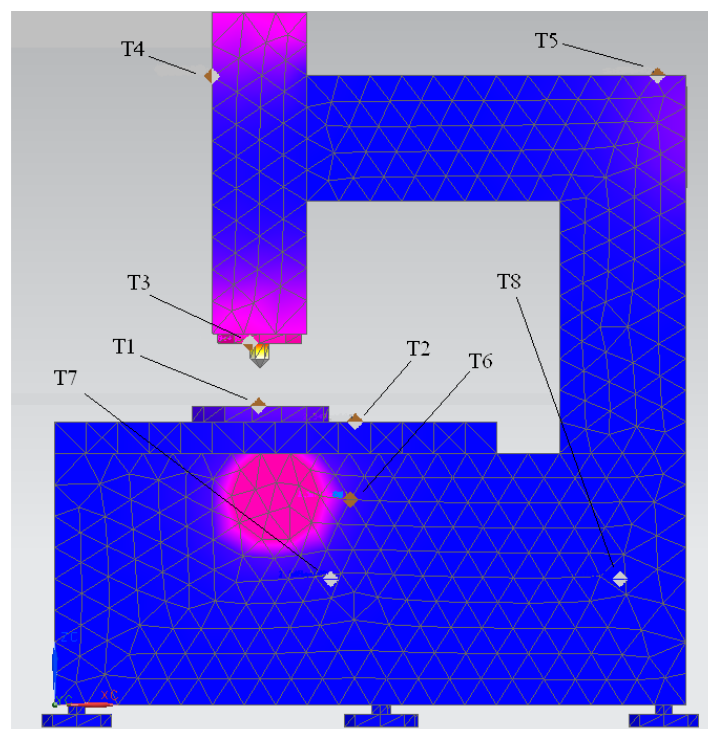


Figura 4.29- Distribuição dos termopares na estrutura da máquina.

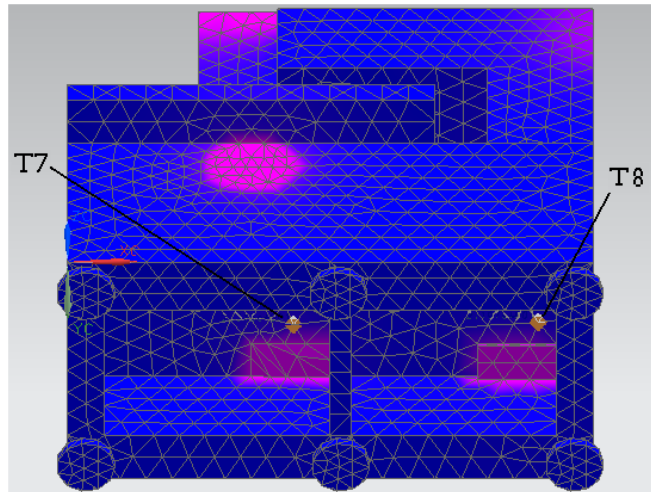


Figura 4.30- Termopares nas bombas de óleo e fluido refrigerante.

Os termopares foram distribuídos para as simulações desta seção da seguinte forma:

- T1: Base da peça (nó 1935)
- T2: Mesa (nó 1605)
- T3: Base do porta ferramenta (nó 3416)
- T4: Mancal superior do eixo árvore (nó 3146)
- T5: Motor principal (nó 2455)
- T6: Base do motor da mesa (nó 2878)
- T7: Bomba do fluido de resfriamento (nó 1795)
- T8: Bomba de óleo (nó 2564)

As considerações para as análises nesta seção são as seguintes:

- Material da Máquina-Ferramenta: aço de densidade $7.829 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
- Fontes de calor: Algumas fontes internas de calor existentes em uma máquina-ferramenta variantes no tempo.
- Período de análise: De 0 a 28800s
- Mapeamento térmico realizado para os tempos: A cada 360s
- Variação de temperatura: de 20 a 200°C
- Condições de contorno estrutural e pés da Máquina-ferramenta engastados
- Condições de contorno térmica: Temperatura estipulada em cada face da máquina-ferramenta em contato com os motores, com os mancais e o par peça ferramenta, através de um valor fixo de temperatura, conforme figura 4.31 e 4.32.

- Tamanho do elemento: 50mm
- Tipo do elemento: tetraedro com quatro nós

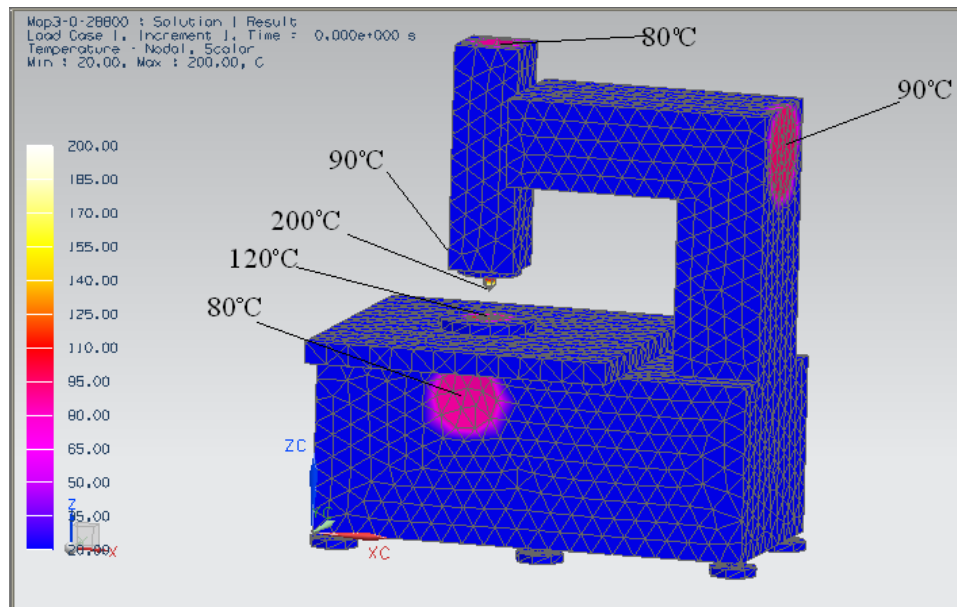


Figura 4.31- Condições de contornos térmicas

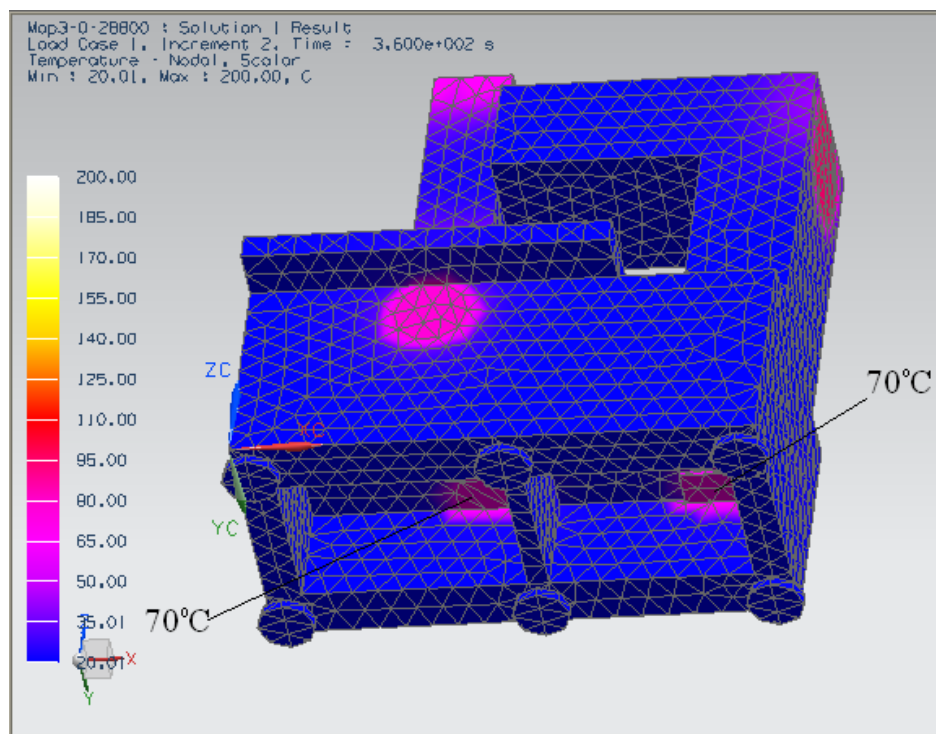


Figura 4.32- Condições de contornos térmicas nas bombas de óleo e refrigeração

A leitura de cada termopar virtual ao longo do tempo, para o caso analisado nesta seção, é mostrado na figura 4.33.

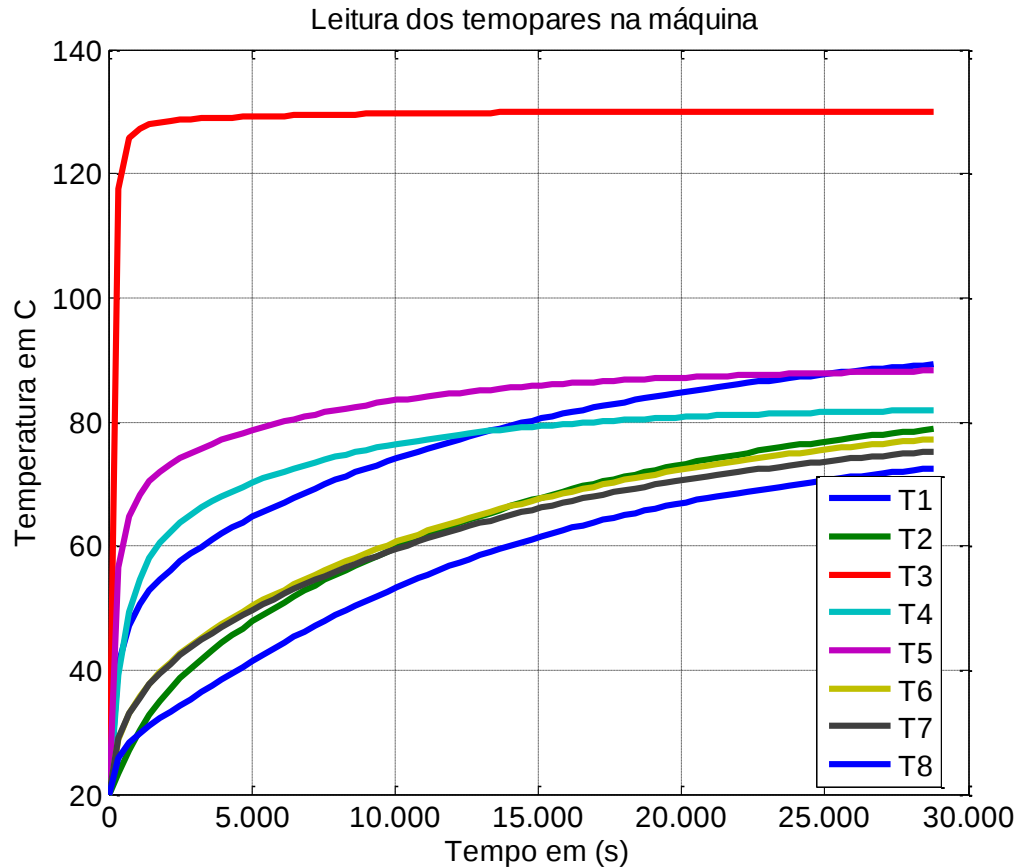


Figura 4.33-Curvas dos oitos termopares estado permanente

Observa-se principalmente no termopar localizado próximo a ferramenta como a temperatura entra rapidamente no estado permanente e como outros levam mais tempo, isso acontece principalmente devido a fonte de calor e dá proximidade em relação a cada termopar.

Na análise da variação da distância da ponta da ferramenta ao círculo base foi usado o mesmo procedimento da seção 4.5.2, como na figura 4.23, para o intervalo de tempo de oito horas ininterruptas, usando a mesma metodologia, como é mostrado na figura 4.30, já que esse é um período usual para um ambiente de trabalho, que esta variação pode chegar em torno de 140 μ m, figura 4.35, provocando grandes erros térmicos principalmente ao longo do eixo Z.

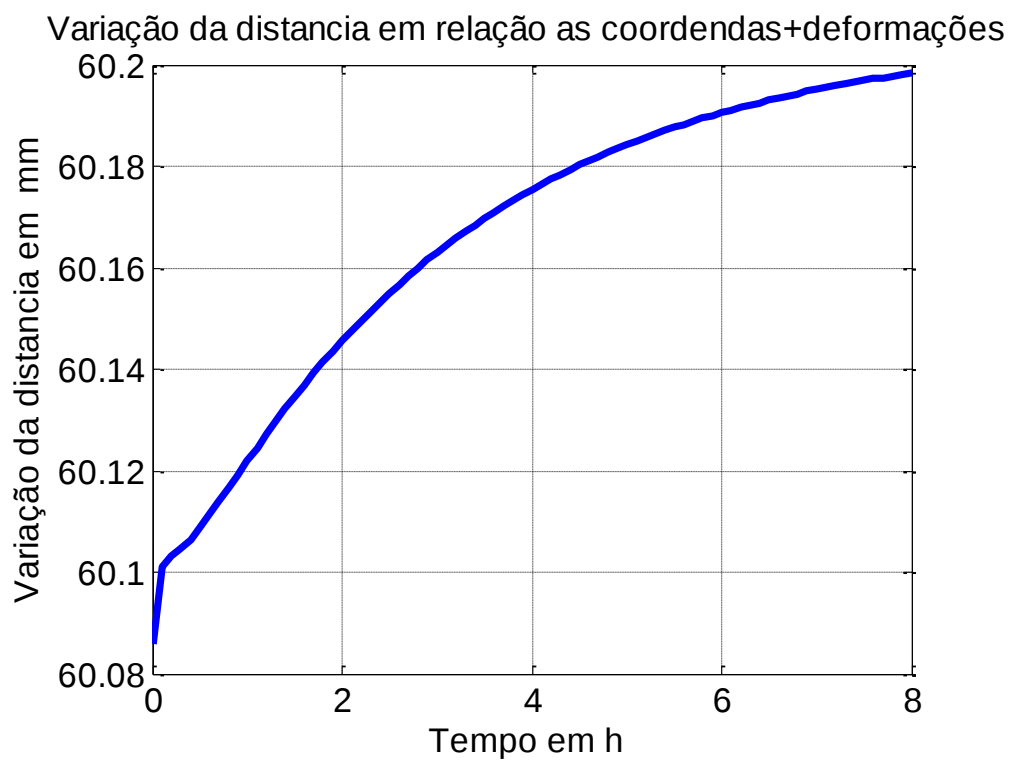


Figura 4.34- Distância da ponta da ferramenta ao círculo base p/ 8h

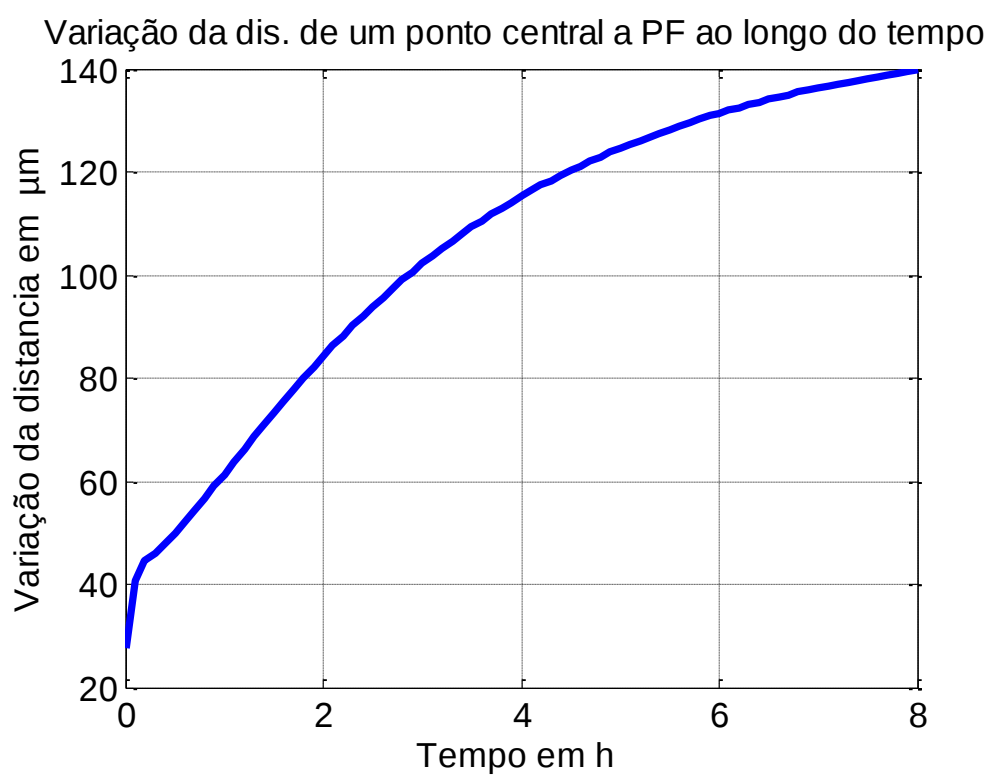


Figura 4.35- Variação da distância da ponta da ferramenta ao círculo base p/ 8h

Como pode ser observado na figura 4.32, o comportamento dos eixos é semelhante a análise para uma hora de usinagem, porém as curvas são mais coerentes e suaves, já que o número de dados, amostras a cada seis minutos, no intervalo do tempo total, foram maiores.

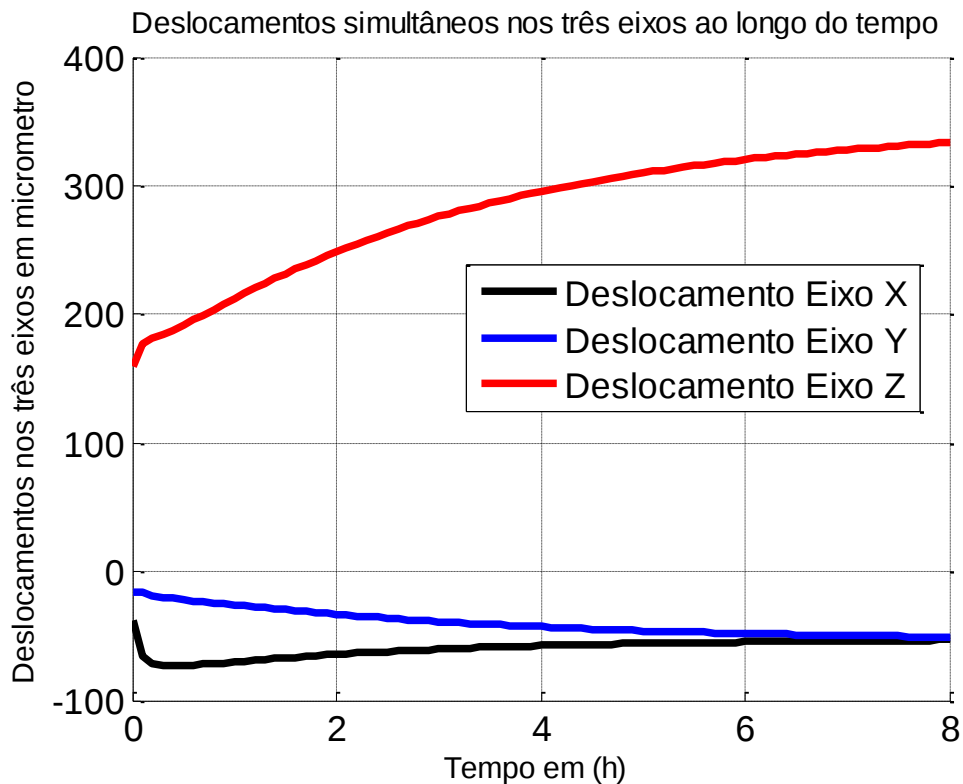


Figura 4.36- Comportamento três dos eixos simultaneamente-Estado permanente

Quando foram realizadas estas ultimas simulações, levando em consideração um torno de oito horas de usinagem, as curvas dos respectivos eixos são mostradas na figura 4.36, onde se observe um comportamento mais suave, devido o fato de ter sido coletado um maior número de pontos, como também o período de tempo está dentro de um intervalo mais coerente com o realizado do processo de usinagem de um ambiente fabril.

4.7 Análises dos deslocamentos térmicos para um período de oito horas no estado transiente de temperatura

Nesta seção, será adotado o mesmo procedimento da seção anterior, ou seja, a mesma configuração da máquina-ferramenta, os termopares localizados nos mesmos nós e

as mesmas condições de contornos estruturais, porém alterando apenas as condições de contornos térmicas, que serão substituídas por equações de aquecimento para cada fonte de calor.

As novas considerações para os resultados das simulações neste seção foram realizados nas seguintes condições:

- Material da Máquina-Ferramenta: aço de densidade $7.829 \text{e-}6 \text{kg/mm}^3$
- Fontes de calor: todas as fontes internas existentes em uma máquina-ferramenta variantes no tempo.
- Transiente de temperatura: De 0 a 28800s
- Mapeamento térmico realizado para os tempos: A cada 360s
- Variação de temperatura: de 20 a 200^0 C
- Condições de contorno estrutural e pés da Máquina-ferramenta engastados
- Condições de contorno térmica transiente: Temperatura estipulada em cada face da máquina-ferramenta em contato com os motores, com os mancais e o par peça ferramenta, através da equação de aquecimento de Newton.
- Tamanho do elemento: 50mm
- Tipo do elemento: tetraedro com quatro nós

O gráfico da figura 4.37, foi plotado a partir da lei de aquecimento/resfriamento de Newton, conforme equação 4.12, para cada fonte de calor.

Sendo observada a sua temperatura inicial (T_m), que coincide com a temperatura ambiente, no caso 20^0C , no instante “0s”, e sua temperatura final $T_{(\infty)}$, a qual é a máxima que a fonte pode atingir mediante as condições de simulação preestabelecida em estado permanente.

$$\frac{dT}{dt} = k(T - T_m) \quad (4.11)$$

Onde: T_m = temperatura ambiente;

T =temperatura do corpo no instante t ;

k =Constante de proporcionalidade

Solucionando a equação 4.11, por separação de variáveis e substituição as condições de contorno, segundo BRONSON.(2008), encontra-se a equação 4.12:

$$Tl(t_i) = T_{(\infty)} + C_j \times \exp(-k_j \times t_i) \quad (4.12)$$

Onde: $Tl(t_i)$ é a temperatura local de cada fonte de calor no instante t_i ; $T_{(\infty)}$ é a temperatura no estado permanente; C_j é a constante encontrada a partir das condições de contornos iniciais e finais; k_j é a constante de tempo (INCROPERA et al, 2008) encontrada para cada fonte de calor na unidade de tempo (s). Ela representa o tempo que a fonte gasta para atingir 63,2% do valor final da elevação de temperatura correspondente à sua operação em estado de equilíbrio térmico ou regime permanente. E t_i é o tempo em cada instante a considerar de acordo com o transiente de temperatura.

O valor da constante de tempo para todas as fontes, foram encontradas a partir da condição de contorno inicial $T(0)=20^{\circ}C$ e da condição intermediária $T(1800)= 0,632 \times T_{(\infty)}$. Ou seja a temperatura no instante 0s e a temperatura em que a fonte poderá atingir quando decorridos o tempo de 1800s ou 30min

As equações, que são atribuídas como condições de contornos nas simulações para cada fonte de calor, próximas aos termopares instalados na estrutura, conforme foi visto nas figuras 4.29 e 4.30: encontram-se através das seguintes equações:

- Temperatura na base da peça (próximo a T1), associada através da equação 4.13:

$$Tb(t_i) = 120 - 100 \times \exp(-0,000451072620305507 \times t_i) \quad (4.13)$$

- Temperatura no porta ferramenta (próxima a ferramenta, T3), associada através da equação 4.14.:

$$Tf(t_i) = 200 - 180 \times \exp(-0,000493828754270023 \times t_i) \quad (4.14)$$

- No mancal inferior (próximo a ferramenta T3), associada através da equação 4.15:

$$Tmi(t_i) = 90 - 70 \times \exp(-0,0004127432472572 \times t_i) \quad (4.15)$$

No mancal superior (próximo a T4), associada através da equação 4.16:

$$Tms(t_i) = 80 - 60 \times \exp(-0,000392539000495603 \times t_i) \quad (4.16)$$

- No motor da extremidade (próximo a T5), associada através da equação 4.17:

$$TMs(t_i) = 90 - 70 \times \exp(-0,0004127432472572 \times t_i) \quad (4.17)$$

- Motor da mesa (próximo a T6), associada através da equação 4.18:

$$TMm(t_i) = 80 - 60 \times \exp(-0,000392539000495603 \times t_i) \quad (4.18)$$

- Motor bomba 1 (próximo a T7), associada através da equação 5.19:

$$Tb1(t_i) = 70 - 50 \times \exp(-0,000365433353734808 \times t_i) \quad (4.19)$$

- Motor bomba 2 (Próximo a T8), associada através da equação 5.20:

$$Tb2(t_i) = 70 - 50 \times \exp(-0,000365433353734808 \times t_i) \quad (4.20)$$

Na figura 4.37, observa-se o comportamento das curvas das funções de temperatura pelo tempo, formado de oito curvas, mas existem três coincidentes, isso acontece, por que três curvas possuem a mesma equação transiente.

No gráfico da figura 4.38, é mostrado às oitos curvas provenientes da coleta de dados dos termopares virtuais ao longo do período de simulação considerado. Observa-se que agora possui oito curvas diferentes, mesmo existindo três equações transientes iguais, isso acontece, devido a posição ou localização de cada termopar ser diferente na estrutura da máquina. O que está mais coerente, pois todas as fontes de calor iniciam a 20°C que é exatamente a temperatura inicial considerada de toda estrutura da máquina.

A seguir tem-se as deformações nos eixos X,Y e Z, nas figura 4.39, 4.40 e 4.41 respectivamente, na ponta da ferramenta, conseguida através de um princípio de medição semelhante ao sistema Ballbar no MEF, como também a leitura de todos os termopares ao

longo do tempo analisado (8h ou 480min) que estão localizados próximos as fontes de calor.

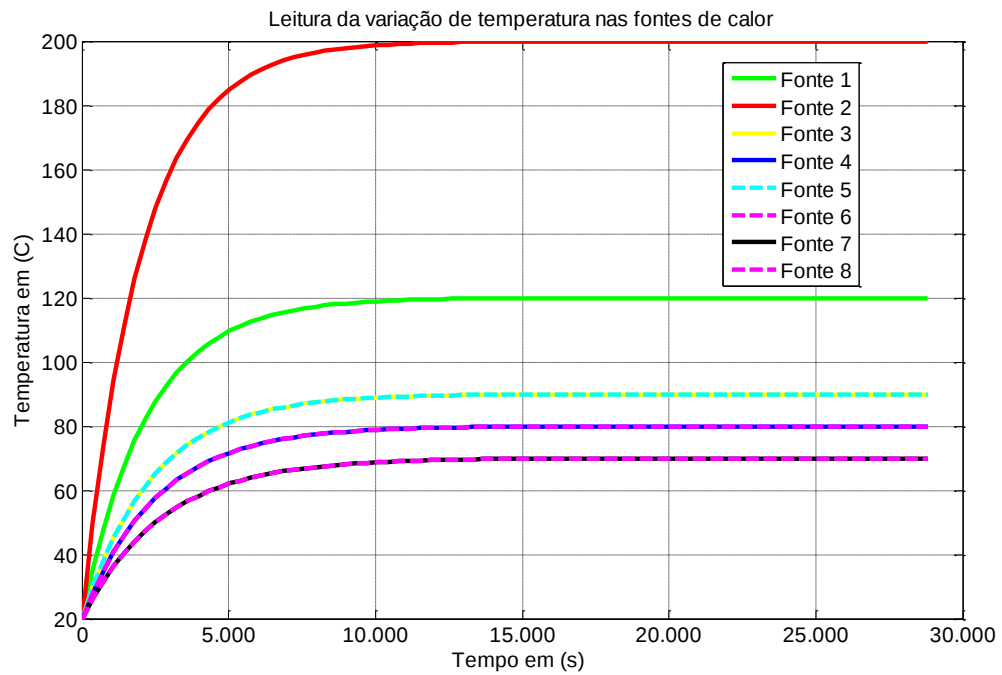


Figura 4.37- Gráfico das funções de temperatura pelo tempo considerado

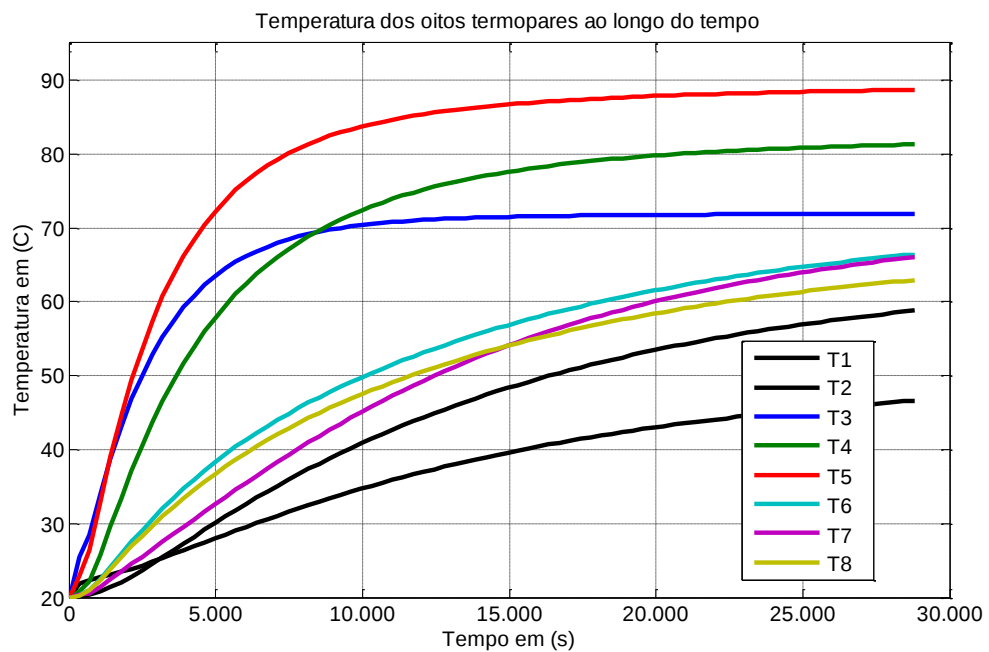


Figura 4.38- Curvas das simulações dos termopares durante o período de análise.

Observa-se uma deformação irregular nos primeiros 30 min (Figura 4.39 e 4.41), embora as fontes de calor possuam um comportamento bastante regular. Tais irregularidades normalmente são devidas aos gradientes de temperatura os quais são maiores no início da usinagem de qualquer máquina-ferramenta ou devido a outros parâmetros estruturais que estabelecem tensões em determinados pontos da estrutura da máquina.

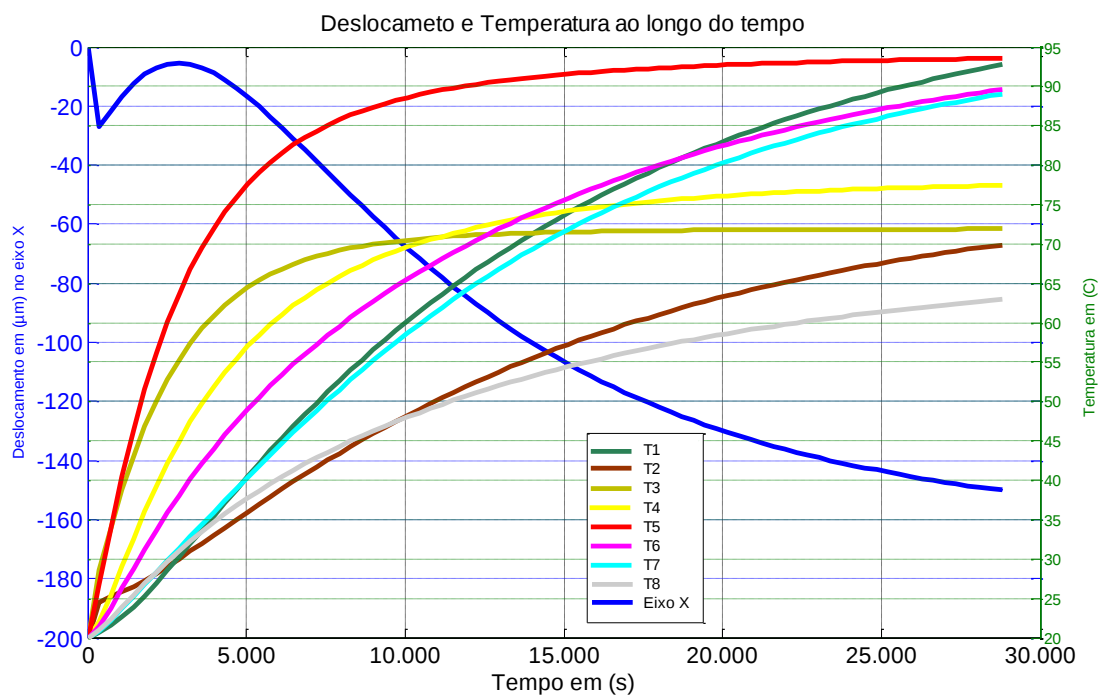


Figura 4.39- Leitura dos termopares e das deformações no eixo X ao longo do tempo

Observa-se ainda que as deformações iniciais no eixo X é nula para o tempo inicial, na temperatura inicial de 20°C, ou seja, está mais coerente com a realidade de usinagem do que na situação considerada na seção onde as fontes de calor apresentavam uma temperatura constante. Além do fato de observar a deformação na ponta da ferramenta no eixo X e a temperatura de cada fonte de calor com a leitura dos seus respectivos termopares no mesmo gráfico.

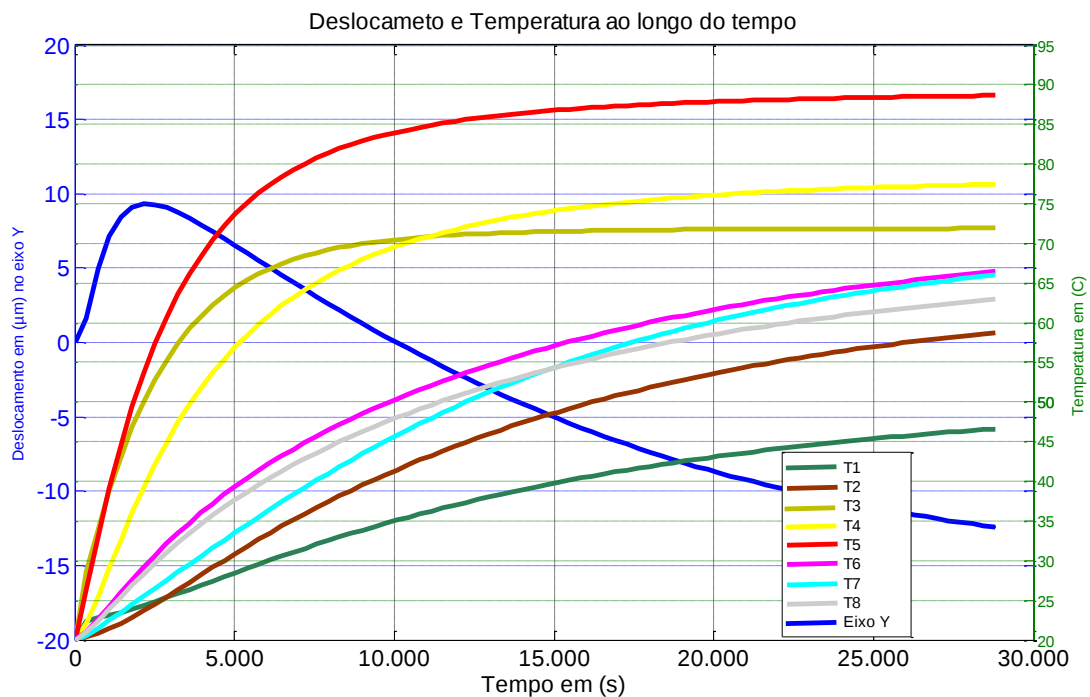


Figura 4.40- Leitura dos termopares e das deformações no eixo Y ao longo do tempo

O fato de mostrar deformações negativas no eixo X, é devido, a ponta da ferramenta se deformar no sentido oposto a orientação do eixo e não contração da máquina ou a ocorrer a influência dos demais eixos como também as fontes de calor.

As deformações são mais suaves no eixo Y (figura 4.40) e menores mesmo a máquina possuindo a mesma estrutura, porém possui rigidez e difusividade térmica diferentes em cada eixo, como também a amplitude da deformação ao longo do tempo considerado é bem menos significativa que a do eixo X.

Para o eixo Z, figura 4.41, observa-se além das irregularidades nos primeiros 30min, a maior amplitude de deformação nesta direção, sendo, portanto o eixo, dependendo é claro do projeto da máquina, em que na maioria da literatura especializada tenta fazer a compensação dos erros térmicos no mesmo, por ser o mais significativo. Embora o mais aconselhável fosse uma correção volumétrica de acordo com a temperatura ou calor gerado das fontes.

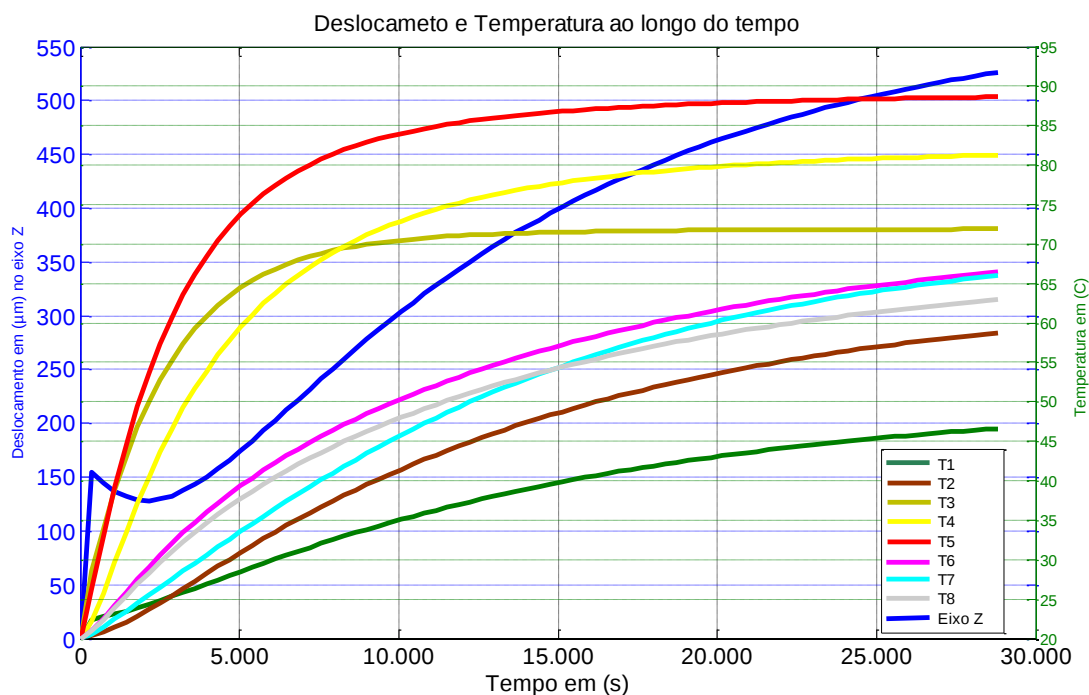


Figura 4.41- Leitura dos termopares e das deformações no eixo Z ao longo do tempo

4.7.1-ANÁLISE DE DESLOCAMENTO TÉRMICO DE PONTOS ESPECÍFICOS NO ESTADO TRANSIENTE DE TEMPERATURA

Nas mesmas condições de contorno transiente e usando um princípio de medição semelhante ao Ballbar, foi verificado os deslocamentos térmicos de alguns pontos específicos para estabelecer a margem de erro da máquina-ferramenta estudada usando a metodologia de (SILVA et al, 2008) aplicada em máquinas de medição por coordenadas (MMCs) através de artefatos. As técnicas desenvolvidas neste trabalho também podem serem usadas para estabelecer esta margem de erro, só que agora através de simulações, tanto em máquinas-ferramenta como em MMCs.

As equações a seguir mostram como foram feitos os procedimentos para encontrar o erro em cada caso considerado em todo período de tempo analisado. Mediram-se as coordenadas dos vinte quatro pontos analisados para calcular as distâncias nominais de cada ponto considerado, ou seja coordenadas sem deformações térmicas, desde um ponto considerado como origem, até um ponto final, para cada caso, usando a equação 4.21

$$Dn = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (4.21)$$

Onde:

x_1 : Coordenada x do ponto de origem.

x_2 : Coordenada x do ponto final.

y_1 : Coordenada y do ponto de origem.

y_2 : Coordenada y do ponto final.

z_1 : Coordenada z do ponto de origem.

z_2 : Coordenada z do ponto final.

Dn : Distância nominal de cada ponto de origem a cada ponto final.

Em seguida realizou-se a leitura de cada ponto considerado usando o MEF mais as suas respectivas deformações térmicas em cada instante, para encontrar a distância medida, nos eixos X Y e Z, equações 4.22 ,4.23 e 4.24 respectivamente , após cada instante de análise, conforme equação 4.25. Assim foi possível encontrar o erro volumétrico entre a distância nominal (Dn) e a distância medida para cada instante (Dm_i), com suas respectivas deformações, de acordo com a equação 4.26.

$$Dx_i = [(x_2 + dx_{2(i)}) - (x_1 + dx_{1(i)})] \quad (4.22)$$

$$Dy_i = [(y_2 + dy_{2(i)}) - (y_1 + dy_{1(i)})] \quad (4.23)$$

$$Dz_i = [(z_2 + dz_{2(i)}) - (z_1 + dz_{1(i)})] \quad (4.24)$$

Sendo:

$dx_{1(i)}$: Deformação em x do ponto de origem no instante i .

$dx_{2(i)}$: Deformação em x do ponto final no instante i .

$dy_{1(i)}$: Deformação em y do ponto de origem no instante i .

$dy_{2(i)}$: Deformação em y do ponto final no instante i .

$dz_{1(i)}$: Deformação em z do ponto de origem no instante i .

$dz_{2(i)}$: Deformação em z do ponto final no instante i .

Dx_i : Distância no eixo x do ponto de origem ao ponto final mais as suas respectivas deformações no instante i .

Dy_i : Distância no eixo y do ponto de origem ao ponto final mais as suas respectivas deformações no instante i .

Dz_i : Distância no eixo z do ponto de origem ao ponto final mais as suas respectivas deformações no instante i .

$$Dm_i = \sqrt{Dx_i^2 + Dy_i^2 + Dz_i^2} \quad (4.25)$$

$$E_i = Dm_i - Dn \quad (4.26)$$

Onde:

Dm_i : Distância medida após os deslocamentos nos eixos x, y e z no instante i .

E_i : Erro volumétrico entre a distância nominal e a distância medida após as deformações em cada instante i .

Observa-se o comportamento do erro volumétrico em função da distância considerada para os tempos 30min e 6h nos gráficos das figuras 4.42 e 4.43 respectivamente, conforme figuras a seguir. Estes dois gráficos representam uma amostra em apenas dois tempos distintos para facilitar a visualização de como acontece o erro volumétrico para cada distância analisada.

Encontradas os valores das distâncias entre os pontos considerados, foram estudados três casos distintos, usando as condições já descritas na seção anterior, que serão vistos na próxima seção utilizando os mesmos critérios, porém agora para todo intervalo de tempo (0 à 8h) e para todos os pontos considerados neste tipo de análise.

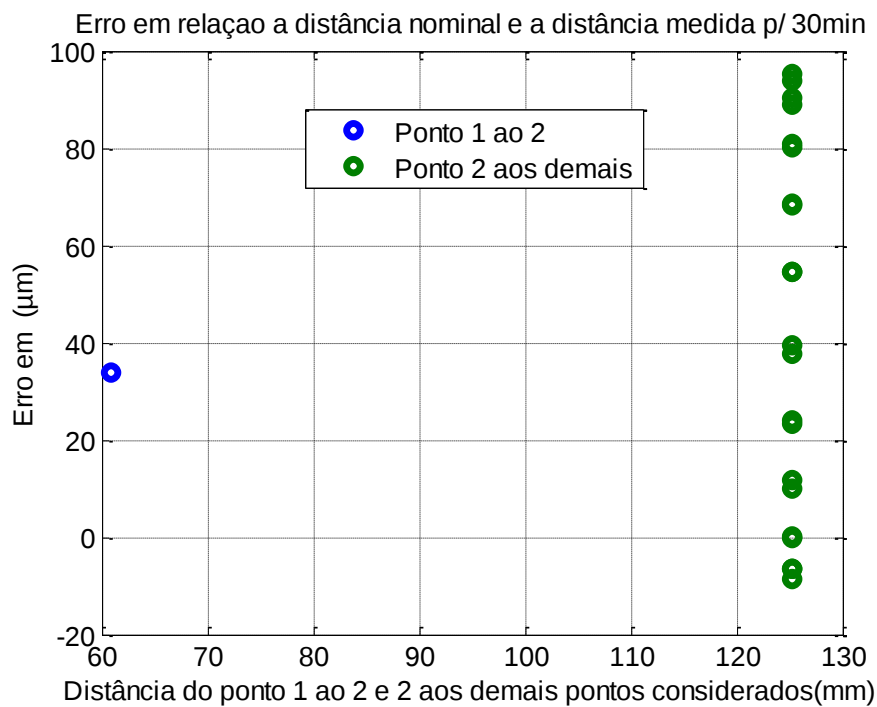


Figura 4.42- Erro em função da distância do ponto 1 ao 2 e do 2 aos demais pontos considerados para o instante de 30 min.

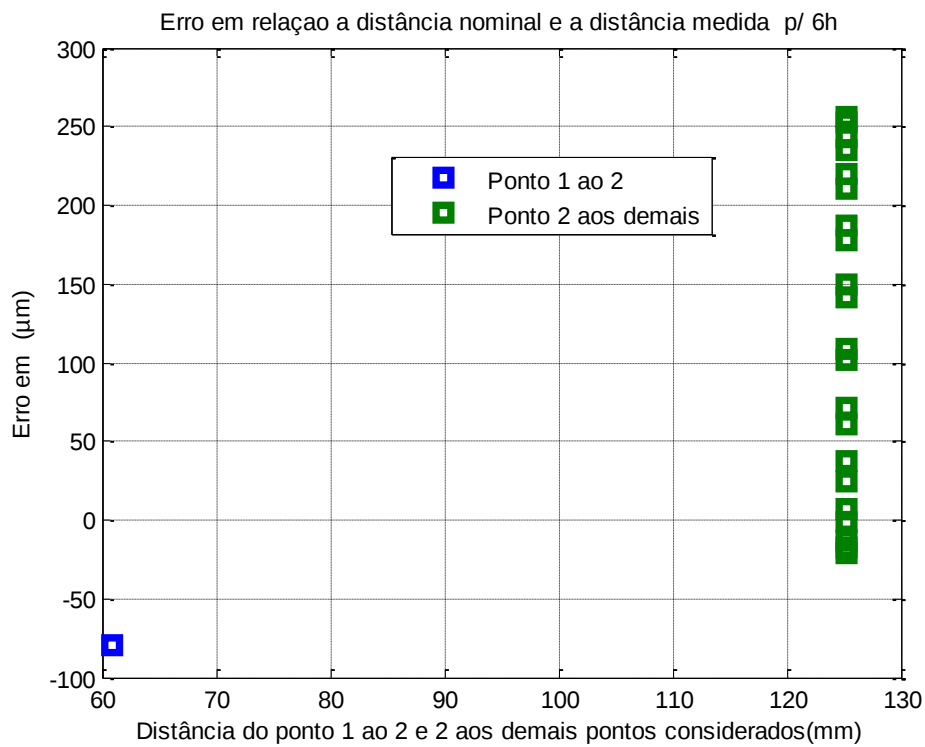


Figura 4.43- Erro em função da distância do ponto 1 ao 2 e do 2 aos demais pontos considerados para o instante de 6h.

4.7.1.1 Análise para o caso A.

Neste caso, foram analisados os deslocamentos térmicos de um ponto fixo no círculo base (P3, nó 3228) em relação aos demais pontos da circunferência ou círculo base (Cb), figura 4.44, observa-se os resultados mostrados no gráfico da figura 4.45. Para o período de tempo analisado (8h) e o mapeamento térmico realizado para cada 360s.

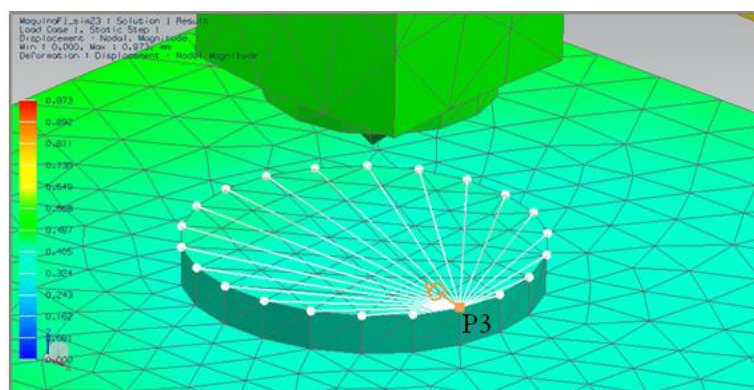


Figura 4.44- Distâncias de um ponto fixo no círculo base (P3, nó 3228) em relação aos demais pontos da circunferência.

Calculando os erros volumétricos para cada distância analisada, para este caso, encontra-se o gráfico da figura 4.45.

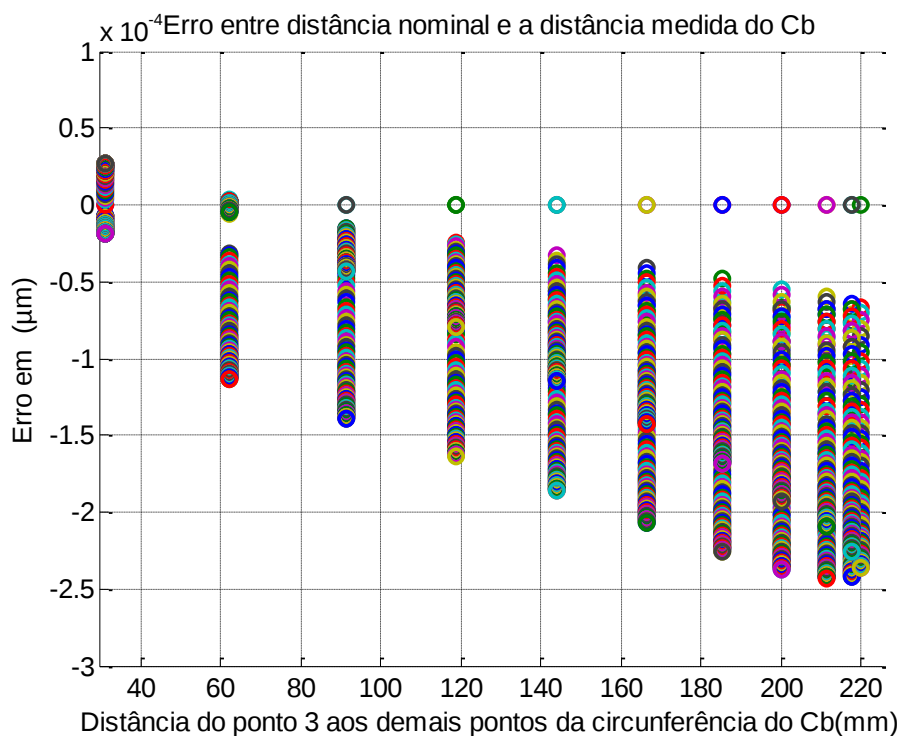


Figura 4.45- Erros térmicos do P3 em relação aos demais pontos da circunferência.

O gráfico da figura 4.45, mostra os erros volumétricos ocorridos entre os nós considerados em relação à distância do P3 (nó 3228) para todas simulações apresentadas para este caso. Fazendo uma simetria dos erros em relação à distância como mostrado na figura 4.46, para determinar as margens de erro. Assim o gráfico da figura 4.45, torna-se neste caso, o gráfico da figura 4.46.

Recorrendo ao método dos mínimos quadrados e levando em consideração os erros máximos em módulo, encontram-se as retas, em vermelho, deslocadas através de uma constante de ajuste, e determinadas através da equação 4.27. A figura 4.47, mostra e delimita a margem de erro volumétrico para este caso.

$$y_a = \pm(0,000001434x + 0,00027064) \quad \text{para } 31 \leq x \leq 225 \quad (4.27)$$

Onde :

x : É a distância nominal entre dois pontos em mm.

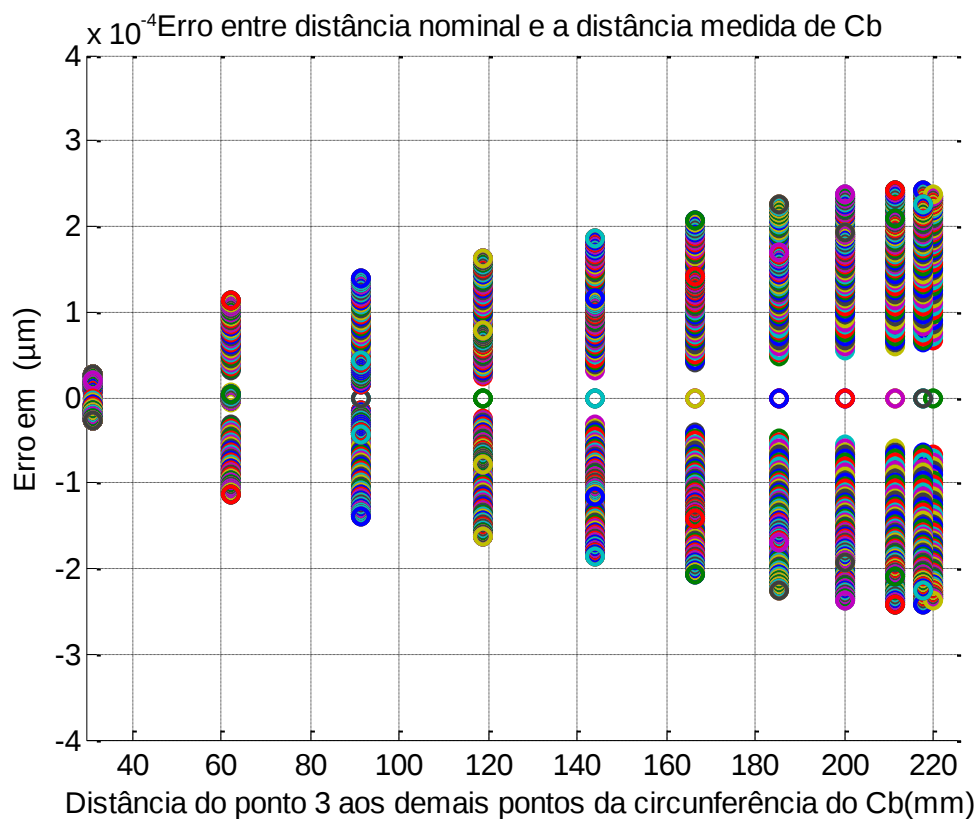


Figura 4.46- Simetria dos erros em relação à distância (caso A).

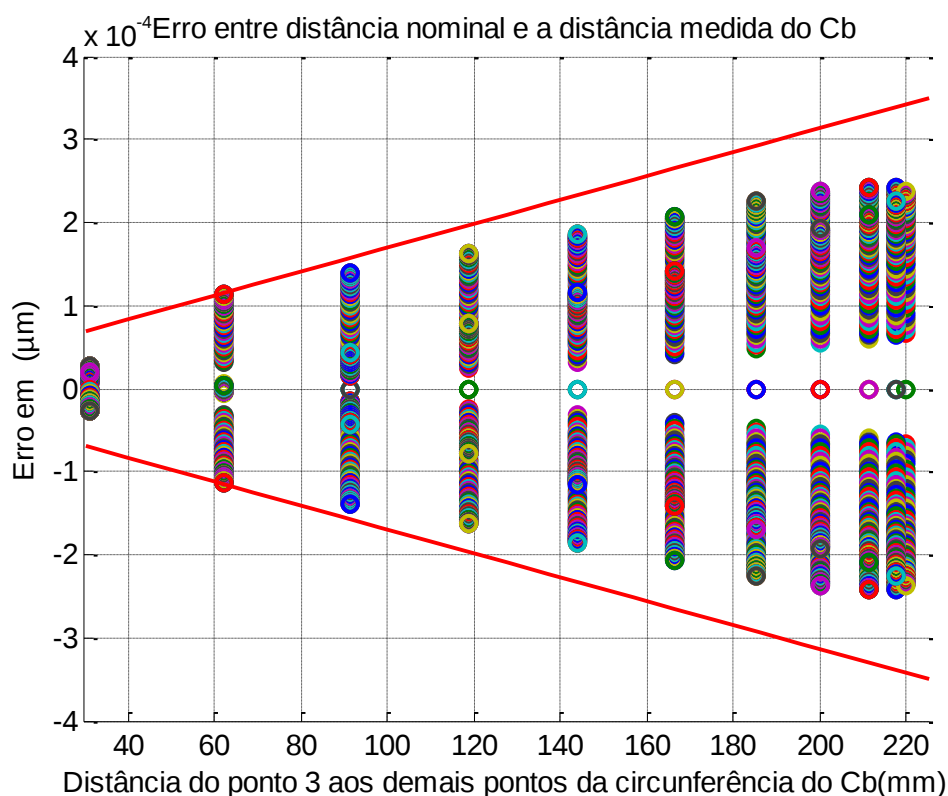


Figura 4.47- Retas que delimitam a margem de erro para o caso A.

4.7.1.2 Análise para o caso B

O procedimento foi semelhante até mesmo usando as mesmas equações de erro e distâncias entre os pontos considerados, porém o ponto de origem (nó 1652) próximo ao centro do círculo base (Ccb) e os demais pontos da circunferência como os pontos finais, mostrados na figura 4.48.

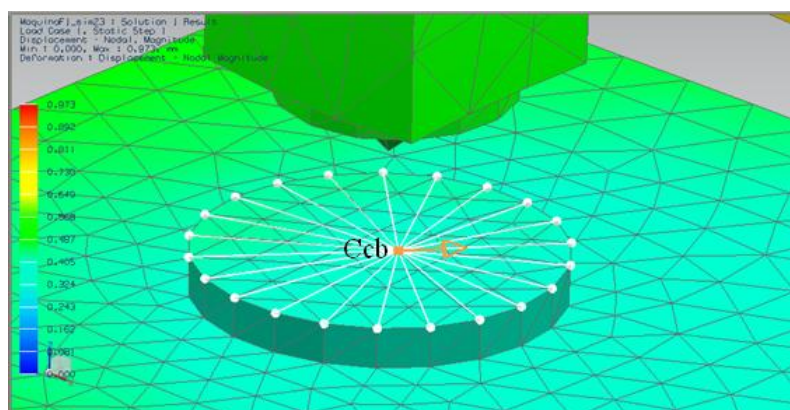


Figura 4.48- Leitura de um ponto fixo próximo ao centro e os demais pontos

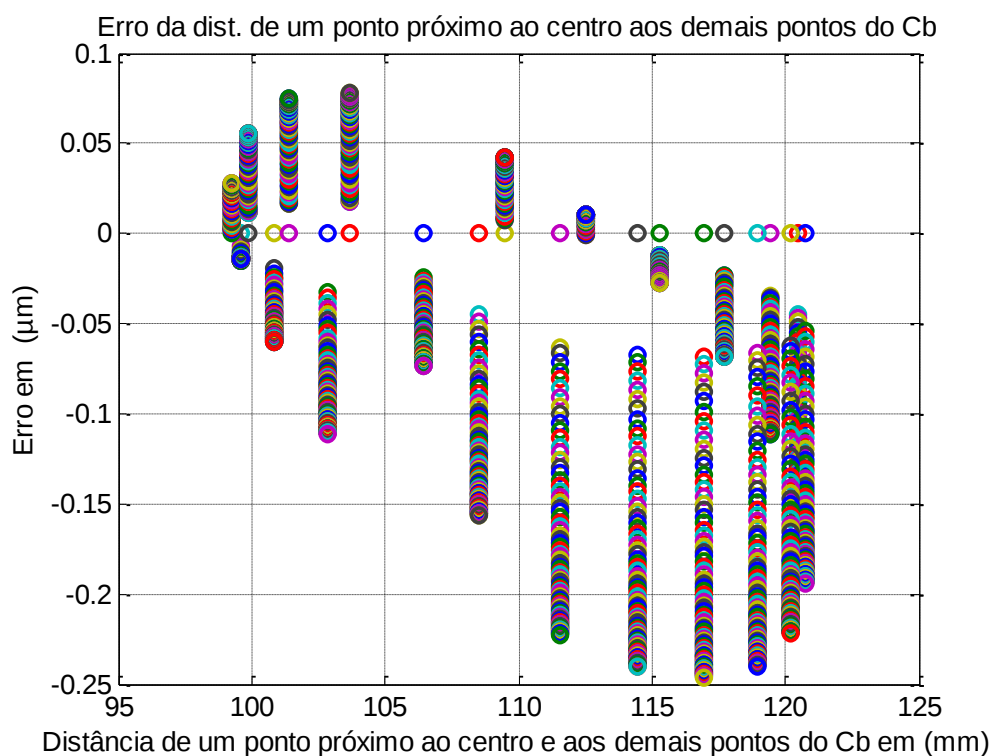


Figura 4.49- Erros térmicos de um ponto próximo ao centro em relação aos demais pontos da circunferência.

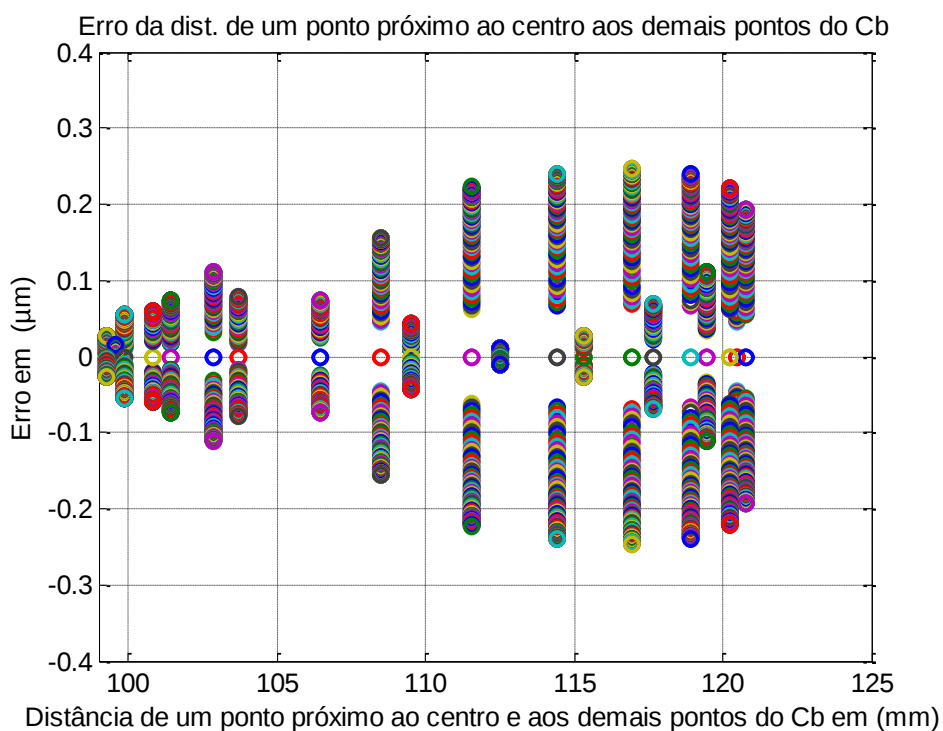


Figura 4.50- Simetria dos erros em relação à distância (caso B).

Encontrando as deformações relativas para esta análise de cada distância considerada durante o período de tempo, assim como o erro volumétrico, como é mostrado no gráfico da figura 4.49.

Fazendo uma simetria dos erros em relação à distância como mostrado na figura 4.50, para determinar as margens de erro. Assim o gráfico da 4.49, torna-se para este caso, o gráfico da figura 4.50.

Recorrendo ao método dos mínimos quadrados e levando em consideração os erros máximos em módulo encontram-se as retas, em vermelho, deslocadas através de uma constante de ajuste figura 4.51, através da equação 4.28, que delimitam a margem de erro volumétrico para este caso.

$$y_b = \pm(-0,0076x + 0,612) \text{ para } 99 \leq x \leq 125 \quad (4.28)$$

Onde :

x : É a distância nominal entre dois pontos em mm.

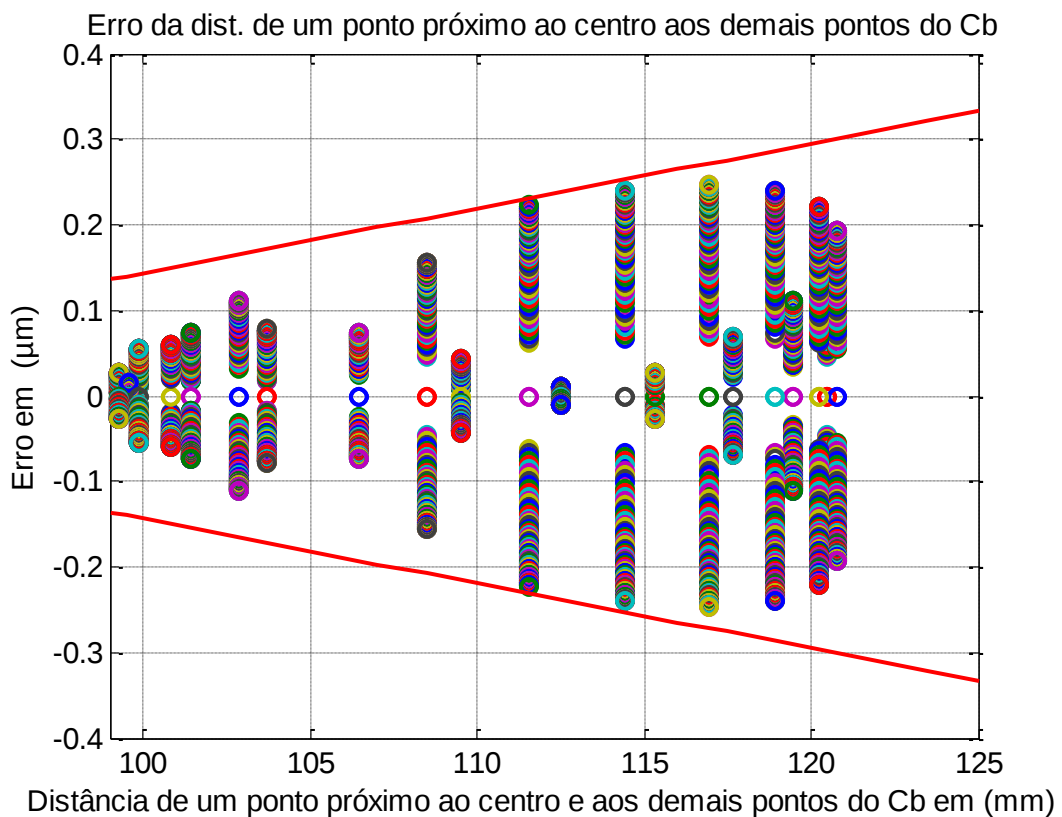


Figura 4.51- Retas que delimitam a margem de erro para o caso B.

4.7.1.3 Análise para o caso C

Foram aproveitados os resultados dos dois casos anteriores acrescidos da leitura da distância da ponta da ferramenta (nó 1692), ponto “PF” ao ponto próximo ao centro do círculo base e aos demais ponto da circunferência, como mostrado na figura 4.52.

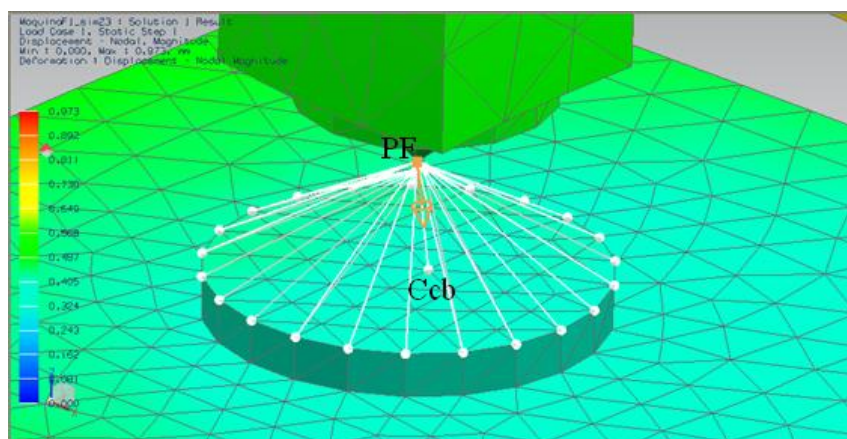


Figura 4.52- Distância da ponta da ferramenta (nó 1692 ou “PF”), ao ponto próximo ao centro do círculo base (nó 1652, ou Ccb) e aos demais ponto da circunferência.

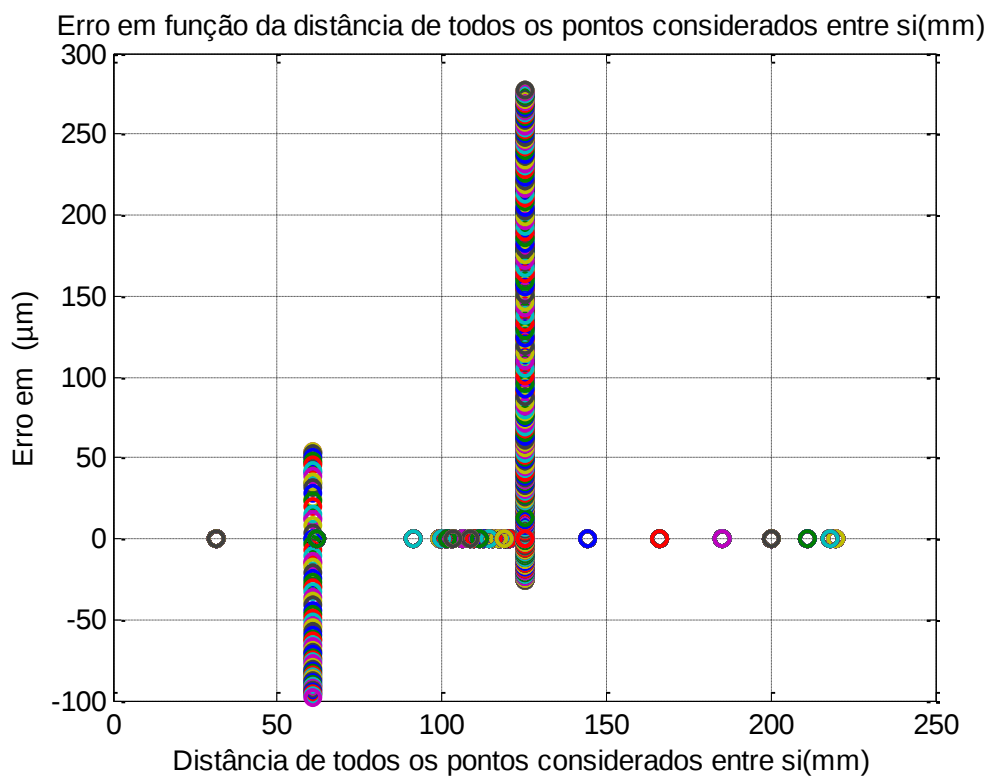


Figura 4.53- Distância e erro volumétrico entre todos os pontos considerados

Observa-se que os dois casos anteriores, ficam suprimidos devido a escala do gráfico da figura 4.53, para este caso considerado e que os erros volumétricos são mais acentuados nas distâncias relativas entre o ponto “PF” e o centro do círculo base “Ccb”, assim como a distância de “PF” e os demais pontos da circunferência do “Cb”, devido o fato que as distâncias nestes pontos também são maiores.

Recorrendo a mesma técnica que foi utilizada nos casos anteriores, ou seja fazendo a simetria dos erros para cada distância nos intervalos de tempo para cada leitura considera obtém-se os resultados mostrados no gráfico na figura 4.54, que engloba todos os erros analisados entre a ponta da ferramenta e o porta peça da máquina –ferramenta.

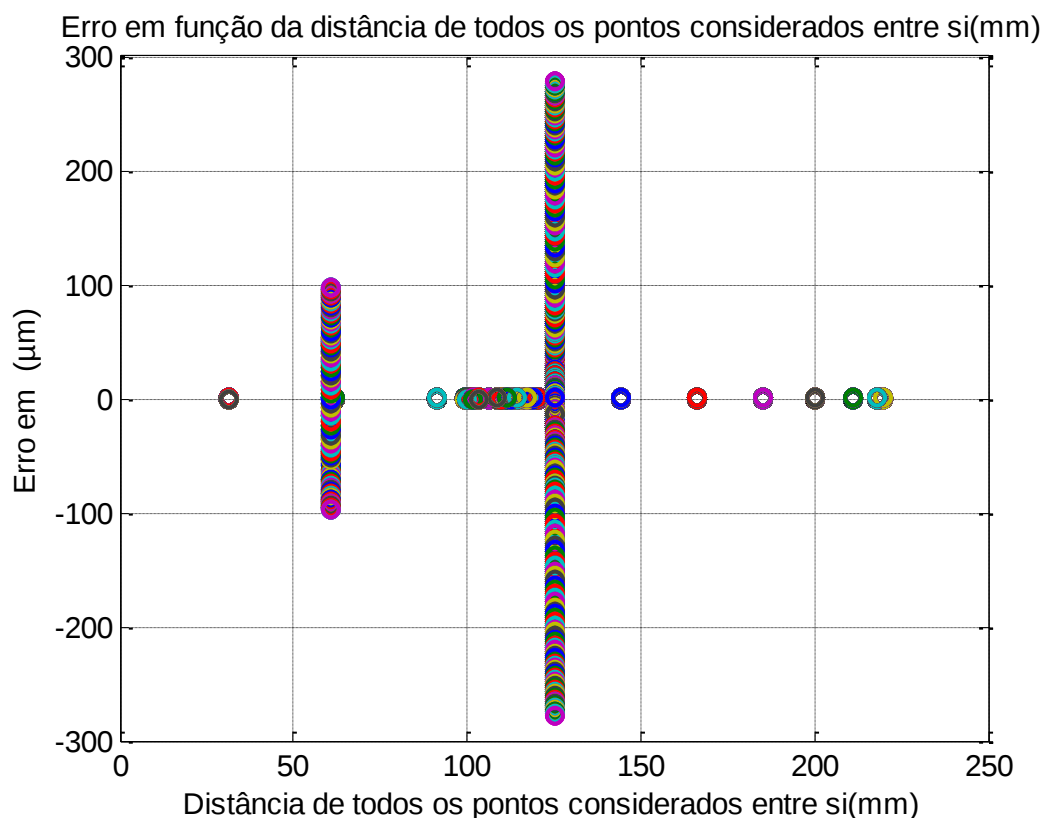


Figura 4.54- Simetria dos erros de todos os pontos considerados.

Da mesma forma, também recorrendo ao método dos mínimos quadrados, foram encontradas as retas deslocadas através de uma constante de ajuste, em vermelho, através da equação 4.29, que delimitam a margem de erro, figura 4.55, que engloba todas as situações analisadas.

$$y_e = \pm(2,923x - 87,0604) \quad \text{para } 31 \leq x \leq 225 \quad (4.29)$$

Onde :

x : É a distância nominal entre dois pontos em mm.

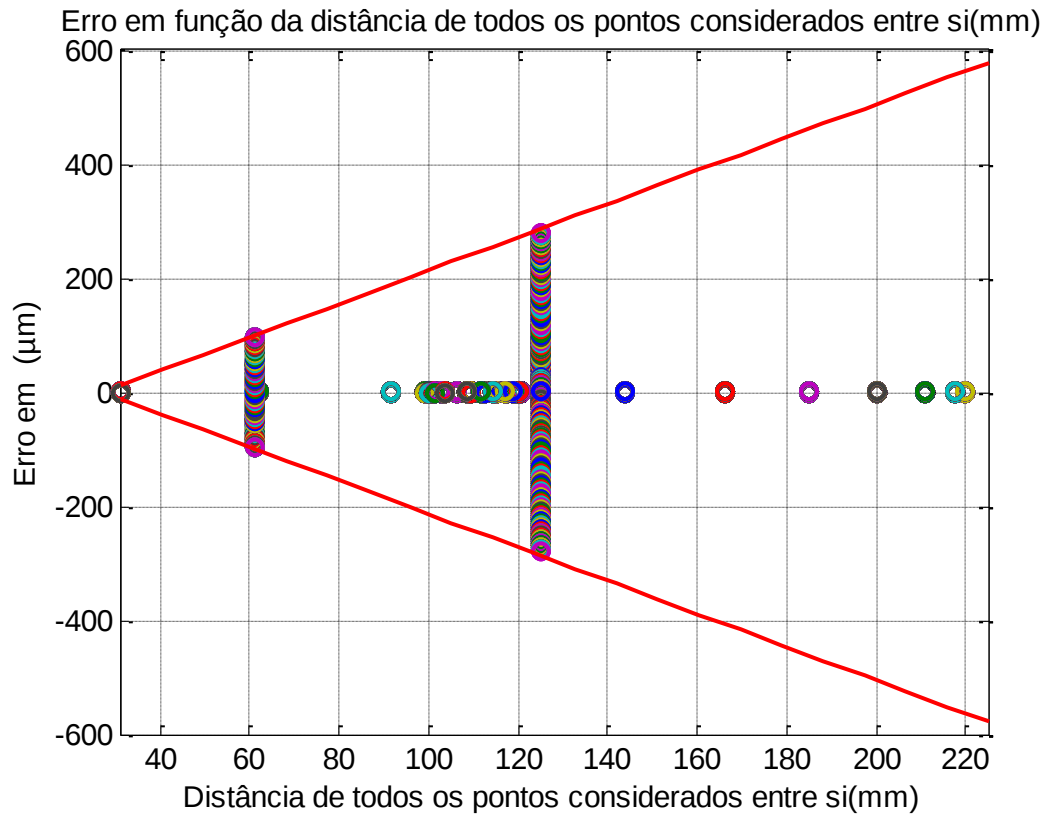


Figura 4.55- Retas que delimitam a margem de erro para todos os casos.

4.8 COMPARATIVO ENTRE O ESTADO PERMANENTE E O ESTADO TRANSIENTE DE TEMPERATURA

No gráfico comparativo, figura 4.56, entre as curvas das deformações com fontes de calor constantes e com fontes de calor variável ou caso transiente, nota-se a grande diferença entre estes dois tipos de condições de contornos na máquina-ferramenta.

Percebe-se que nos eixos X e Z as deformações são maiores para valores de temperaturas menores, que na situação das fontes constantes, na análise destes mesmos eixos. Isso acontece devido ao gradiente de temperatura ser maior para o caso transiente, além do fato de precisar de mais tempo para alcançar a estabilidade térmica.

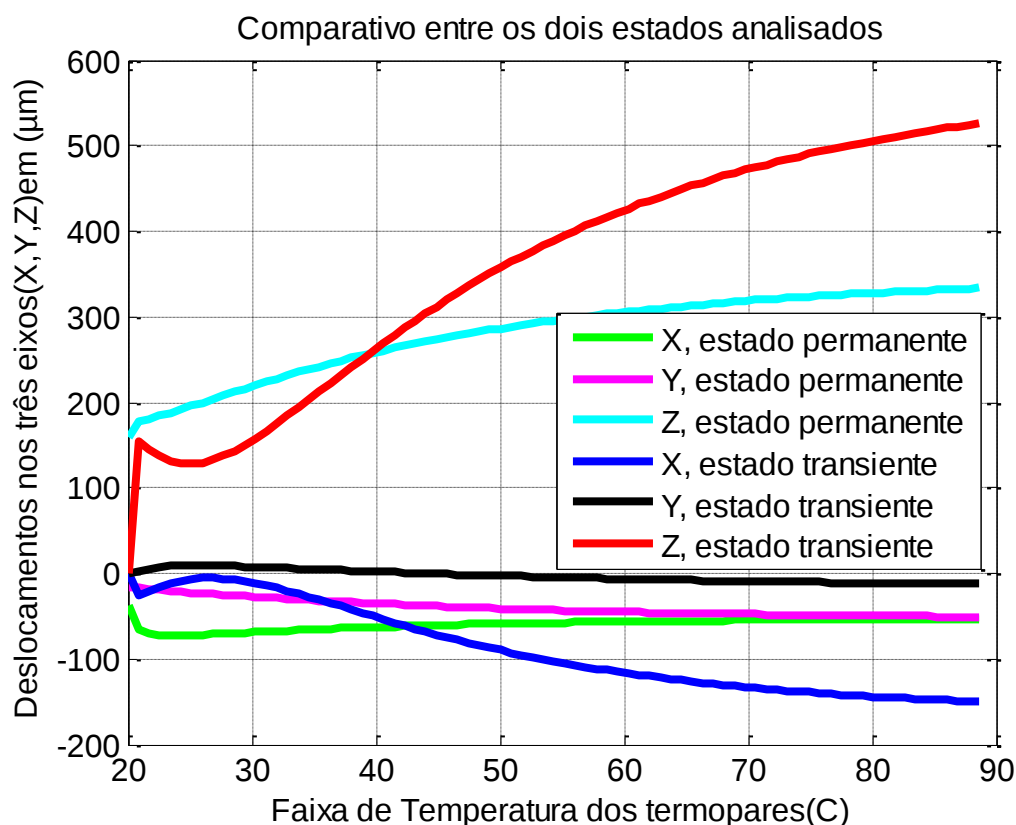


Figura 4.56- Gráficos Comparativos para as condições de contornos variável e constante.

Acontecendo o processo inverso no caso em que as fontes de calor possuem temperaturas constantes do início ao fim do período preestabelecido. E que as deformações no eixo Y são maiores quando é usado as fontes de calor constantes para a faixa de temperatura considerado.

4.9 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Em relação ao MEF, a partir do conhecimento dos deslocamentos dos nós, pode-se calcular o comportamento interno de cada elemento. Quanto mais especificado esse comportamento interno, mais a resposta do modelo irá se aproximar do comportamento real da estrutura. Ou seja, o elemento discreto que representa um dado trecho da estrutura entre os nós deve ser muito bem definido. Então dois aspectos primordiais chamam atenção e são as características básicas do MEF: A subdivisão da estrutura em elementos, isto é, a malha de elementos finitos; A escolha do elemento apropriado para modelar uma dada situação física, poderá se aproximar bastante de uma situação real. Neste trabalho

utilizou-se o elemento tetraedro de tamanho 50mm, após simulações com vigas e uma máquina-ferramenta semelhante a que foi usada e verificando o tempo necessário para cada simulação, concluiu-se que este tipo de elemento satisfazia inicialmente as condições de simulação com um ótima aproximação.

Neste capítulo verificou que é plenamente possível usar dados do MEF e cálculos no ambiente do MatLab para simular um sistema de medição semelhante ao sistema Ballbar. Utilizando esta metodologia para plotar as deformações ocorridas em planos diferentes de máquinas-ferramenta, antes mesmo de qualquer usinagem, contribuindo para a tecnologia CAE e conseguindo separar os erros puramente térmicos. Tanto da base de uma peça como também em relação a ponta de uma ferramenta ou para determinar a margem de erro térmico de uma máquina-ferramenta ainda na fase de projeto.

Nas figuras de 4.39 a 4.41, onde se encontram os gráficos de três exemplos de termopares localizados em pontos estratégicos da máquina-ferramenta, constata-se a praticidade de observar simultaneamente as deformações ao longo do tempo com as respectivas temperaturas lidas pelos termopares exemplificados, mas que pode se fazer tais leituras para qualquer um dos oitos termopares colocadas na máquina-ferramenta facilitando assim a interpretação dos dados.

Conclui-se que as deformações aumentam no decorrer do tempo, mesmo com as condições térmicas em regime permanente, porém a visualização torna-se complicada devido as escalas dos eixos. Já no eixo X a deformação atinge um máximo em modulo e depois volta a diminuir, havendo uma contração ao invés de uma expansão térmica, isso ocorre devido a outros elementos estruturais da máquina. Observa-se ainda que as maiores variações das deformações encontra-se na primeira meio hora de funcionamento da máquina. Estando coerente com a maioria da literatura em estudo.

Se considerarmos apenas a análise em MEF no NX do círculo base na sua circunferência, é possível detectar as deformações, mas não de forma explícita. Porém com a simulação de um sistema Ballbar virtual, torna-se possivelmente visível quando plota-se nos gráficos das figuras 4.18, 4.19 e 4.20.

Com a metodologia usada pode-se fazer para qualquer tempo ou circunferência desde que alimente o programa criado de forma correta e desloque os centros das circunferências para a origem do plano cartesiano. Para ficar mais fácil a comparação dos dados mesmo que após as dilatações ocorram desalinhamentos dos centros.

Conclui-se ainda em relação esta duas últimas análises, que embora tem-se considerado o nó 3172 como fixo, na realidade a cada intervalo de tempo ele também sofre deformações. Aumentado ou diminuindo a deformação total relativa entre dois pontos considerados e com a influência das outras fontes de calor internas durante as análises.

Assim constata-se que é possível fazer uma análise dos erros térmicos em máquinas-ferramenta antes mesmo de fabricá-las usando a tecnologia CAM/CAD juntamente com a metodologia proposta, a qual se consegue separar também os erros geométricos dos térmicos e possibilitando o uso de um sistema de medição virtual. E usar este sistema para a alimentação de dados quando se desejar realizar uma possível correção dos erros térmicos ou para um possível sistema de compensação baseado na previsão dos erros térmicos em cada eixo de movimento da máquina.

Em relação ao estabelecimento da margem de erros, a técnica desenvolvida para MMCs por (SILVA et al, 2008), também pode ser usada em qualquer máquina-ferramenta adicionando a metodologia deste trabalho ou em MMCs contribuindo assim para estabelecer a margem de erros nestes dois tipos de máquinas.

CAPÍTULO V

APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DOS DELOCAMENTOS TÉRMICOS DE MÁQUINAS-FERRAMENTA

5.1-INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a aplicação de redes neurais artificiais para determinação e análise dos deslocamentos térmicos de máquinas-ferramenta. As redes serão desenvolvidas e treinadas usando os dados obtidos com a simulação dos deslocamentos térmicos da máquina, baseada no método dos elementos finitos mostrados no capítulo IV.

Redes Neurais Artificiais (RNA) são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência (BRAGA et al, 2000). Uma grande rede neural artificial pode ter centenas ou milhares de unidades de processamento; já o cérebro de um mamífero pode ter muitos bilhões de neurônios (PALMA et al, 2005).

5.2- DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE REDES NEURAIS

Com o objetivo de desenvolver e implementar uma sistemática para determinação e análise dos deslocamentos térmicos de máquinas-ferramenta, usando o método dos elementos finitos (MEF) e Redes Neurais Artificiais (RNA) a partir dos valores das temperaturas e dos deslocamentos térmicos em pontos estratégicos da máquina-ferramenta, é que nas próximas seções, serão desenvolvidas RNAs para três casos distintos; para a verificação e desenvolvimento de uma RNA para cada caso. No primeiro caso será

desenvolvida uma RNA para o aprendizado individual de cada eixo da máquina separadamente ao longo do tempo, no estado permanente de temperatura. No segundo caso, será desenvolvida uma RNA para o aprendizado simultâneo dos três eixos em função das leituras dos termopares, no estado permanente de temperatura. No terceiro e último caso, que é o mais completo, será desenvolvida uma RNA para o aprendizado dos três eixos simultaneamente em função das leituras dos termopares no estado transiente de temperatura.

5.2.1 Desenvolvimento de uma RNA para o aprendizado individual de cada eixo ao longo do tempo, no estado permanente de temperatura.

No caso das fontes de calor na máquina-ferramenta analisada não variantes no tempo ou fixa, tem-se as deformações conforme gráfico da figura 5.1 já vista no capítulo IV. Onde é mostrado os deslocamentos térmicos dos três eixos simultaneamente ao longo do tempo de análise, que foram coletados através das técnicas vista no capítulo IV e do sistema de medição virtual usando o MEF. Nesta seção é analisado o comportamento de cada eixo separadamente para este caso, ou estado permanente de temperatura.

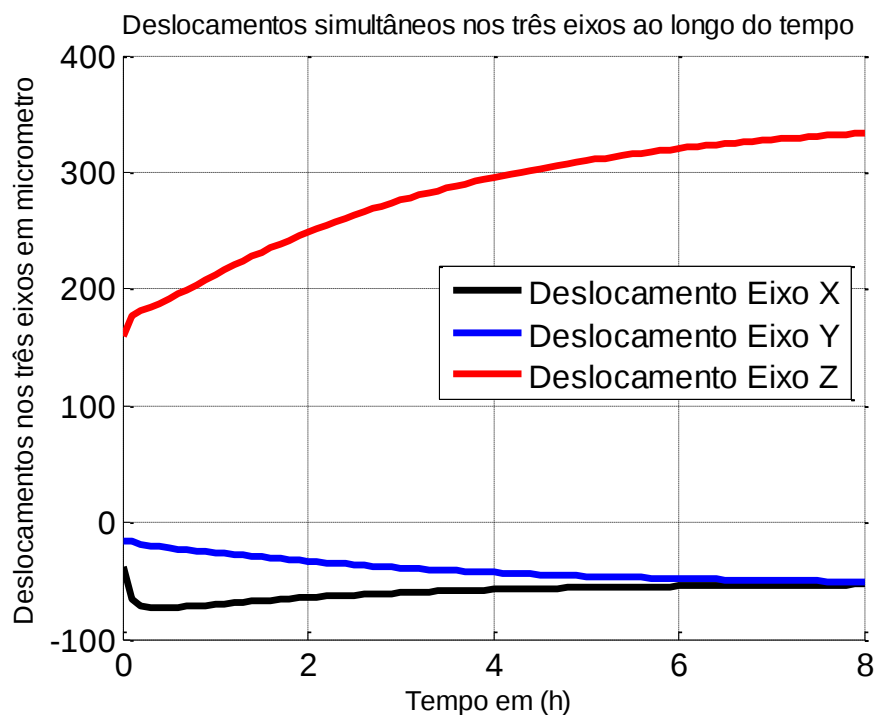


Figura 5.1- Deformação volumétrica, com as fontes de calor constantes.

Para o aprendizado individual de cada eixo, para o caso das fontes de calor constantes, foi desenvolvida no ambiente do MatLab uma rede feed-forward backpropagation, com aprendizado supervisionado no modo padrão, off-line, formada de 5 neurônios na primeira camada e 1 neurônio na segunda camada, conforme topologia mostrada simbolicamente na figura 5.2, e o programa mostrado no apêndice B,

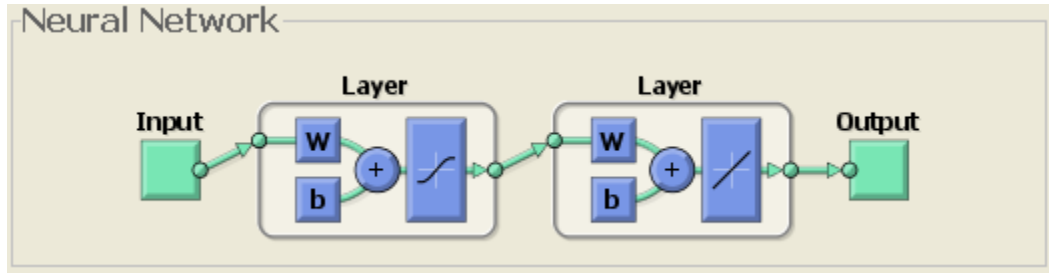


Figura 5.2- Topologia da RNA mostrada no MatLab

As funções de transferência ou de ativação da primeira e da segunda camada são respectivamente, “tansig” e “purilin” (LIMA, 2007). De acordo com as equações 5.1 e 5.2:

$$tansig_j = \frac{2}{(1 + \exp(-2w_i t_j))} - b_i \quad (5.1)$$

$$a_j = w_i t_j + b_i \quad (5.2)$$

Sendo: w_i : Os pesos para cada iterações.

t_j : Matriz de entrada da rede para cada j elemento.

b_i : Bias ou (threshold) de cada neurônios para as n iterações.

A entrada “input”, desta rede, recebe a matriz t_j , formada pelos valores de tempo das 82 simulações realizadas durante o período de análise, de acordo com a equação 5.3, Na saída “output” constará o resultado do aprendizado, após a comparação com valor desejado “alvo” ou deformações térmicas do eixo X, durante o período de análise, equação 5.4.

$$t = \{ [tj] \} \quad (5.3)$$

$$A_x = \{ [Dx] \} \quad (5.4)$$

Onde :

$[tj] = \{tj_{(1,i)}\}$ Matriz linha formada da leitura de cada tempo de análise.

$[Dx] = \{D_{x(1,i)}\}$ Matriz linha da leitura das deformações do eixo X de acordo com cada incremento tempo i .

Quando os dados referente à deformação do eixo X ao longo do tempo, como pode ser visto na figura 5.3,. foram introduzidos como “alvo” ou resposta desejada na RNA, através das funções criadas no ambiente do MatLab, criou-se uma curva aleatória, cor verde, conforme gráfico da figura 5.4, para gerar os pesos aleatórios iniciais das entradas e das camadas da RNA, com o objetivo de inicializar o treinamento da rede (CAVALCANTE, 2004).

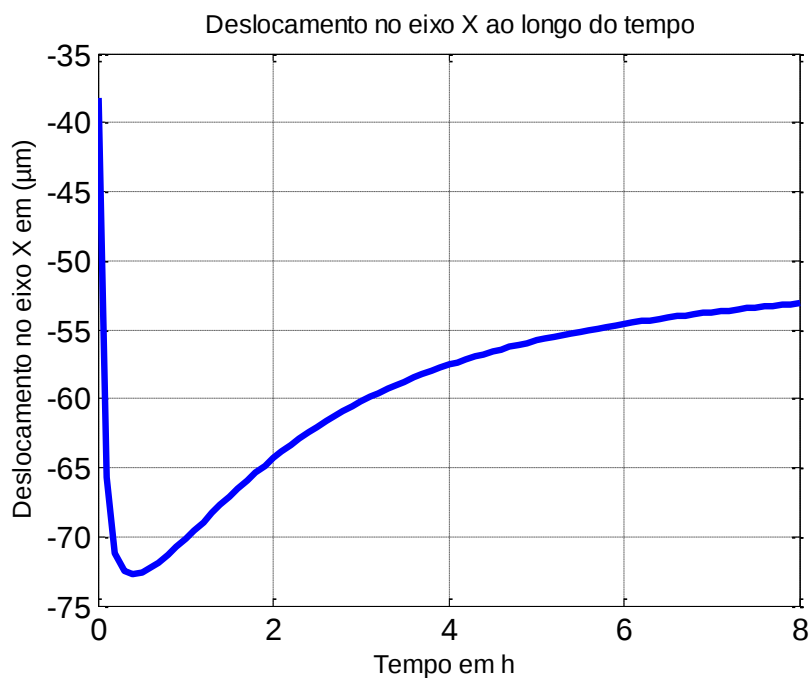


Figura 5.3- Deformação da ponta da ferramenta no eixo X ao longo do tempo

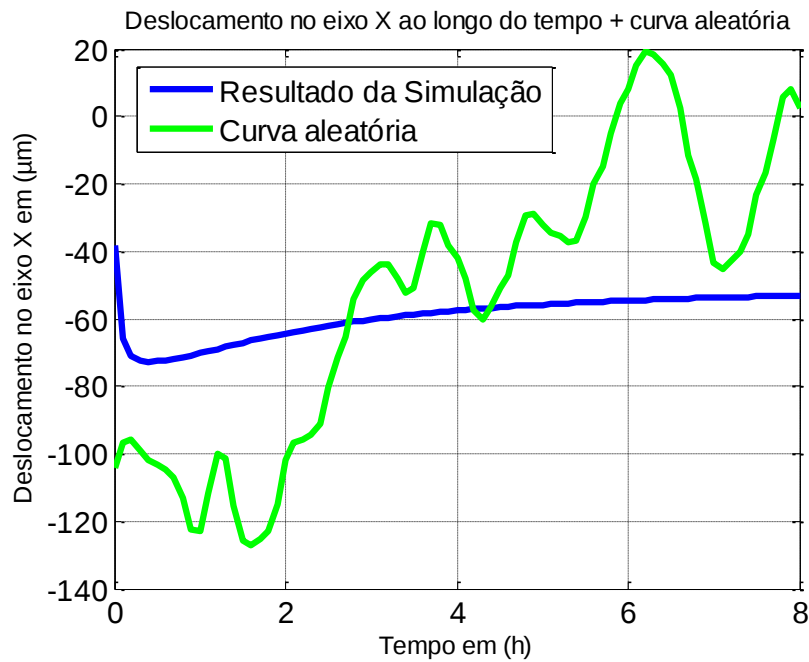


Figura 5.4- Curva real mais curva aleatória para o eixo X

Após o treinamento da rede, com 50 iterações obteve-se o resultado mostrado na figura 5.5, onde a curva em azul mostra a deformação real ou simulada no eixo X e a em vermelho o treinamento da RNA. Observa-se que houve realmente uma convergência de valores. Isso mostra que a rede “aprendeu”. Para os deslocamentos térmicos deste eixo usado como “alvo” ou saída desejada.

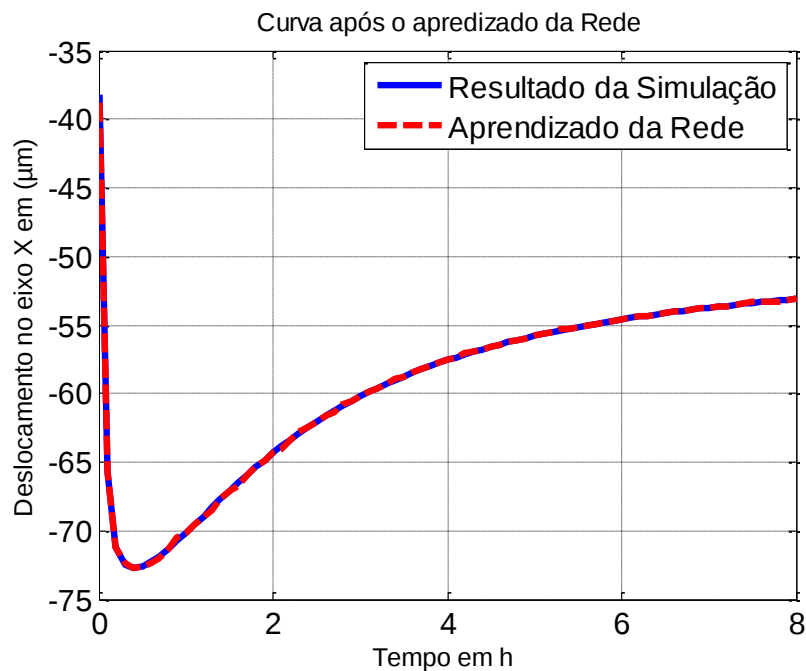


Figura 5.5- Curva dos deslocamentos eixo X mais curva de aprendizado da rede

Na tabela 5.1 é exemplificada uma amostra do aprendizado da rede para os 17 primeiros pontos do gráfico da figura 5.5, para verificar a convergência, mediante a comparação das deformações ocorridas no eixo X para o estado permanente, com o aprendizado da rede com os seus respectivos erros em micrometro. Além disso, pode-se Plotar o erro quadrático médio em micrometro, figura 5.6, que é um parâmetro muito usado em RNA. Para a análise neste eixo, observa-se que o erro é maior na primeira hora de simulação de usinagem, do valor de aprendizado em relação ao “alvo”, pois neste intervalo, o aprendizado da rede possui dificuldade para convergir e aprender o comportamento térmico simulado, mas a medida que a rede vai aprendendo as curvas vão convergindo e conseguindo assim, erros menores que 0,2 μm da curva obtida através das simulações em relação a curva da rede treinada.

Tabela 5.1 Amostra de pontos de aprendizado da RNA para o eixo X-Estado permanente			
Tempo (s)	Deslocamento eixo X (μm)	Aprendizado da Rede (μm)	Erro (μm)
0	-38,167	-38,235	0,068
360	-65,711	-59,901	-5,811
720	-71,140	-70,619	-0,522
1.080	-72,438	-72,436	-0,003
1.440	-72,694	-72,656	-0,038
1.800	-72,573	-72,614	0,040
2.160	-72,268	-72,287	0,019
2.520	-71,844	-71,832	-0,012
2.880	-71,339	-71,317	-0,023
3.240	-70,779	-70,779	-0,001
3.600	-70,183	-70,377	0,194
3.960	-69,567	-69,588	0,021
4.320	-68,941	-68,880	-0,062
4.680	-68,316	-68,387	0,071
5.040	-67,698	-67,647	-0,051
5.400	-67,090	-67,118	0,027
5.760	-66,499	-66,493	-0,006

Este mesmo procedimento pode ser usado para todos os eixos neste trabalho, mas a tabela 5.1 foi usada apenas para exemplificar o processo de aprendizado do eixo X não necessitando criar uma tabela semelhante para os outros eixos neste estado permanente de temperatura.

Pode-se verificar também a convergência da RNA, por meio do erro quadrático médio em relação ao eixo X, mostrado na figura 5.6.

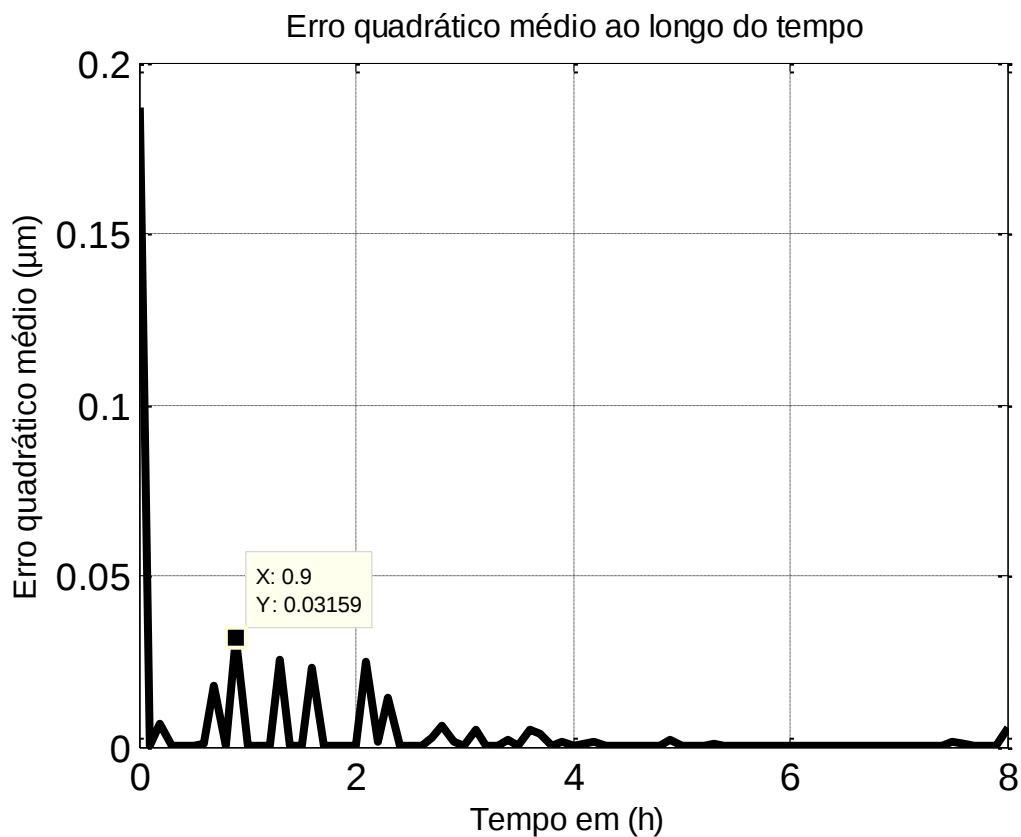


Figura 5.6- Erro quadrático médio para o eixo X

No eixo Y, foi usada a mesma RNA, com a mesma topologia, e o procedimento foi o mesmo para o treinamento, diferenciando apenas pelo número de iterações, que neste caso foi 20. Na figura 5.7 encontram-se separadamente os deslocamentos térmicos no eixo Y, no regime permanente.

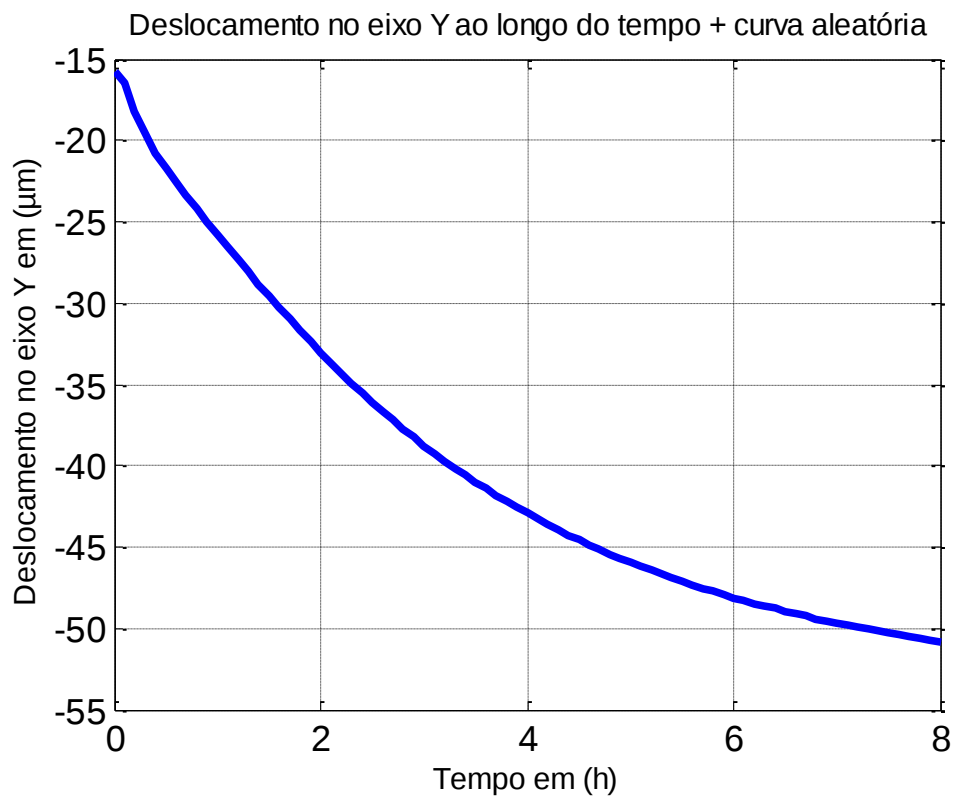


Figura 5.7- Deslocamentos térmicos do eixo Y ao longo do tempo

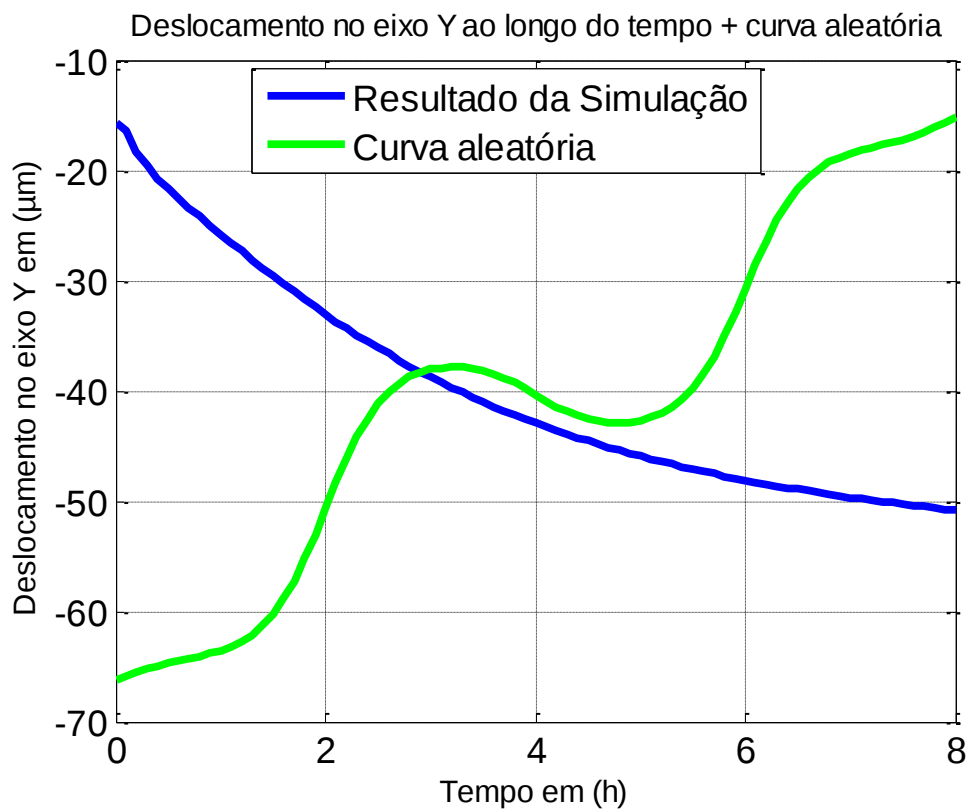


Figura 5.8- Deslocamentos do eixo Y mais curva aleatória.

Na figura 5.8 é mostrado separadamente o deslocamento no eixo Y mais a curva aleatória, cor verde, também para gerar os pesos aleatórios iniciais. Na figura 5.9 é mostrado o quanto a rede “aprendeu” em relação a curva encontrada através das simulações neste eixo ao longo do tempo. Observa-se uma convergência bem mais rápida e mais acentuada em relação ao eixo X.

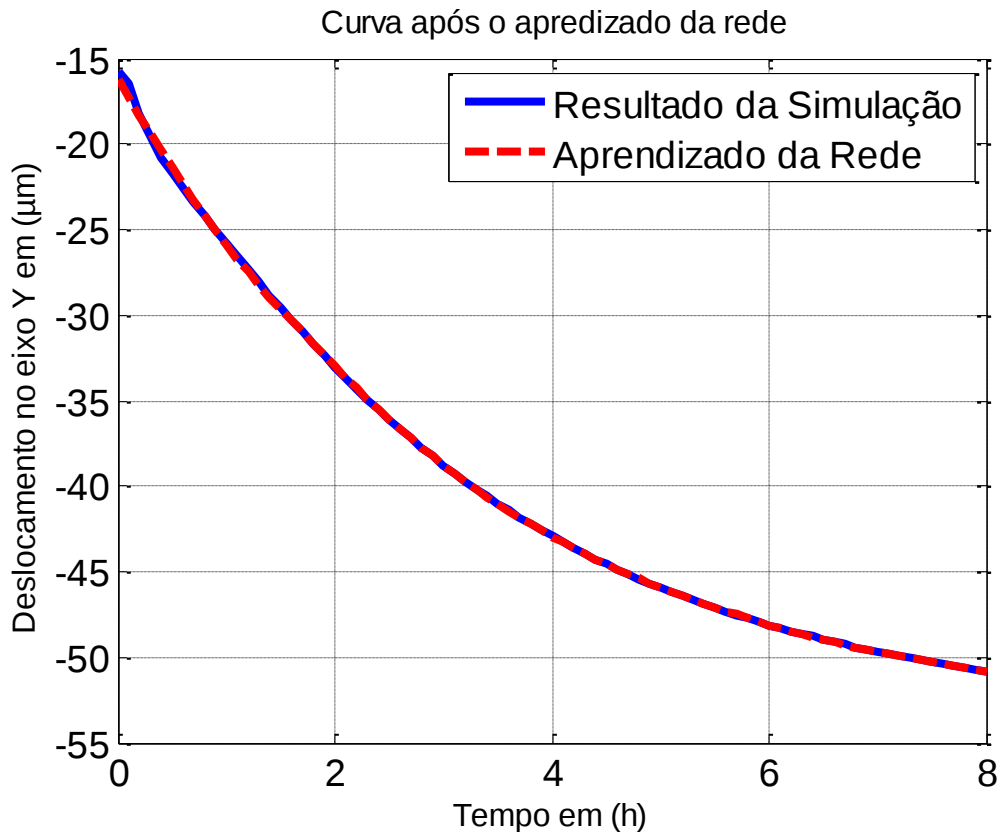


Figura 5.9- Deslocamento simulado do eixo Y mais curva de aprendizado da rede.

O erro quadrático médio da curva de aprendizado da rede em relação aos deslocamentos térmicos ocorridas no eixo Y é mostrado na figura 5.10. Embora o comportamento desta curva seja muito semelhante ao do eixo X, para o intervalo de tempo considerado de uma hora, os erros apresentam-se maiores, diminuindo novamente para menos de $0,05\mu\text{m}$. Isso não implica que a rede demorou em torno de uma hora para aprender e sim que a partir deste intervalo de tempo simulado é que a RNA conseguiu convergir para valores com esta margem de erro.

Para o eixo Z, também foi usado o mesmo procedimento, cujos deslocamentos térmicos apresentados na figura 5.11. Neste eixo apresentam-se os maiores deslocamentos

térmicos os quais provocarão os maiores erros térmicos, para este caso de regime permanente. Por isso que na maioria da literatura técnica especializada neste assunto enfatizam tanto as deformações neste eixo. O processo de aprendizagem foi semelhante a dos eixos anteriores utilizando uma RNA com a mesma topologia. A curva aleatória em verde e os deslocamentos térmicos simulados neste eixo em azul, figura 5.12.



Figura 5.10- Erro quadrático médio do eixo Y ao longo do tempo.

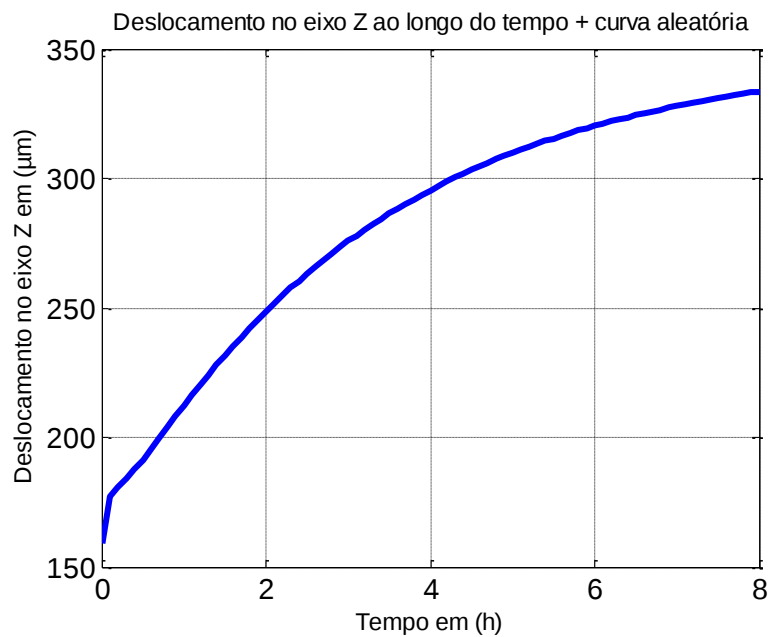


Figura 5.11- Deslocamentos no eixo Z

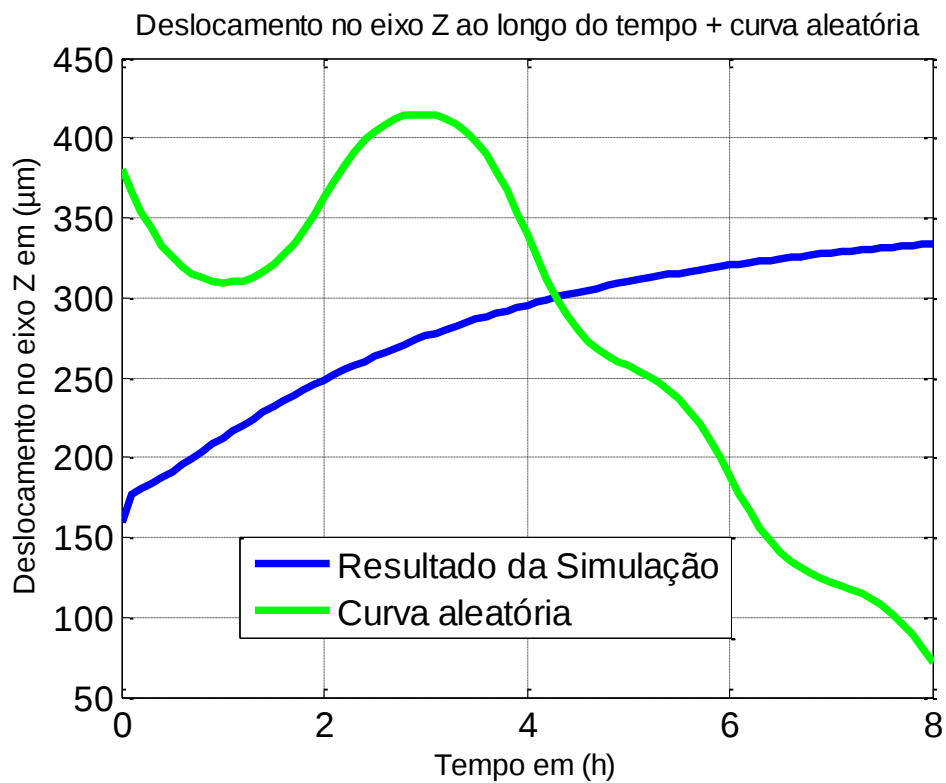


Figura 5.12- Deslocamentos no eixo Z mais curva aleatória.

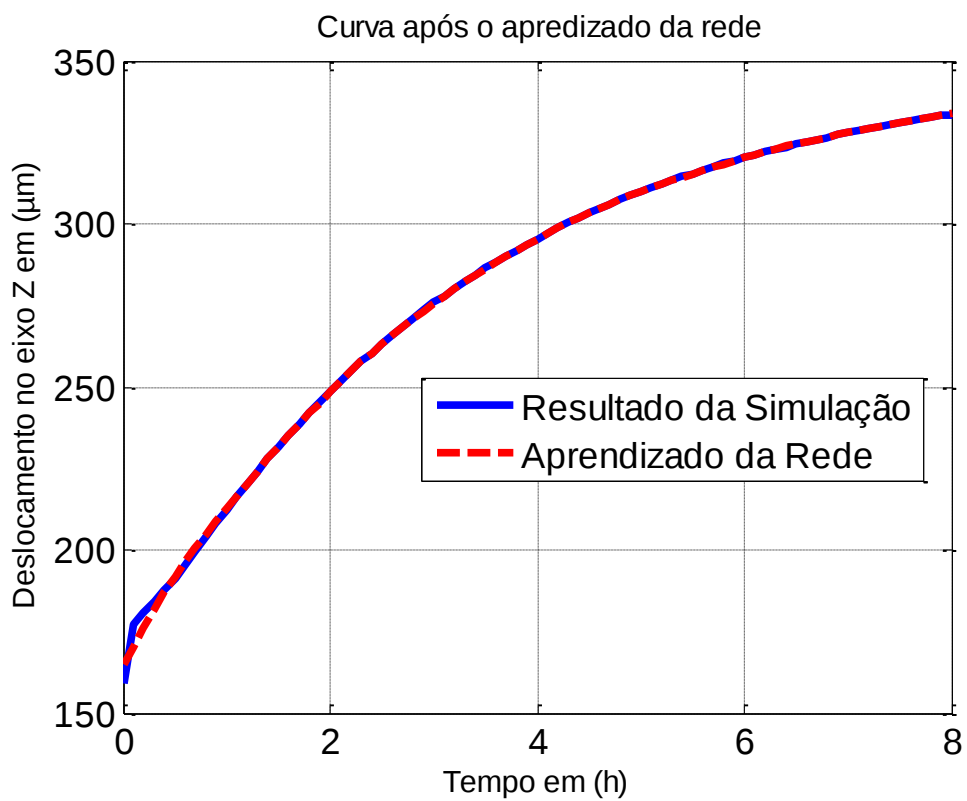


Figura 5.13- Deslocamento do eixo Z mais aprendizado da rede.

Observa-se a convergência da curva da rede em vermelho com a curva simulada (considerada como real) dos deslocamentos térmicos no eixo Z em azul, figura 5.13. Constatando o aprendizado da RNA.

Para o gráfico do erro quadrático médio do eixo Z, figura 5.14, verifica-se o erro bastante acentuado, mesmo em micrometro, entre o aprendizado da RNA e os valores reais da simulação, no intervalo mostrado, porém a convergência é melhor e mais estável do que nos outros eixos analisados. Tornando-se este erro aproximadamente zero. Após 0,6 da hora, constata-se valores menores que $0,317\mu\text{m}$, conforme o gráfico.

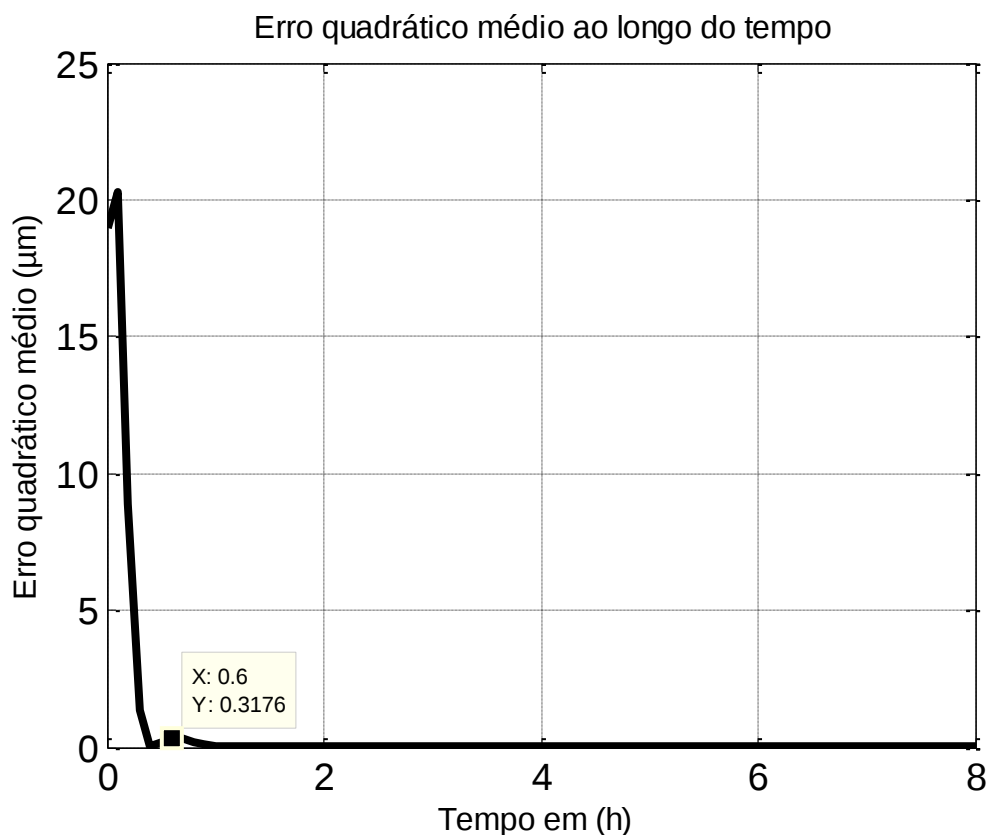


Figura 5.14- Erro quadrático médio em micrometro para o eixo Z

Como se pode concluir nos três eixos individualmente, a rede conseguiu aprender os deslocamentos térmicos para este caso analisado ao longo do tempo. Tendo uma pequena dificuldade de convergência nos três eixos apenas no início do processo de aprendizado.

5.2.1.1 Desenvolvimento de uma RNA para o aprendizado simultâneo dos eixos em função das leituras dos termopares no estado permanente de temperatura.

Na seção anterior a RNA conseguiu aprender o comportamento térmico da ponta da ferramenta em função do tempo de análise. Nesta seção a rede passará pelo processo de aprendizado para os três eixos simultaneamente em função das leituras das temperaturas dos nós que simbolizam os termopares na máquina. Em seguida passa pelo processo de validação.

Formulou-se uma RNA de 16 neurônios na primeira camada e 1 neurônios na segunda camada, com feed-forward backpropagation e feedback da saída para a entrada, com as funções de ativação tansig e purelin respectivamente, aprendizado supervisionado por correção de erros, modo padrão, usando as equações 5.1-5.2 como já foi especificado anteriormente, e a topologia conforme é mostrada na figura 5.15.

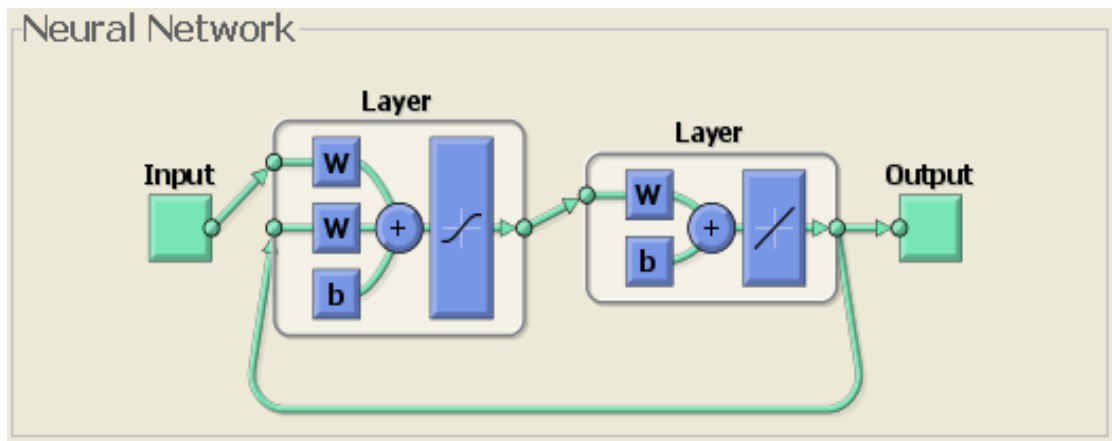


Figura 5.15- RNA para os três eixos-Estado permanente.

Na entrada “input” foi introduzido as matrizes de temperatura de cada termopar, equação 5.5 ao longo do tempo considerado e como “alvo” a matriz dos deslocamentos térmicos dos eixos X, Y e Z, equação 5.6. Tendo como saída desejada os deslocamentos térmicos ocorridos simultaneamente em cada eixo.

$$T = \{ [T_j] \} \quad (5.5)$$

$$A = \{ [Dx] [Dy] [Dz] \} \quad (5.6)$$

Onde :

$[Tj] = \{Tj(1,i)\}$ Matriz linha de cada termopar j para cada incremento i .

$[Dx] = \{Dx(1,i)\}$ Matriz linha de cada deformação no eixo X para cada incremento i .

$[Dy] = \{Dy(1,i)\}$ Matriz linha de cada deformação no eixo Y para cada incremento i .

$[Dz] = \{Dz(1,i)\}$ Matriz linha de cada deformação no eixo Z para cada incremento i .

O resultado do processo de aprendizado para os três eixos, usando a RNA desenvolvida nesta seção é mostrado na figura 5.16, na qual se observa o aprendizado simultâneo para os respectivos deslocamentos nos três eixos, simultaneamente em função das temperaturas desenvolvidas ao longo da máquina-ferramenta analisada, para 500 iterações. Observa-se ainda, a convergência para todos os eixos.

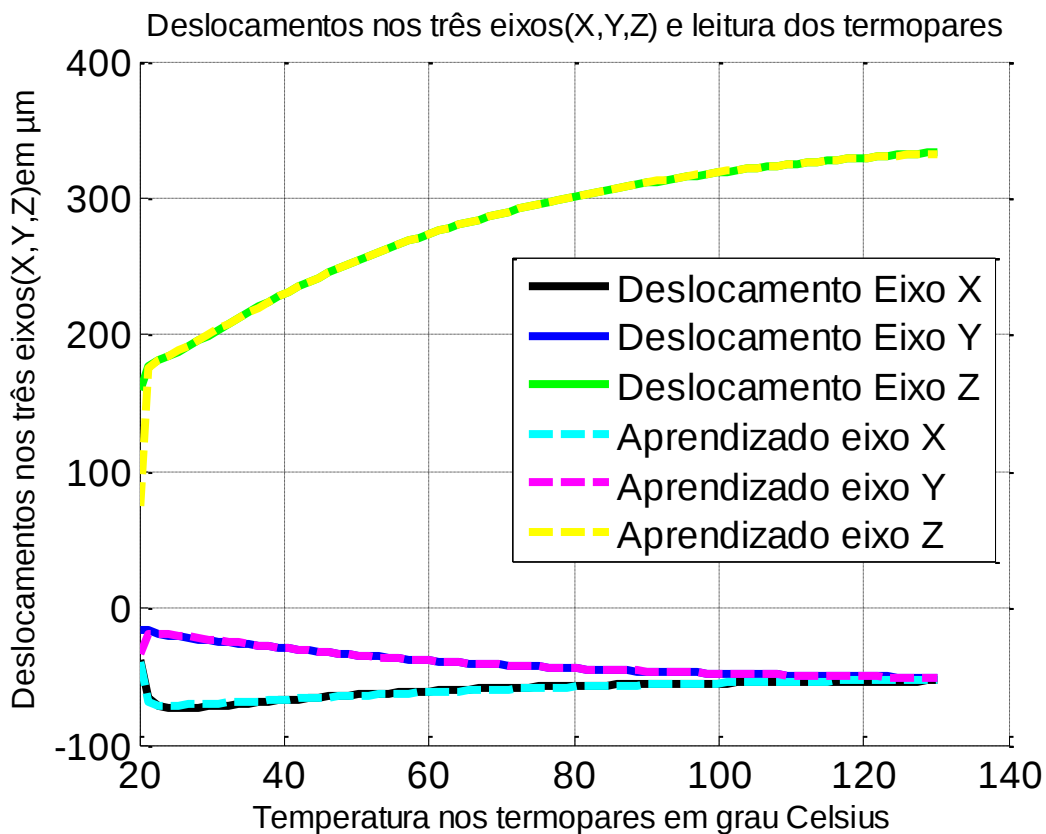


Figura 5.16- Deformação volumétrica em função da temperatura-Estado permanente.

Para as 500 iterações citadas a curva da performance, extraída no ambiente do MatLab é mostrada na figura 5.17, a qual observa-se que a rede conseguiu aprender, e que o erro quadrático médio para os três eixos chegou a $0,01\mu\text{m}$ em relação aos resultado das simulações, para o caso do estado permanente de temperatura.

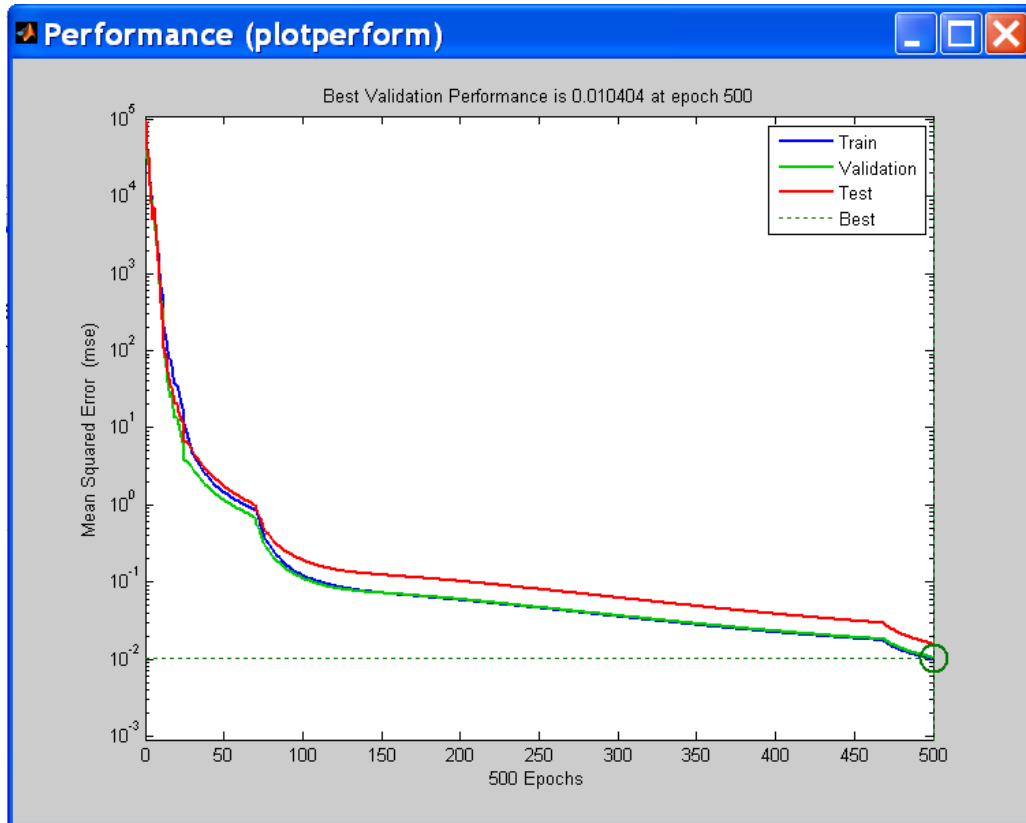


Figura 5.17: Gráfico da performance da RNA do aprendizado

Após passar pelo processo de aprendizado da rede, é importante que submeta a rede a outro processo chamado validação. O processo de validação de uma RNA, consiste em fornecer a rede, depois de treinada, valores diferentes dos dados de entrada os quais ela foi treinada, para verificar se realmente a rede conseguiu aprender satisfatoriamente e se é possível prever as deformações fornecendo apenas com os valores de temperaturas medidas pelos termopares.

Para o processo de validação no estado permanente de temperatura. Para os três eixos, procedeu-se da seguinte forma:

- Executou-se novamente as simulações, sendo em o intervalo de tempo para cada leitura de 180s. Das 162 novas leituras de temperaturas dos termopares, desconsiderando as que coincidiam com a análise anterior.

- Em seguida com as novas leituras de temperatura dos oitos termopares, alimentou-se a rede apenas com as novas leituras, sem precisar que a rede fosse treinada novamente.

Depois de realizado os procedimentos acima se obtiveram as curvas de validação conforme mostrado na figura 5.18. Assim, a RNA, fez a previsão dos deslocamentos térmicos em cada eixo simultaneamente, mesmo entrando com valores diferentes (de temperatura) daquelas que ela foi treinada. Conseguindo alcançar o objetivo da validação e desta seção para o estado permanente de temperatura

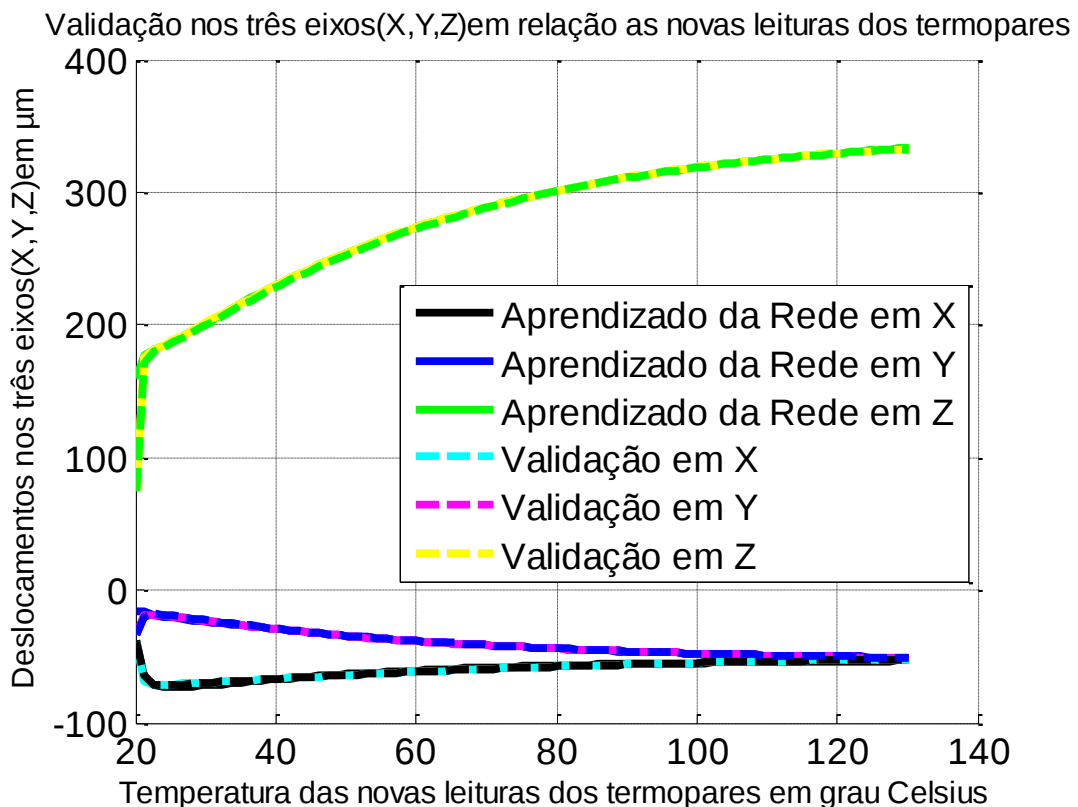


Figura 5.18- Validação da RNA para os três eixos, fontes de calor constantes.

5.2.2 Análise dos resultados para Fontes de calor constantes com correções

Utilizando a curva que a RNA aprendeu do comportamento térmico do eixo X para prever as deformações térmicas neste eixo da máquina-ferramenta analisada, e fazer as possíveis correções. Encontra-se a curva da deformação corrigida ou compensada na figura

5.19. Onde se pode observar que com a correção da coordenada do eixo X, através da técnica proposta praticamente zero o erro térmico neste eixo.

Utilizando a mesma técnica para o eixo Y, consegue-se o resultado obtido na figura 5.20. Idem para o eixo Z figura 5.21.

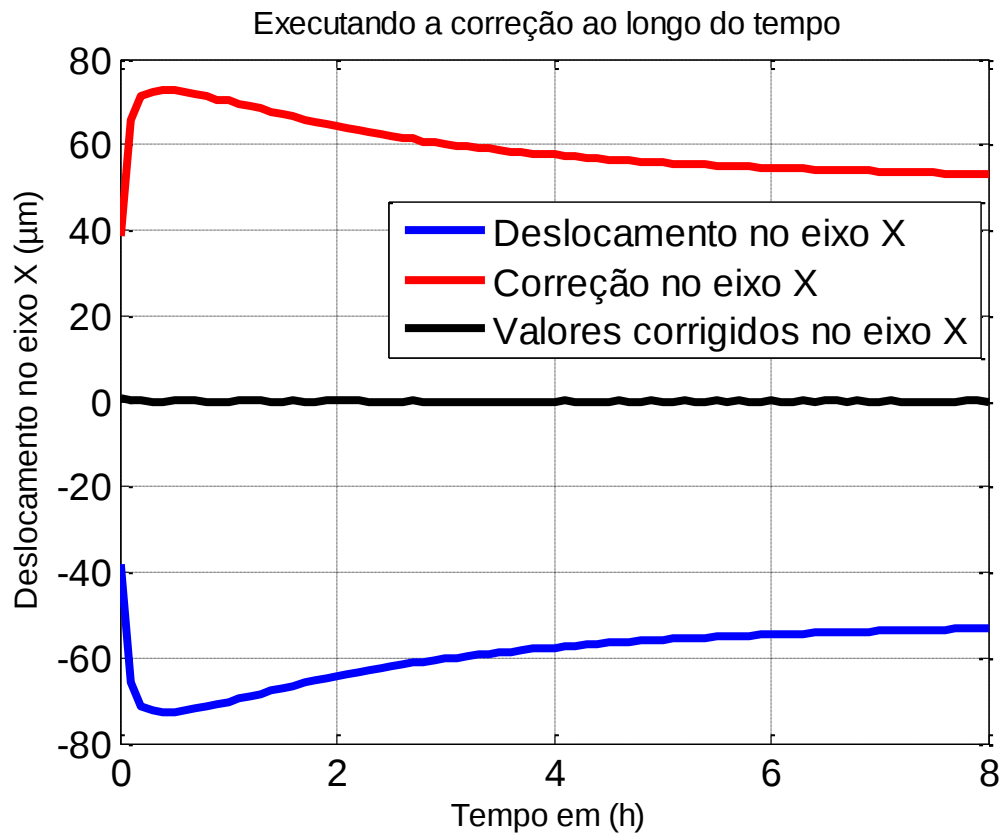


Figura 5.19- Correções no eixo X ao longo do tempo

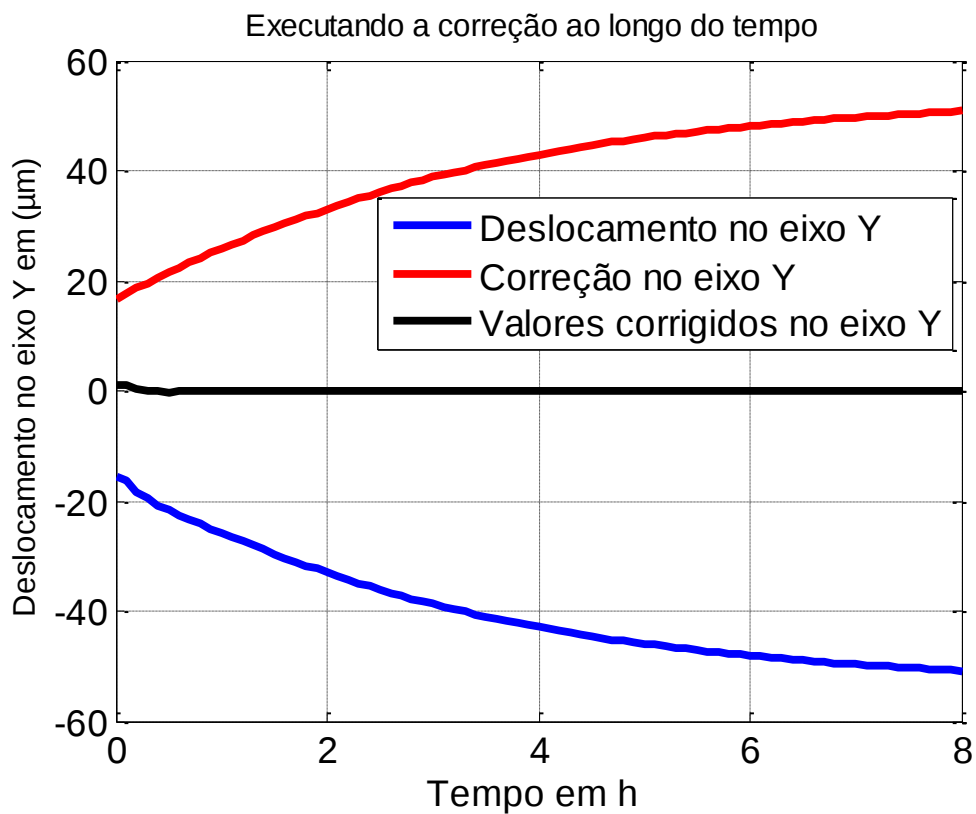


Figura 5.20- Correções no eixo Y ao longo do tempo

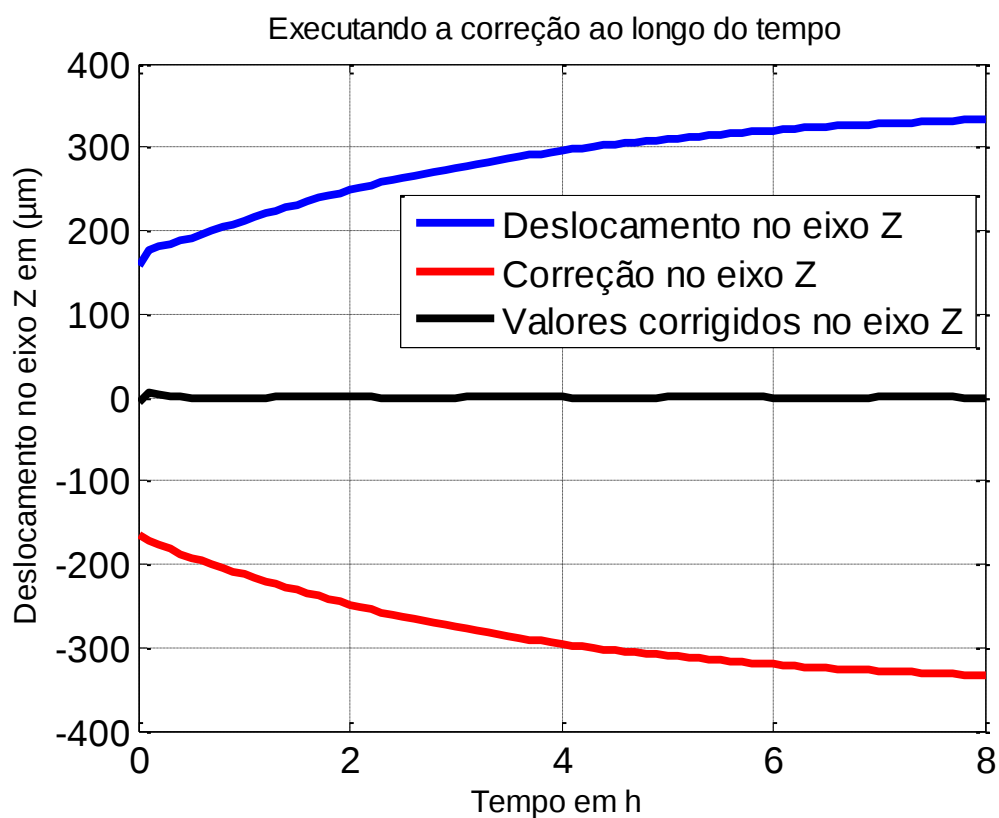


Figura 5.21- Correções no eixo Z ao longo do tempo

5.3-APRENDIZADO DA RNA PARA OS TRÊS EIXOS SIMULTANEAMENTE NO O ESTADO TRASIENTE DE TEMPERATURA.

Para o aprendizado das deformações volumétricas, ou seja, das deformações térmicas ocorridas simultaneamente em cada eixo, considerando a mesma máquina-fermenta e as fontes de calor variantes no tempo (caso transiente). Formulou-se uma RNA de 16 neurônios na primeira camada e 1 neurônios na segunda camada, com backpropagation, com as funções de ativação tansig e purelin respectivamente, aprendizado supervisionado por correção de erros, modo padrão, usando as equações 5.1 e 5.2, ou seja a mesma a topologia da seção anterior para três eixos conforme a figura 5.22. Outras topologias foram usadas na fase de testes, mas a que apresentou melhores resultados foi a mostrada neste trabalho, mediante as condições preestabelecidas.

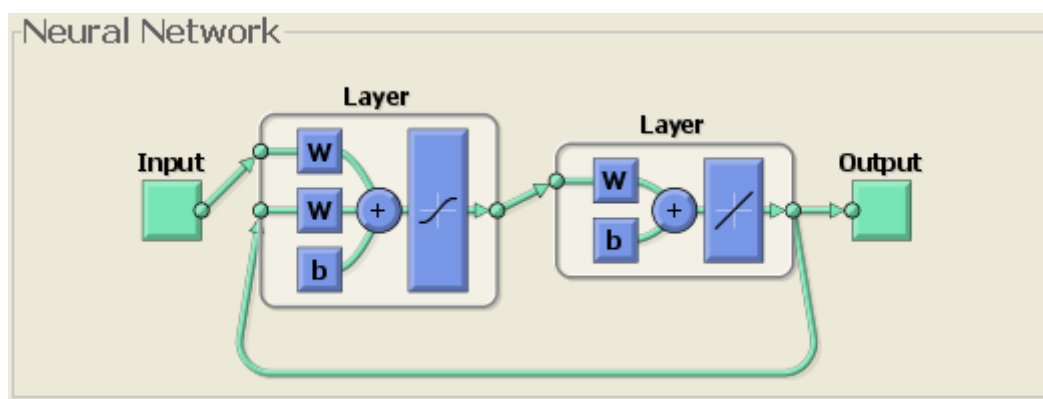


Figura 5.22- RNA para os três eixos-Estado transiente

Na entrada “input” novamente foi introduzido as matrizes de temperatura de cada termopar, equação 5.5, agora para o caso transiente, ao longo do tempo considerado e como “alvo” a matriz dos deslocamento térmicos dos eixos X, Y e Z, na equação 5.6, para o caso transiente. Semelhantemente ao caso anterior, porém tendo como saída desejada os deslocamentos térmicos ocorridos simultaneamente em cada eixo, para o estado transiente de temperatura.

Nas figuras de 5.23, 5.24 e 5.25, tem-se o aprendizado da Rede Neural Artificial para, 57, 109 e 170 iterações, conforme é mostrado nos gráficos a seguir:

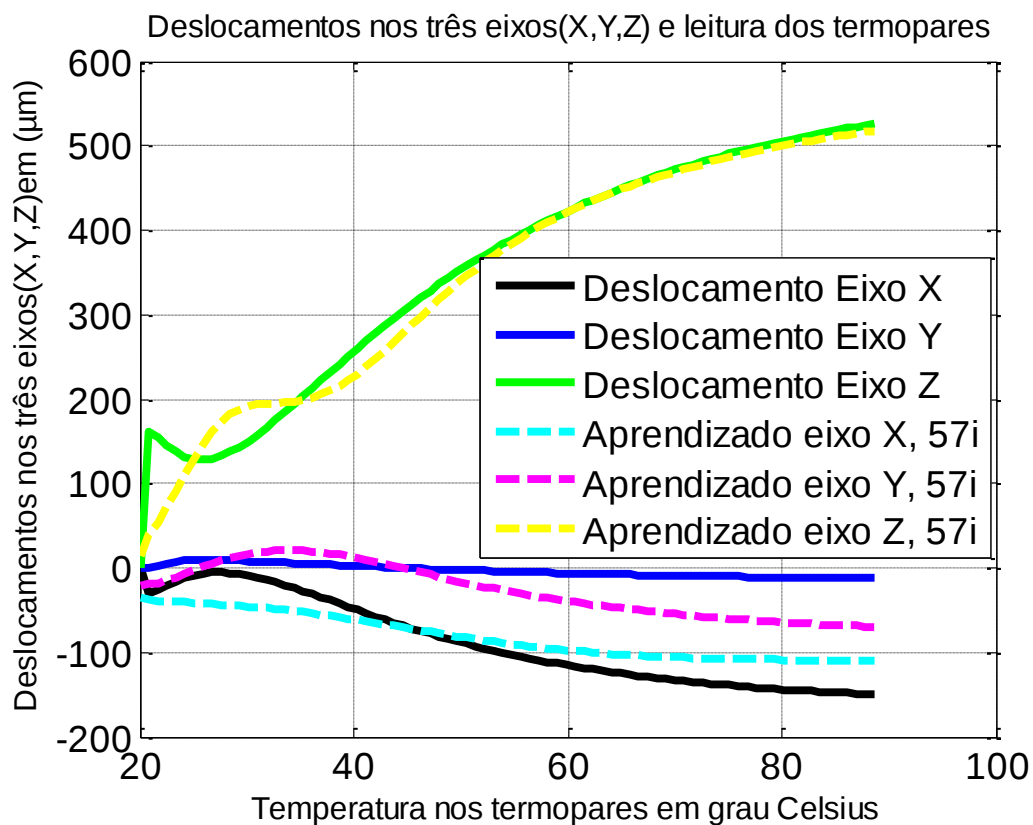


Figura 5.23- Aprendizado da rede neural artificial para 57 iterações.

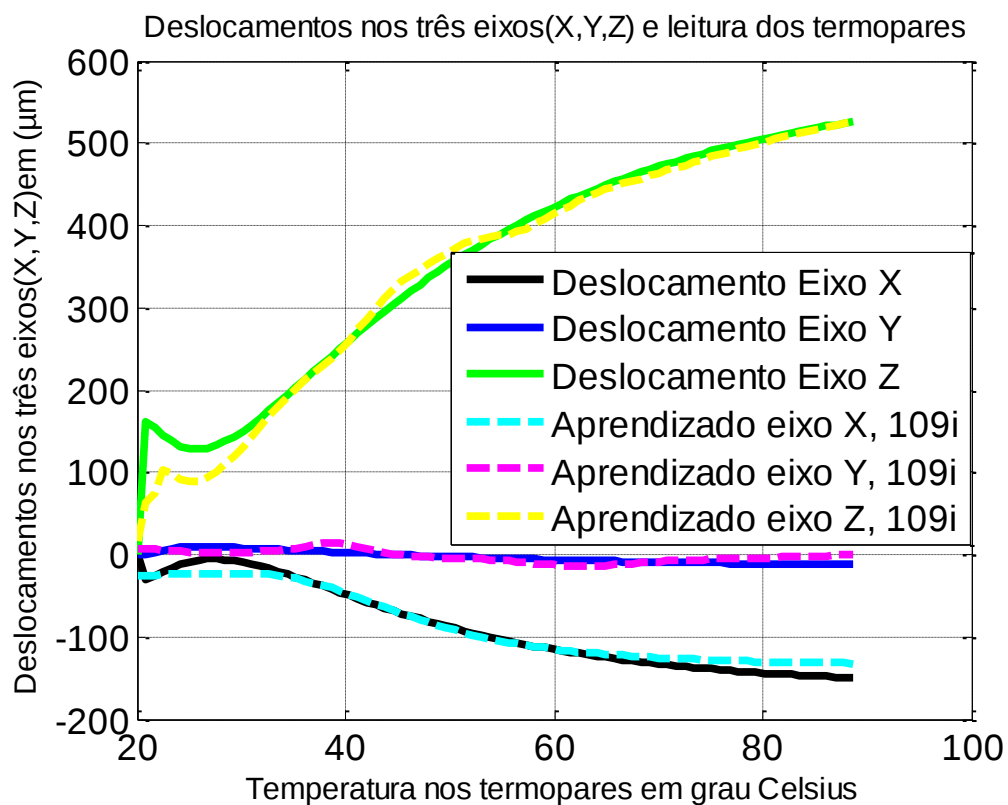


Figura 5.24- Aprendizado da rede neural artificial para 109 iterações.

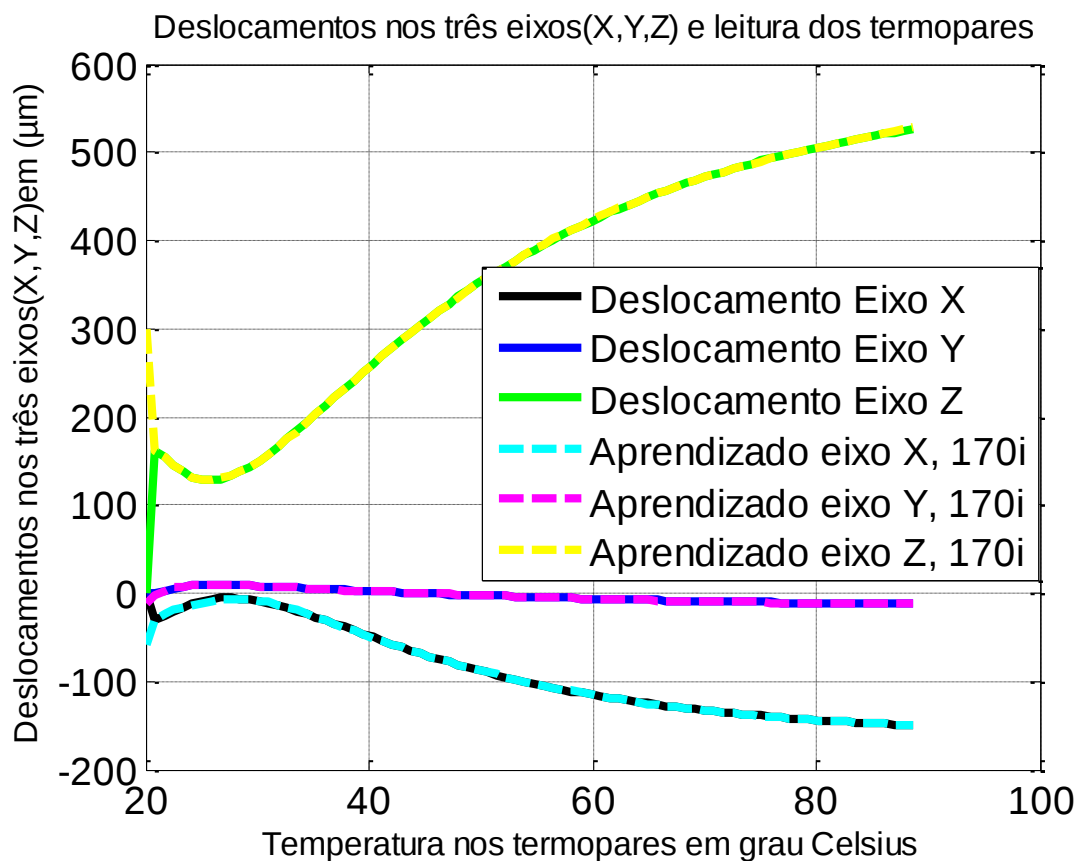


Figura 5.25- Aprendizado da rede neural artificial para 170 iterações

Pode-se verificar através dos gráficos, que a rede aprendeu satisfatoriamente o comportamento térmico volumétrico da máquina através da convergência das curvas, ou seja, os deslocamentos térmicos em cada eixo simultaneamente. Mas ainda não é o bastante, a rede terá que desenvolver um processo de previsão dos erros térmicos apenas com a entrada da leitura dos termopares, o que será visto na próxima seção no processo de validação da RNA para o caso transiente de temperatura.

Na tabela 5.2, tem-se um exemplo do aprendizado da RNA, para os 20 pontos iniciais de treinamento da rede, tendo como entrada as temperaturas dos termopares e como um dos “alvos” o deslocamentos térmicos no eixo Z com os respectivos erros de um em relação ao outro, coletados após 239 iterações. O número de iterações pode variar bastante de acordo com a convergência do aprendizado da RNA, do grau de complexidade das curvas e com o erro mínimo preestabelecido. Na tabela, verifica mais uma vez o quanto a rede aprendeu ou convergiu através da redução do erro. É possível observar claramente esta afirmação, além dos gráficos já mostrados nesta seção.

Tabela 5.2		Amostra de aprendizado da RNA para o eixo Z - Estado transiente								
Temperatura dos termopares em (C)-Entrada da RNA								Deslocamento eixo Z em (µm)	Aprendizado da RNA (µm)	Erro (µm)
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8			
20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	0,00	239,72	-239,72
21,9	20,2	25,5	20,8	22,9	20,4	20,4	20,2	161,40	161,06	0,34
22,4	20,4	28,5	22,1	26,3	21,0	20,6	21,0	154,10	155,84	-1,74
22,8	20,8	34,0	25,7	33,0	22,5	21,5	22,4	144,80	149,09	-4,29
23,1	21,4	38,8	29,6	39,1	24,2	22,5	23,9	137,20	139,81	-2,61
23,5	22,1	43,1	33,4	44,6	25,9	23,5	25,4	131,80	132,53	-0,73
23,9	22,8	46,8	37,1	49,4	27,5	24,5	26,9	128,80	128,57	0,23
24,3	23,7	50,0	40,5	53,7	29,1	25,5	28,3	128,10	127,81	0,29
24,8	24,6	52,9	43,7	57,4	30,6	26,5	29,7	129,50	129,45	0,05
25,3	25,5	55,3	46,6	60,7	32,1	27,6	31,0	132,70	132,68	0,02
25,9	26,4	57,4	49,3	63,6	33,4	28,6	32,3	137,30	137,34	-0,04
26,4	27,3	59,3	51,7	66,2	34,7	29,6	33,5	143,10	142,86	0,24
26,9	28,2	60,8	53,9	68,4	36,0	30,6	34,6	150,00	149,90	0,10
27,5	29,1	62,2	56,0	70,4	37,2	31,6	35,7	157,70	156,97	0,73
28,0	30,0	63,4	57,8	72,2	38,3	32,6	36,7	166,00	165,21	0,79
28,5	30,9	64,5	59,5	73,7	39,4	33,6	37,7	174,70	174,15	0,55
29,0	31,8	65,4	61,1	75,1	40,4	34,5	38,7	183,90	183,36	0,54
29,6	32,7	66,2	62,5	76,3	41,3	35,5	39,6	193,20	193,53	-0,33
30,1	33,5	66,9	63,8	77,4	42,3	36,5	40,5	202,80	203,44	-0,64
30,6	34,3	67,5	65,0	78,4	43,2	37,4	41,3	212,40	213,28	-0,88

5.3.1 Validação da RNA para os três eixos no caso transiente

Neste processo de validação da RNA para o caso transiente, o procedimento foi o mesmo da seção anterior, ou seja, consistem em fornecer a rede, depois de treinada, valores diferentes dos dados de entrada com os quais ela foi treinada, para verificar se realmente a rede conseguiu aprender o comportamento térmico satisfatoriamente.

Para o processo de validação destas simulações procedeu-se da seguinte forma:

- Executou-se novamente as simulações, sendo em um intervalo de tempo para cada leitura de 180s, das 162 novas leituras de temperaturas dos termopares, desconsiderando as que coincidiam com a análise anterior.
- Em seguida com as novas leituras de temperatura dos oitos termopares, alimentou-se a rede apenas com as novas leituras, sem precisar que a rede fosse treinada novamente, ou seja, sem precisar de um “Alvo” ou da matriz de deformação dos eixos. Obteve-se as curvas de validação conforme mostrado na figura 5.26. Ou seja, a RNA, fez a previsão das deformações, mesmo entrando com valores diferentes (de temperatura) daquelas que ela foi treinada.

Observa-se que existe pouca discrepância entre as curvas de validação e o deslocamento simulado para cada eixo. Apenas no início das curvas, onde a rede começa o processo de aprendizado e também, o gradiente de temperatura é maior neste instante inicial, devido as diferenças de temperaturas ser maior em pontos distintos da máquina. Logo, existindo uma maior diferença entre as curvas ou valores, devido a justificativa já explicada. Sendo assim, o processo de validação foi satisfatório.

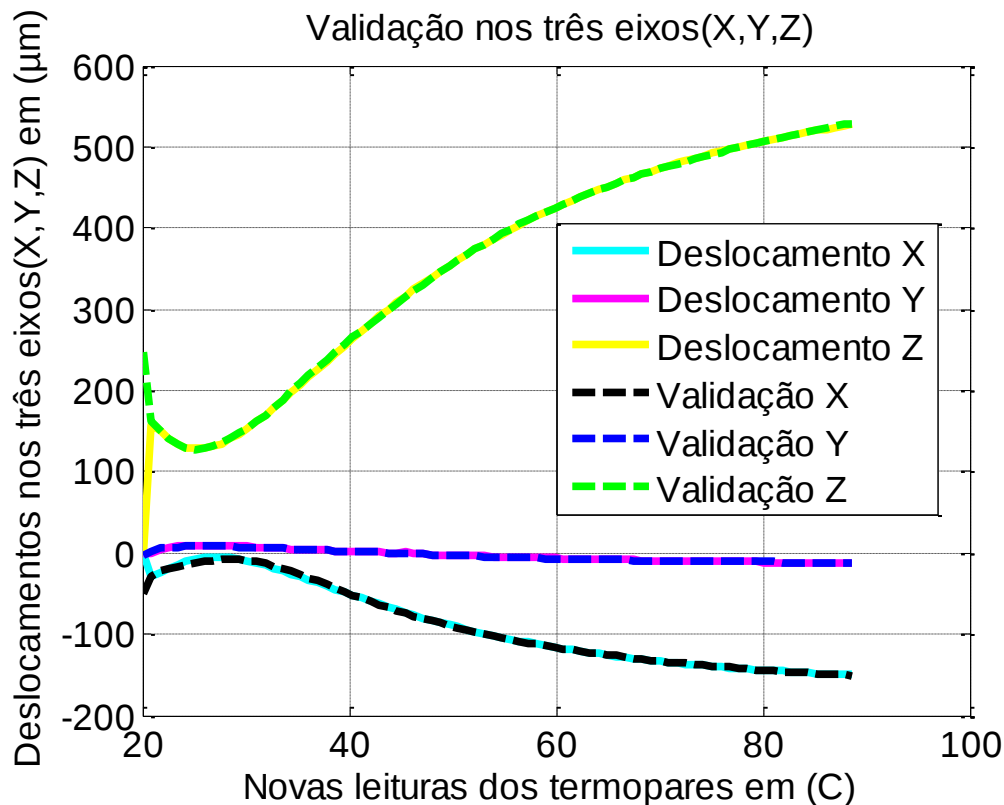


Figura 5.26- Validação da RNA- Caso transiente

5.3.2 Correções para o caso transiente

Utilizando a curva que a RNA aprendeu do comportamento térmico no eixo X, para prever as deformações térmicas neste eixo da máquina-ferramenta analisada, e fazer as possíveis correções para o caso das fontes de calor com as temperaturas variáveis. Encontra-se a curva da deformação corrigida deste eixo X na figura 5.27. Onde se pode observar que com a correção da coordenada do eixo X, através da técnica proposta praticamente zera o erro térmico neste eixo, imediatamente quando a máquina começa o processo de aquecimento.

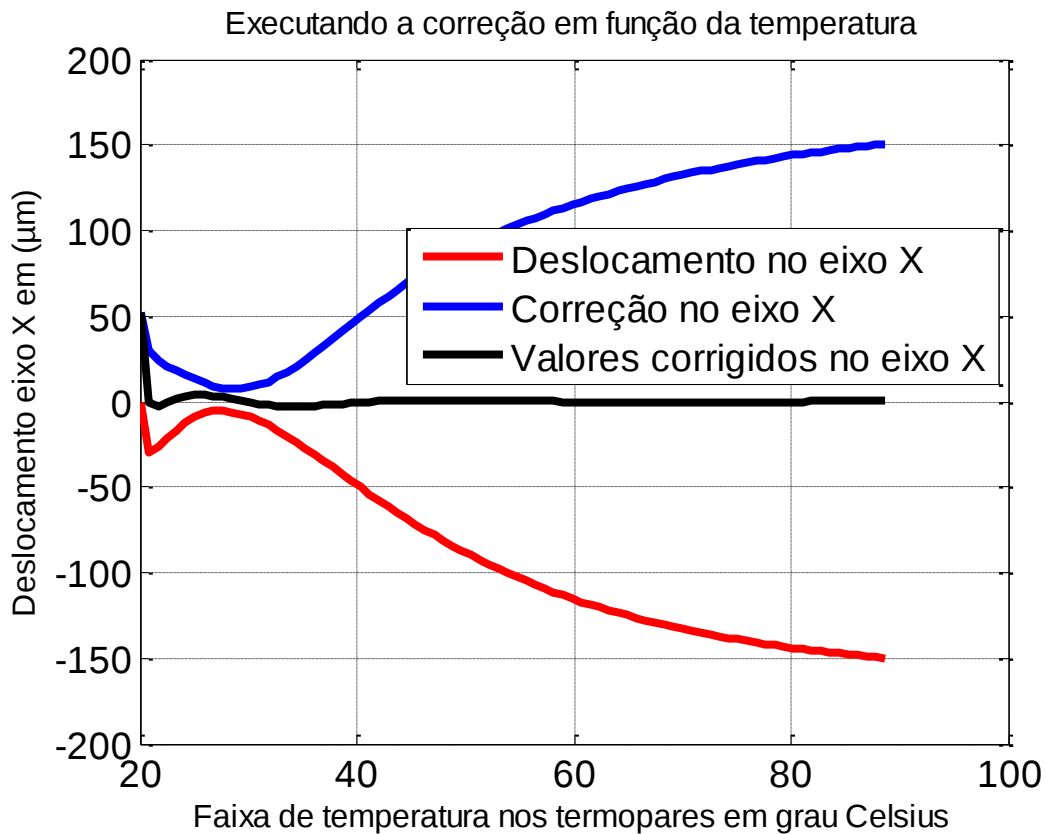


Figura 5.27-Correção do eixo X, caso transiente.

O mesmo procedimento para as correções ou compensações dos eixos Y e Z podem ser vistos nos gráficos das figuras 5.28 e 5.29 respectivamente.

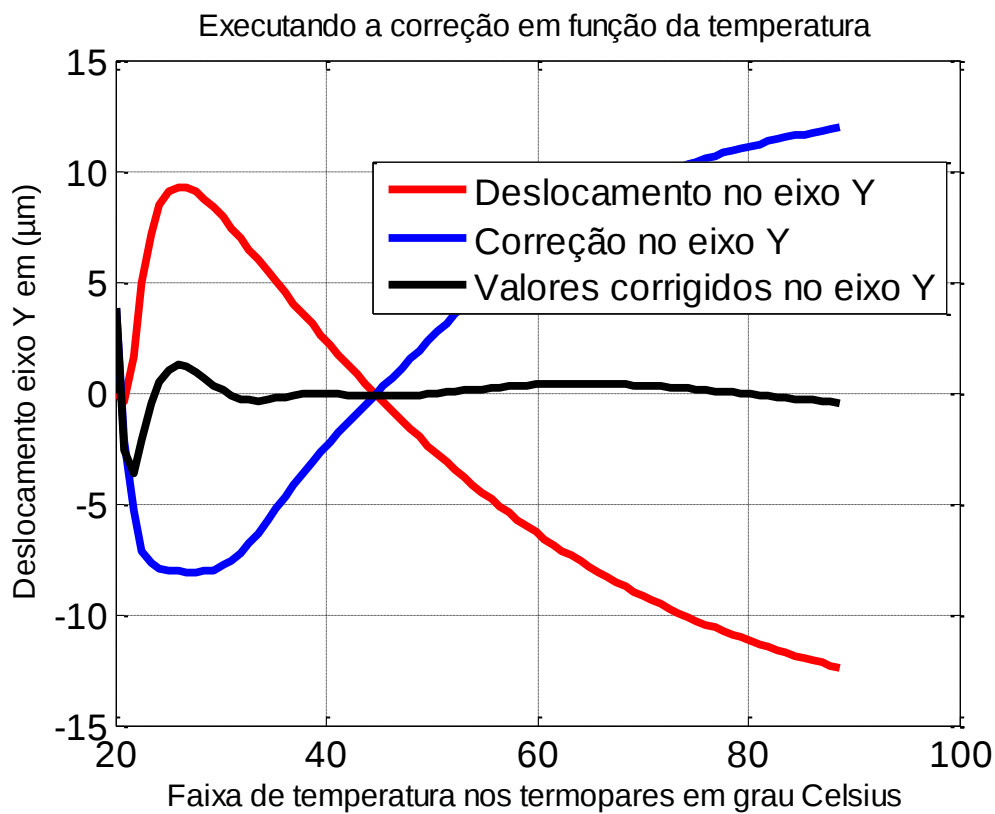


Figura 5.28- Correção do eixo Y, caso transiente.

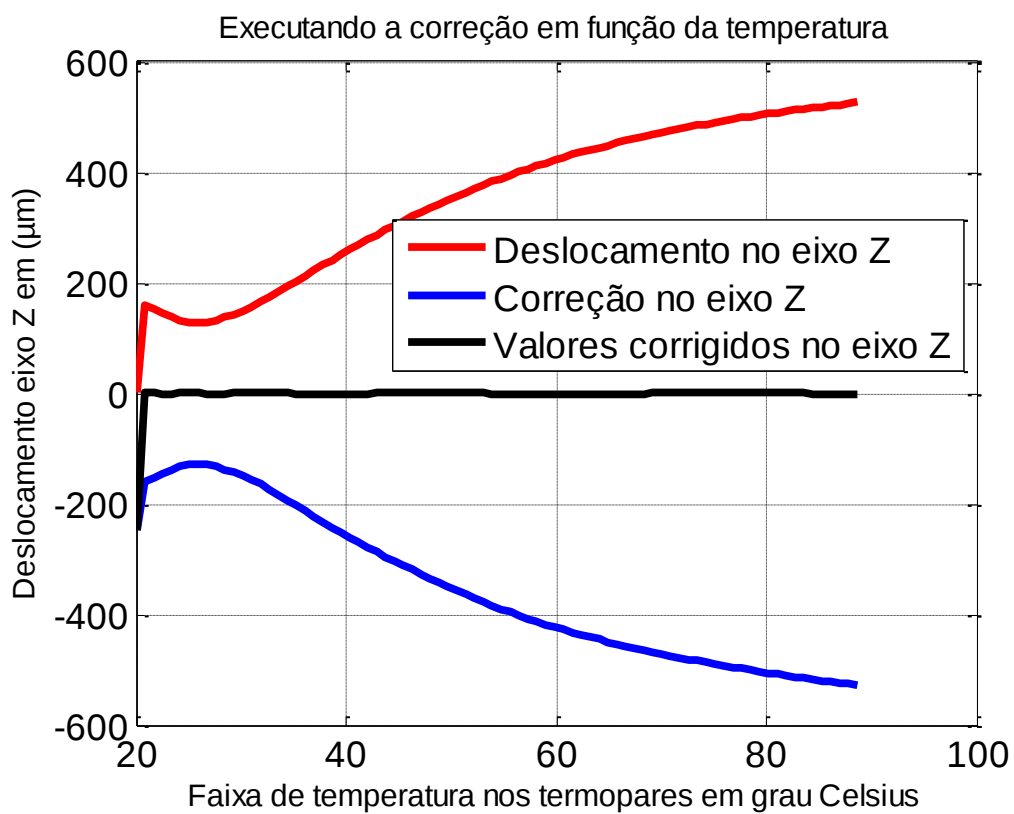


Figura 5.29- Correção do eixo Z, caso transiente.

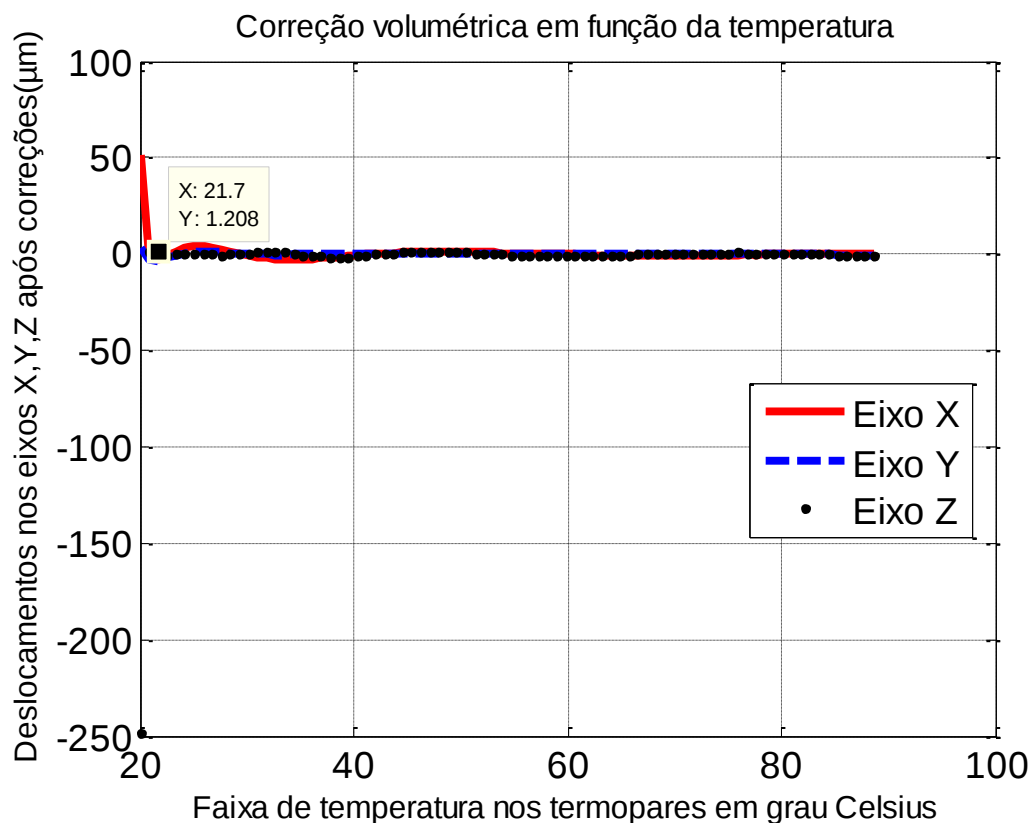


Figura 5.30- Correção volumétrica para os eixos

Após realizadas as correções nos eixos X, Y e Z o erro volumétrico tornar-se, conforme mostrado na figura 5.30, praticamente constante, após 21,7°C, e bem menos significativo que na situação sem correção. Exercendo as correções nos respectivos eixos, o erro volumétrico tornar-se, conforme mostrado na fig. 5.30, em termos percentuais, considerando como exemplo o último incremento de tempo, onde os deslocamentos térmicos eram de 150,75 μm e passou para 0,65 μm (Redução de 99,57% no eixo X), de 11,83 μm para 0,56 μm (Redução de 95,1% no eixo Y) e de 528,38 μm para 1,98 μm (Redução de 99,62% no eixo Z), ou seja, o trabalho conjunto do MEF, RNA e a metodologia desenvolvida neste trabalho de tese, proporcionam resultados significativos em se tratando da correção dos erros térmicos em máquinas-ferramenta, mesmo que de forma simulada, mas que a metodologia pode ser usada em casos reais de compensação dos erros térmicos, até mesmo no caso mais crítico, que é o caso transiente.

5.4 SÍNTESE DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA.

A metodologia desenvolvida, além de poder ser aplicada semelhantemente ao sistema ballbar de medição de forma virtual e determinação da margem de erros em máquinas-ferramenta na fase de projeto. Teve como foco principal a análise dos deslocamentos térmicos na extremidade de uma ferramenta em uma máquina-ferramenta de três eixos, para facilitar as possíveis correções ou compensações de forma a contribuir para o aumento de exatidão neste tipo de máquina. Baseado neste foco, a metodologia pode ser descrita resumidamente da seguinte forma:

De posse do desenho da máquina, estabelecer os critérios para a criação da malha em elementos finitos, criando uma malha compatível tanto com a solução estrutural quanto a térmica, em seguida proceder com os seguintes passos:

a) Criar um arquivo de mapeamento (arquivo “.bun” no ambiente do NX) o qual contém inicialmente os valores de temperaturas para as condições de contornos especificadas no estado permanente de temperatura durante um período de 8 horas.

b) Exportar as condições de contornos térmicas para a solução estrutural e em seguida, simular os deslocamentos ocorridos na ponta da ferramenta para os eixos de análises. Sendo repetida esta operação 80 vezes para o intervalo de tempo preestabelecido de 8h ou 28800s, usando um incremento de tempo entre cada simulação de 360s mais o estado inicial no instante zero, até completar o ciclo de trabalho.

c) Coletar as soluções para cada incremento de tempo considerado, e plotar os dados relativos a tempo x deslocamento, assim como temperatura x deslocamento no ambiente do MatLab.

d) Criar uma RNA, por meio de funções no ambiente do MatLab, tendo como entradas os valores de temperaturas de cada nó que simbolizam os termopares na máquina-ferramenta e como “alvo” ou valor desejado os deslocamentos relativos para cada eixo.

e) Treinar a RNA, por meios de programas desenvolvidos no MatLab, através das funções existentes neste software.

f) Executar o processo de validação da RNA para verificar se realmente conseguiu aprender e prever os deslocamentos térmicos apenas fazendo uso das leituras de temperaturas nos nós especificados.

g) Desenvolver esta metodologia para dois casos distintos, ou seja, para um estado permanente de temperatura e o estado transiente de temperatura.

h) Simular as compensações em cada eixo, por meios de programas no MatLab, nos dois estados analisados para verificar a eficiência da técnica desenvolvida.

5.5-CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Observou-se que quando as fontes de calor aumentam as suas respectivas temperaturas, o comportamento térmico da máquina se diferencia muito daquele que foi usado com temperatura constante do início ao fim das simulações, mas que se aproxima mais da realidade de um processo de usinagem sendo, portanto mais confiável e que pode mostrar erros térmicos condizente com a realidade do projeto da máquina- ferramenta. Verificou-se também, que as deformações térmicas no eixo X são maiores no modo permanente de temperatura, devido não apenas pelo acréscimo da ferramenta e sim pelo fato das diferenças dos gradientes de temperatura se prolongar por mais tempo, através da estrutura da máquina.

O fato de haver erros térmicos mais irregulares nos primeiros 30 min comprova nas duas condições térmicas de contornos estudadas, o que é dito na literatura especializada, ou seja, a máquina-ferramenta estudada está coerente com um modelo real, considerando apenas as condições estudadas.

Os termopares virtuais, ou seja, os nós que simbolizam termopares reais localizados em pontos estratégicos, diferem seus valores das curvas provenientes da solução da equação de Newton, devido o fato de estarem a uma certa distância de cada fonte de calor, da difusividade, da inércia térmica e da resistência térmica entre o contato da fonte de calor com a estrutura da máquina. Mas tudo isso está condizente com a realidade de se instalar um termopar em qualquer ponto da estrutura real de uma máquina, até por que existe alguns pontos que é muito difícil de instalar um termopar próximo a fonte de calor desejada, a exemplo a ponta da ferramenta.

Os dados coletados das deformações térmicas no modelo de máquina-ferramenta analisado, pode ser também coletado em qualquer modelo de máquina-ferramenta, desde que se aplique a mesma metodologia ou que já possua o desenho da máquina usando a tecnologia CAD e exporte para um software que trabalhe com o MEF. Com isso aplicar alguma técnica de controle ou correção de erros térmicos em cada eixo, prevendo as possíveis deformações que irão ocorrer durante cada processo de usinagem.

Observa-se que em ambos os casos, das fontes de calor sendo variável ou não a rede tem dificuldade de aprendizado no início das deformações. O que pode-se otimizar isto refinando a rede e aumentando o número de dados no início das deformações, ou seja aumentando o número de pontos coletados entre 0 e 360s.

Observa-se também, que embora as fontes de calor variantes no tempo, ou seja, o aumento de temperatura seja mais suave, possui deformações mais consideráveis principalmente nos eixos Y e Z em relação as fontes de calor constantes. Devido o fato do gradiente de temperatura ser maior e devido a estabilidade térmica ser mais lenta.

As diferenças entre as curvas de temperatura provenientes das equações de aquecimento e resfriamento de Newton ocorrem devido não conseguir também na prática, colocar os termopares exatamente onde está passando o fluxo de calor para máquina e de uma condutividade térmica ideal entre a fonte de calor e o ponto onde supostamente será instalado o termopar. Sendo possível apenas colocar nas proximidades, e por menor que seja esta aproximação surgirá sempre uma discrepância.

Em relação as redes neurais, a temperatura, as coordenadas de cada ponto analisado e os deslocamentos térmicos correspondentes a cada eixo da MF, proveniente da expansão térmica são os dados de entrada e saída da rede neural artificial respectivamente. Que através destes dados, a rede na topologia sugerida, “aprendeu” significativamente as deformações em cada eixo simultaneamente sendo capaz de prever as deformações apenas com a entrada da matriz de temperatura, conforme foi verificado na seção de validação da RNA.

Constata-se principalmente neste capítulo que o objetivo de desenvolver e implementar uma sistemática para determinação e análise dos deslocamentos térmicos de máquinas-ferramenta, usando o método dos elementos finitos (MEF) e Redes Neurais Artificiais (RNA) foi alcançado, mediante a comprovação, através das simulações e correções nos três eixos simultaneamente, tanto no estado permanente como no estado transiente de temperatura ratificadas nos gráficos de aprendizado e validação das RNAs desenvolvidas.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES FINAIS

Este trabalho de tese teve como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia baseada no método dos elementos finitos e das redes neurais artificiais, para determinação e análise dos deslocamentos térmicos de máquinas-ferramenta. De forma a contribuir para a exatidão de peças fabricadas por este processo de usinagem, como também otimizar projetos de máquinas-ferramenta, fazendo uso da tecnologia CAE/CAD, com ênfase nos deslocamentos térmicos.

Além da metodologia desenvolvida, neste trabalho de tese, é destacada as principais conclusões, que podem ser enumeradas como segue:

1. A principal contribuição deste trabalho consiste na possibilidade de ainda na fase de projeto das máquinas-ferramenta, ser possível analisar o desempenho destas máquinas no contexto dos deslocamentos térmicos, através do método dos elementos finitos e das redes neurais artificiais.
2. Uma vez treinada uma rede neural artificial, através da correlação entre as temperaturas em pontos específicos da máquina e os deslocamentos térmicos da ponta da ferramenta, é possível obter o mapa dos erros volumétricos e consequentemente a compensação destes erros por meio do sistema de controle da máquina.

3. Com a metodologia proposta não é preciso o desenvolvimento de cálculos complexos, como MTHs, cinemática dos corpos rígidos, método das diferenças finitas entre outros, em relação aos deslocamentos térmicos na máquina-ferramenta, pois a RNA é capaz de aprender tanto fenômenos lineares quanto não lineares.
4. A metodologia empregada neste trabalho tanto pode ser usada em máquinas-ferramenta na fase de projeto, como em máquinas já em uso, que possam ser instalados algum dispositivo (sensor de deslocamento, sensor capacitivo ou o sistema Ballbar de medição) que faça a leitura dos deslocamentos térmicos e a leitura de temperatura (através de sensores de temperatura) de alguns pontos estratégicos, sendo os dados enviados para uma RNA e da RNA o sinal de correção para o controlador CNC da máquina.
5. Verifica-se que é preciso um estudo mais refinado nos primeiros 6 minutos de utilização da máquina (ou simulações) para a RNA aprender mais rapidamente, principalmente no caso transiente e assim aumentar a exatidão também nesta região crítica do processo de usinagem.
6. A metodologia empregada contribuirá para atender as tolerâncias dimensionais e geométricas das peças usinadas em máquinas-ferramenta;
7. Além de contribuir para atender as tolerâncias dimensionais servirá para aperfeiçoar projetos de máquinas-ferramenta, fazendo uso da tecnologia CAE/CAD, com ênfase nos deslocamentos térmicos.
8. A contribuição também pode ser dada para se verificar a margem de erro de uma máquina-ferramenta ou uma máquina de medição por coordenada, no uso das deformações térmicas, através do MEF e em programas desenvolvidos no ambiente do MatLab.
9. Observa-se que o erro em relação a distância de um ponto próximo ao centro do círculo base ou em relação aos nós pertencentes a circunferência é menor que o erro das coordenadas da ponta da ferramenta na análise transiente.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Aplicar a técnica proposta para máquinas-ferramenta com um maior número de eixos.

2. Usar parâmetros dinâmicos para o treinamento das redes neurais artificiais em casos específicos de usinagem.
3. Refinar tanto a RNA como a malha da máquina no MEF para estabelecer um nível maior de exatidão.
4. Aplicar a metodologia experimentalmente em uma máquina-ferramenta específica.
5. Desenvolver uma comunicação entre a RNA com um controlador de uma máquina CNC.
6. Estender a metodologia desenvolvida neste trabalho de tese para diminuir os efeitos térmicos em outros dispositivos eletromecânicos.
7. Usar a metodologia, também, para inovar o sistema de arrefecimento de máquinas-ferramenta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN J.P., POSTLETHWAITE S.R, FORD D.G, 1997, “*Practical application of thermal error correction, 4 case studies*”, *Proc.3rd Int. Conf. on Laser Metrology and Machine Performance* — LAMDAMAP, pp. 359–369.

ATTIA M.H., KOPS L., 1981, “*A new method for determining the thermal contact resistance at machine tool joints*”, *Annals of the CIRP*, v.30, n.1, pp. 259–264.

ATTIA M.H., KOPS L., 1979, “*Computer simulation of nonlinear thermoelastic behaviour of a joint in machine tool structure and its effect on thermal deformation*”, *ASME Trans. Journal of Engineering for Industry*, n.101, pp. 355–361.

ATTIA M.H., KOPS L., 1980, “*Importance of contact pressure distribution on heat transfer in structural joints of machines*”, *ASME Trans. Journal of Engineering for Industry*, n.102, pp. 159–167.

ATTIA M.H., KOPS L., 1979, “*Nonlinear thermoelastic behaviour of structural joints- Solution to a missing link for prediction of thermal deformation of machine tools*”, *ASME Trans. Journal of Engineering for Industry*, n.101, pp.348–354.

ATTIA M.H., KOPS L., 1981, “*System approach to the thermal behaviour and deformation of machine tool structures in response to the effect of fixed joints*”, *ASME Trans. Journal of Engineering for Industry*, n.103, pp. 67–72.

ATTIA M.H., KOPS L., 1993, “*Thermometric design considerations for temperature monitoring in machine tools and CMM structures*”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, n.8, pp. 311–319.

BRAGA, A. P. CARVALHO, A. C. P. L. F., LUDERMIR, T.B., 2000, “Redes Neurais Artificiais: Teoria e aplicações”, Editora LTC, Rio de Janeiro.

BALSAMO A., MARQUES D., SARTORI S., 1990, “A method for thermal deformation corrections of CMMs”, In: *Annals of the CIRP*, v.39,n.1 pp.557–560.

BRYAN J., 1990, “*International status of thermal error research*”, In. *Annals of the CIRP*, v.39, n.2, pp 645–656.

CAVALCANTE., J.H.F.,2004. “*Redes Neurais Artificiais*”, Universidade Federal da Paraíba, Abril.

C.H. LO, 1994, “*Real-time error compensation on machine tools through optimal thermal error modeling*”, PhD dissertation, University of Michigan,

C.H. Lo, J. Yuan, J. Ni,1995, “ An application of real-time error compensation on a turning centre”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 35 (12) (1995) 1669–1682.

CHEN J. S., 1996, “*A study of thermally induced machine tool errors in real cutting conditions*”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.36, n.12, 1401–1411.

CHEN J. S., 1995,“*Computer-aided accuracy enhancement for multi-axis CNC machine tool*”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.35, n.4, pp.593–605.

CHEN J. S., 1997,“*Fast calibration and modelling of thermally induced machine tool errors in real machining*”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture.*, v.37, n.2, pp. 159–169.

CHEN J.S., LING C.C., 1996, “*Improving the machine tool accuracy through machine tool metrology and error correction*”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, n.11, pp. 198–205.

CHEN J.S., YUAN J.X, NI J.,WU S.M., 1993, “*Real-time compensation for time-variant volumetric errors on a machining centre*”, *ASME Trans. Journal of Engineering for Industry* , n.115 pp. 472–479.

DÓRIA, M. A. T., 2005, “*Análise da influência da rigidez do sistema nos erros dimensionais e geométricos no processo de torneamento*”, Msc. dissertação, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP.

DAN AVRITZER.2009, “*Geometria analítica e álgebra linear: uma visão geométrica*”. Editora UFMG, Belo Horizonte

E. CREIGHTON, A. HONEGGER, A. TULSIAN, D. MUKHOPADHYA, 2010, “*Analysis of thermal errors in a high-speed micro-milling spindle*”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 50 -pp386–393

FERRARESI, D., 1985, “*Fundamentos da Usinagem dos Metais*”, Vol. 1, 5 .ed, Ed. Edgard Blücher.

FERREIRA P.M., 1987, “*Adaptive accuracy improvement of machine tools*”, *PhD dissertation, Purdue University*.

HOPFIELD J. J., 1982, “*Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computacional Abilities*”. Republicado por E. Sanchez-Sinencio e C. Lau, *Artificial Neural Networks*, IEEE Press, New York, 1992, pp.25-29.

HOLMAN J.P., 1976, “*Transferência de calor*”, edição (8^a), Aravaca Madri, McGraw Hill.

HEUI JAE PAHK,;I: YOUNG SAM KIMt and JOON HEE MOON'i".1997 “*A new technique for volumetric error assessment of cnc machine tools incorporating ball bar measurement and 3d volumetric error model*”. PERGAMON, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 37, No. 11, pp. 1583-1596.

HEBBS, DONALD O., 1950 , “*The Organization of Behavior*”, pp. 45 -46.

HAYKIN S., 2001. “*Redes Neurais artificiais: Princípios e Prática*”. Editora Bookman, 2^o edição, Porto Alegre

HUANG S.C., 1995, “*Analysis of a model to forecast thermal deformation of ball screw feed drive systems*”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.35, n.8, pp. 1099–1104.

INCROPERA, F. P., DEWITT D. P., *et al*, 2008, “*Fundamentos de transferência de calor e de massa*”, 6 .ed, Ed. LTC, Rio de Janeiro.

JEDRZEJEWSKI J., KACZMAREK J., KOWAL Z., WINIARSKI Z., 1990, “*Numerical optimisation of thermal behaviour of machine tools*”, In. *Annals of the CIRP* v.39, n.1, pp.379–382.

JEDRZEJEWSKI J., MODRZYCKI W., 1992, “*A new approach to modelling thermal behaviour of a machine tool under service conditions*”, *Annals of the CIRP* v.41, n.1, pp.455–458.

JEDRZEJEWSKI J, MODRZYCKI W.1997, “*Intelligent supervision of thermal deformations in high precision machine tools*”, *Proc. 32 Intl MATADOR Conf*, Manchester, UK, pp. 457–462.

JIRI VYROUBAL, 2012, “*Compensation of machine tool thermal deformation in spindle axis direction based on decomposition method*”, *ELSEVIER, Precision Engineering* 36 pp 121– 127.

JIE ZHU, 2008, “*Robust thermal error modeling and compensation for cnc machine tools*”, PhD em Engenharia Mecânica, Na Universidade de Michigan.

LIANG J.C., LI H.F., YUAN J.X., NI J., 1997, “*A comprehensive error compensation system for correcting geometric, thermal and cutting force induced errors*”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* n.13, pp.708–712.

LIMA, J. C. J., 2007, “*Aplicação de redes neurais artificiais para determinar parâmetros de geometrias substitutas em MMCs*”. Tese de Doutorado apresentada a Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB.

LI S., ZHANG Y., ZHANG G., 1997, “*A study of pre-compensation for thermal errors of NC machine tools*”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* v.37, n.12, pp.1715–1719.

KIM S.K, CHO D.W, 1997, “*Real-time estimation of temperature distribution in a ball-screw system*”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.37, n.4, pp. 451–464.

KIM H.S., JEONG K.S., LEE D.G, 1997, “*Design and manufacture of a three-axis ultra-precision CNC grinding machine*”, *ASME Trans. Journal of Materials Processing Technology*, v.71 pp.258–266.

KIM J.D., KIM D.S., 1997, “*Development and application of an ultra-precision lathe*”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, n.13, pp. 164–171.

KRULEWICH D.A., 1998, “*Temperature integration model and measurement point selection for thermally induced machine tool errors*”, *Mechtronics*, v.8, pp.395–412.

MANDARINO D., 2007. *Desenho Geométrico, construções com régua e compasso*. Ed. Plêiade, São Paulo: 2007.

MARTINELI E.,1999, “*Extração de conhecimentos de Redes Neurais Artificiais*”, Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Ciências Matemáticas e de computação da Universidade de São Paulo.

MOU J., 1997, “*A method of using neural networks and inverse kinematics for machine tool error estimation and correction*”, *ASME Trans. Journal of Manufacturing Science and Engineering* ,n.119, pp.247–254.

MOU J., DONMEZ M.A., CETINKUNT C., 1995, “*An adaptive error correction method using feature-based analysis techniques for machine performance improvement*”. Part 1: Theory derivation, ASME Trans. Journal of Engineering for Industry, n.117 pp. 584–590.

MOU J., DONMEZ M.A., CETINKUNT C., 1995, “*An adaptive error correction method using feature-based analysis techniques for machine performance improvement*”. Part 2: Experimental verification, ASME Trans. Journal of Engineering for Industry, n.117, pp.591–600.

NI J., 1987, “*Study on online identification and forecasting compensatory control of volumetric errors for multiple axis machine tools*”, PhD dissertation, University of Wisconsin–Madison.

NOVOTNY I., 1969, “*Thermal deformation of gear-cutting machines; Simulation of machining by hydraulic braking*”, *Proc.10th Int. MTDR Conf.*, Manchester, UK, pp. 137–146.

Okafor A.C., Yalcin M. Ertekin, 1999, “*Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics*” *International Journal of Machine Tools and Manufacture* v.40 pp. 1199–1213.

PALMA N., LUIZ GARCIA, MARIA DO CARMO NICOLETI, 2005, “*Introdução às redes neurais construtivas*”, EdUFSCar, São Carlos.

POLLI, MILTON L., 2005, “*Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Fresamento a Altas Velocidades de Corte*”. UFSC, Florianópolis/SC. . Tese de doutorado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina.

RICHARD B., GABRIEL C.,2008, “*Equações diferenciáveis*”. 3 edição, coleção SCHAUM. São Paulo.

RAMESH R., M.A. MANNAN , A.N. Poo, 2000, “*Error compensation in machine tools -a review Part II: thermal errors*”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40 pp1257–1284.

SILVA, J. B. A., 1987, “Desenvolvimento do projeto de eixo - arvore de maquina-ferramenta assistido por computador”, Msc. dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

SILVA, J. B. A., Jimmie A. Miller, Gregory W. Caskey, Prashanth Ramu 2008, “*Approach for uncertainty analysis and error evaluation of four-axis co-ordinate measuring machines*”, *Int J Adv Manuf Technol*, 41:1130–1139 DOI 10.1007/s00170-008-1552-z

SOUSA, R. F., 2005, “Representação de placas por vigas usando método analíticos e simulações em elementos finitos”, Msc. dissertação, Universidade Federal da Paraíba, PB.

SOONS J.A., 1997, “*Error analysis of a hexapod machine tool*”, *Proc. 3rd Int. Conf. on Laser Metrology and Machine Performance — LAMDAMAP*, pp. 347–358.

SPUR G., FISCHER H., 1969, “*Thermal behaviour of machine tools*”, *Proc. 10th Int. MTDR Conf*, pp. 147–160, Manchester, UK.

SPUR G., HOFFMANN E., PALUNCIC Z, BENZINGER K., NYMOEN H., et al, 1988, “*Thermal behaviour optimisation of machine tools*”, In. *Annals of the CIRP*, v.37 n.1, pp. 401–405.

SRIVASTAVA A. K., VELDHUIS S.C, ELBESTAWI M. A., 1995, “*Modelling geometric and thermal errors in a five-axis CNC machine tool*”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* v.35 n.(9) pp. 1321–1339.

STOETERAU, R. L., 2004, “Introdução ao Projeto de Máquinas-Ferramentas Modernas” (Apostila da disciplina de projeto de máquinas-ferramenta, Curso Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina). chico

SUGISHITA H., NISHIYAMA H., NAGAYASU O., SHIN-NOU T, SATO H, HORI M. O., 1988, “*Development of concrete machining centre and identification of the dynamic and the thermal structural behaviour*”, In. *Annals of the CIRP* v.37 n.1 pp.377–380.

TANABE I., TAKADA K., TSUTSUMI M., 1986, “*Thermal deformation of machine tool structures using epoxy resin concrete*”, *Proc. 26th Int. MTDR Conf.*, Manchester, UK, pp. 245–252.

TSUTSUMI M., A. Saito, 2003, “*Identification and compensation of systematic deviations particular to 5-axis machining centers*”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* n:43 - 771–780.

TSENG P.C., 1997, “*A real-time thermal inaccuracy compensation method on a machining centre*”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* n.13, pp. 182–190.

VANHERCK P., J. DEHAES, M. NUTTIN, 1997, “*Compensation of thermal deformations in machine tools with neural nets*”, *ELSEVIER, Computers in Industry* 33 pp 119-125.

VELDHUIS S.C, ELBESTAWI M.A, 1995. “*A strategy for the compensation of errors in five-axis machining*”, *Annals of the CIRP*, v.44, n.1, pp. 373–378.

VENUGOPAL R., 1985, “*Thermal effects on the accuracy of numerically controlled machine tools*”, *PhD dissertation, Purdue University*.

VENUGOPAL R., BARASH M., 1986, “*Thermal effects on the accuracy of numerically controlled machine tools*”, *Annals of the CIRP*, v.35, n.1, pp. 255–258.

WANG Y., ZHANG G., MOON K.S., SUTHERLAND JW, 1998, “*Compensation for the thermal error of a multi-axis machining centre*”, *ASME Trans. Journal of Materials Processing Technology*, n.75, pp. 45–53.

WECK M., 1984, *Handbook of Machine Tools: “Metrological Analysis and Performance Tests”*, v. 4, John Wiley and Sons.

WECK M., MCKEOWN P., BONSE R., HERBST U., 1995, “*Reduction and compensation of thermal errors in machine tools*”, *Annals of the CIRP*, v.44, n.2, pp. 589–598.

YANG M., LEE J., 1998, “*Measurement and prediction of thermal errors of a CNC machining centre using two spherical balls*”, *ASME Trans. Journal of Materials Processing Technology*, n.75, pp.180–189.

YOSHIDA Y., HONDA F., KUBOTA M., 1969, “*Effect of thermal deformation on the cylindrical accuracy in a grinding process*”, *Proc. 10th Int. MTDR Conf.*, Manchester, UK, pp. 161–170.

YUAN K., CHUAN W., YUANRUEY H., 2007, *Modification of a neural network utilizing hybrid filters for the compensation of thermal deformation in machine tools*” *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 p 376–387.

YUAN J., NI J., 1998, “*The real-time error compensation technique for CNC machining systems*”, *Mechatronics*, n.8 pp. 359–380.

POLLI, MILTON L., 2005, “*Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Fresamento a Altas Velocidades de Corte*”. UFSC, Florianópolis/SC. . Tese de doutorado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina.

MCCULLOCH, W. S., PITTS W., 1943, “*Logical Calculus of the ideas Immanent in nervous activity*”, Massachusetts, USA.

ROSENFELD, E., ANDERSON J.A., 1988, “*Neurocomputing Foundations of Researchs*”, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA,. pp.18-27.

ROSENBLATT F., 1958, “*The Perceptron: A probabilistic Model for Information Storege and Organization in the Brain*”, pp. 92-114.

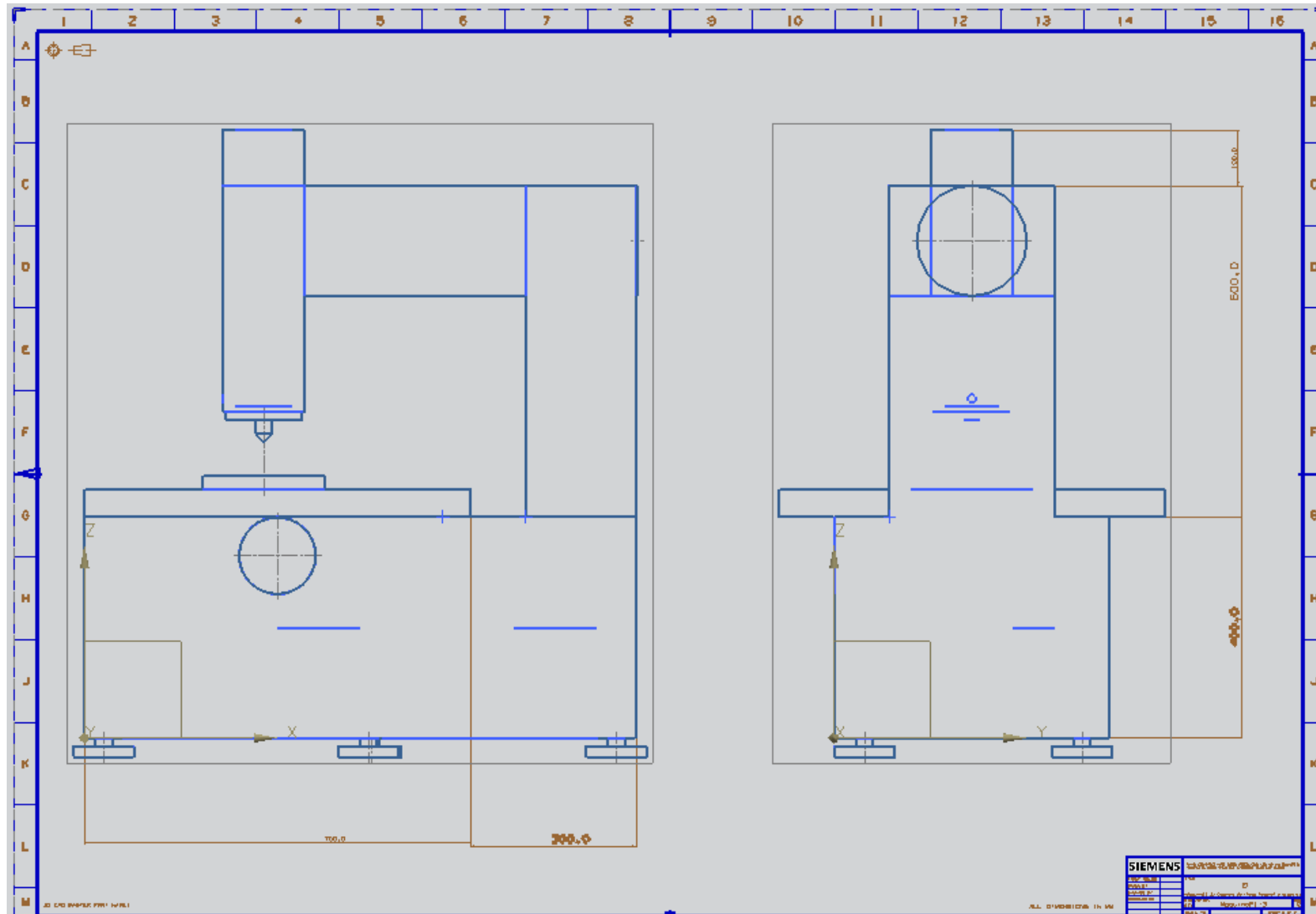
WIDROW, B. & HOFF, M. E.,1960, “*Adaptive Switching Circuits*”, pp. 126-134.

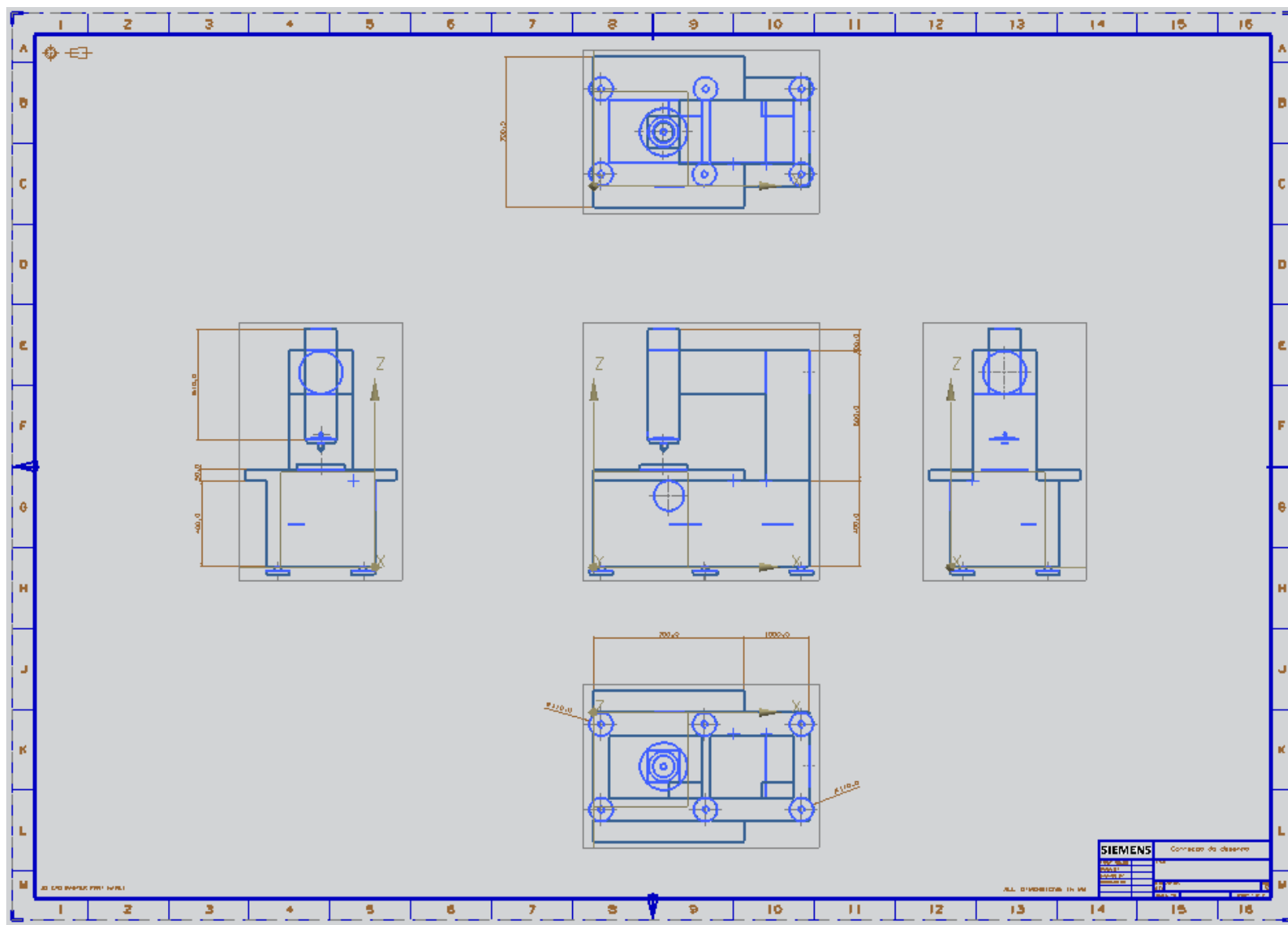
MINSKY M. & PAPERT S., 1969, “*Perceptron*”, Republicado por J.A. Anderson & E. Rosenfield, *Neurocomputing Foundations of Researchs*”, MIT Press, Cambridge, Massachusets, USA,,1988. pp. 161-169.

Z.Z. Xu a, X.J.Liu b, H.K.Kim c, J.H.Shin c, S.K.Lyu a,n ,2011 Thermal error forecast and performance evaluation for an air-cooling ball screw system, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 51, p 605–611

APÊNDICE A

**DESENHO DA MAQUINA-FERRAMENTA ANALISADA COM AS COTAS DE
ALGUNHAS VISTAS.**





APÊNDICE B

**EXEMPLO DE UM DOS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS NO AMBIENTE DO
MATLAB PARA UMA RNA APLICADA NA ANÁLISE DO ESTADO PERMANENTE
DE TEMPERATURA.**

Programa de desenvolvimento de uma RNA para o estado permanente de temperatura com suas respectivas validações

```
P={ [T1] [T2] [T3] [T4] [T5] [T6] [T7] [T8] }; %Vetores dos termopares
%P={ [T1]; [T2]; [T3]; [T4]; [T5]; [T6]; [T7]; [T8] }
T={ [xx'] [yy'] [zz'] [r] [r] [r] [r] [r] }; %Vetores das deformações
r=linspace(0,0,81); %Eixos anulados
%
%
%----- Criando a RNA -----
net = newnrx(P,T,[0 1],[1 2],16); %inicial, 16 neuronios
%[0 1]=>(default) delay do vetor de entrada
%[1 2]=>(default) delay do vetor de saída
Y = sim(net,P); % Valores iniciais aleatórios
%
%      pesos iniciais
%
plot(P{1,1},T{1,1},P{1,2},T{1,1},P{1,3},T{1,1},P{1,4},T{1,1},P{1,5},...
      T{1,1},P{1,6},T{1,1},P{1,7},T{1,1},P{1,8},T{1,1},P{1,1},T{1,2},...
      P{1,2},T{1,2},P{1,3},T{1,2},P{1,4},T{1,2},P{1,5},...

      T{1,2},P{1,6},T{1,2},P{1,7},T{1,2},P{1,8},T{1,2},P{1,1},Y{1,1}, 'g',...
      P{1,2},Y{1,2}, 'g',P{1,3},Y{1,3}, 'g',P{1,4},Y{1,4}, 'g',...
      P{1,5},Y{1,5}, 'g',P{1,6},Y{1,6}, 'g',P{1,7},Y{1,7}, 'g',...
      P{1,8},Y{1,8}, 'g')
xlabel('Temperatura de todos termopares em (C) ')
ylabel('Deformações nos três eixos(X,Y,Z)em micrometro')
title(' Deformação nos três eixos, leitura dos termopares e curvas
aleatórias')
pause
v=1;
%
      net.trainParam.epochs = 500; % iterações
      net.trainParam.goal = 0.001 ; % Erro =>1 nanometro
      net.adaptParam.passes = 100; %obs maior numero de passos por
iteração
%
%-----Treinando-----
net = train(net,P,T); %inicial
Yf = sim(net,P); % Valores finais do treinamento
%
%pause(2)
v=v+1;
%-----Range da leitura de temperatura-----
Tvsmax=max(Tvs3);
Tvsmin=min(Tvs3);
T3max=max(T3);
T3min=min(T3);
%-----

P2={ [linspace(T3min,T3max,81)] }; % Range dos termopares
plot(P2{1,1},T{1,1}, 'k',P2{1,1},T{1,2}, 'b',P2{1,1},T{1,3}, 'g',...
      P2{1,1},Yf{1,1}, 'c',P2{1,1},Yf{1,2}, 'm',P2{1,1},Yf{1,3}, 'y')
xlabel('Temperatura nos termopares em (C) ')
ylabel('Deformações nos três eixos(X,Y,Z)em micrometro')
title(' Deformação nos três eixos(X,Y,Z) e leitura dos termopares')
%
```

```

pause %(0.5)
%----- Validação-----
p3={ [linspace(T3min,T3max,81)] };
%p3={ [linspace(20,130,81)] };
V={ [Tv1] [Tv2] [Tv3] [Tv4] [Tv5] [Tv6] [Tv7] [Tv8] };
%tv=[20 21 26 31 36 41 46 51 56 61 66 71 76 81 86 91 96
101];
Yv = sim(net,V);
plot(p3{1,1},Yf{1,1}, 'c',p3{1,1},Yf{1,2}, 'm',p3{1,1},Yf{1,3}, 'y',...
      p3{1,1},Yv{1,1}, 'k',p3{1,1},Yv{1,2}, 'b',p3{1,1},Yv{1,3}, 'g')
xlabel('Temperatura dos novos termopares em (C) ')
ylabel('Deformações nos três eixos(X,Y,Z)em micrometro')
title(' Validação nos três eixos(X,Y,Z)em relação as novas entradas dos
termopares')
pause
%-----comparando o real com o previsto-----
plot(P2{1,1},T{1,1}, 'k',P2{1,1},T{1,2}, 'b',P2{1,1},T{1,3}, 'g',...
      p3{1,1},Yv{1,1}, 'c',p3{1,1},Yv{1,2}, 'm',p3{1,1},Yv{1,3}, 'y')
pause
%-----validação para outros valores somando e subtraindo
uma
%constante
Vs={ [Tvs1] [Tvs2] [Tvs3] [Tvs4] [Tvs5] [Tvs6] [Tvs7] [Tvs8] };
Yvs = sim(net,Vs);
plot(p3{1,1},Yf{1,1}, 'c',p3{1,1},Yf{1,2}, 'm',p3{1,1},Yf{1,3}, 'y',...
      p3{1,1},Yvs{1,1}, 'k',p3{1,1},Yvs{1,2}, 'b',p3{1,1},Yvs{1,3}, 'g')
xlabel('Temperatura dos termopares soma/subt CTE em (C) ')
ylabel('Deformações nos três eixos(X,Y,Z)em micrometro')
title(' Validação nos três eixos(X,Y,Z)em relação as novas entradas
dostermopares')
pause
%-----comparando o real com o previsto-----
plot(P2{1,1},T{1,1}, 'k',P2{1,1},T{1,2}, 'b',P2{1,1},T{1,3}, 'g',...
      p3{1,1},Yvs{1,1}, 'c',p3{1,1},Yvs{1,2}, 'm',p3{1,1},Yvs{1,3}, 'y')
title(' comparando o real com a segunda validação')
end

%-----Fim do programa-----

```