

MONITORAMENTO DOS ERROS TÉRMICOS DE UM CENTRO DE USINAGEM UTILIZANDO TECNOLOGIA “LORA”

Luigi Possari Clementi

Adalto de Farias

Instituto Mauá de Tecnologia – Praça Mauá, 01 – São Caetano do Sul/SP – 09580-900
luigipossari77@hotmail.com – adalto.farias@maua.br

Marcelo Otávio dos Santos

Instituto Mauá de Tecnologia – Praça Mauá, 01 – São Caetano do Sul/SP – 09580-900
marcelo.santos@maua.br

Vanessa Seriacopi

Instituto Mauá de Tecnologia – Praça Mauá, 01 – São Caetano do Sul/SP – 09580-900
vanessa.seriacopi@maua.br

Éd Claudio Bordinassi

Instituto Mauá de Tecnologia – Praça Mauá, 01 – São Caetano do Sul/SP – 09580-900
ecb@maua.br

Resumo. O objetivo deste trabalho foi monitorar os erros térmicos em um Centro de Usinagem. Foram levantados os pontos quentes da máquina através de um termômetro infravermelho e uma câmera termográfica após a máquina funcionar por cerca de 4h. Após esta primeira análise, foram inseridos termopares nos pontos quentes, que em geral, ficaram próximos aos rolamentos e porcas dos fusos de esferas. Estes termopares foram ligados a um sistema LoRa, que permitiu coletar, de forma remota, os dados da variação de temperatura da máquina em função do tempo. As deformações foram medidas por um sistema de laser interferométrico para correlacionar as temperaturas com as deformações. As diferenças encontradas com a máquina aquecida, com relação à máquina fria ficaram por volta de 0,16 mm. Com esta análise é possível monitorar a máquina através de uma tecnologia totalmente voltada à Indústria 4.0, com possibilidade de atuar em manutenção de forma preditiva, ou atuar nas correções de posicionamento da máquina através de um modelo de compensação.

Palavras chave: Erros térmicos, Centro de Usinagem, Compensação de erro térmico

1. INTRODUÇÃO

No Século XXI, a indústria metal mecânica e a Indústria 4.0 estão continuamente crescendo juntas. Cada vez mais a tecnologia domina esse cenário atual, sendo necessário a adaptação dessas novas tecnologias nos maquinários mais antigos (acima de cinco anos), para aprimorar a qualidade em produtos. Essas novas possibilidades abrem caminho para tornar as máquinas mais precisas e confiáveis. Existem diversos erros que interferem nos processos de usinagem, em especial se tratando de máquinas usadas. O erro de usinagem relacionado ao erro térmico é de aproximadamente 50-70% (MIAO et al., 2015 e JEDRZEJEWSKI, et al. 2008). Quando a máquina-ferramenta está em operação, a deformação térmica é inevitável, pois a temperatura relacionada a movimentação das peças da máquina está dinamicamente afetando todo o processo (ZHOU et al., 2018). Geralmente, a temperatura da máquina é afetada por dois fatores, o calor interno gerado pelo trabalho dos motores da máquina, e da radiação e convecção térmica entre a máquina e o exterior (local onde a máquina se encontra) (ZHOU et al., 2018).

Para o estudo dos erros térmicos, torna-se necessário analisar alguns pontos importantes. Para diminuir ou eliminar os erros das máquinas-ferramentas, muitas tentativas e grandes esforços foram feitos durante as últimas décadas. Alguns fabricantes são capazes de alcançar uma alta precisão melhorando metodologias de design e avançando em tecnologias de materiais. É muito mais fácil monitorar ou medir a quantidade de imprecisões e compensar através de alterações na posição comandada de diferentes eixos, o que é especialmente aplicável às máquinas-ferramentas CNC (ZHAO, Bi, Ke, 2017). O monitoramento é necessário porque usuários perceberam que máquinas parecidas em desempenho e curso de trabalho por exemplo, podem apresentar erros térmicos significativamente diferentes (MAYR et al., 2012). Outra maneira de reduzir o erro resultante induzido pela dilatação térmica da máquina-ferramenta é aquecer a máquina-ferramenta antes do processo de corte real. Quando o estado de equilíbrio térmico da máquina-ferramenta é atingido, a máquina-ferramenta pode ser usada para o corte real de peças. O processo de aquecimento é normalmente demorado, muitas vezes leva horas, o que afeta a eficiência geral da manufatura por usinagem e não é ecológico (ZHOU et al., 2018). De acordo com Miao

et al. (2015), a seleção dos pontos sensíveis à temperatura, que têm influência mais importante no erro térmico, se baseia em selecionar o menor número de sensores de temperatura para obter os melhores efeitos de ajuste e previsão e robustez para um modelo de erro térmico.

Nos últimos anos houve avanço significativo em tecnologias voltadas ao monitoramento e Indústria 4.0 e sua utilização aumentaram o conhecimento sobre a origem dos erros térmicos (DROSSEL et al., 2013). Este conceito apresenta uma nova geração de máquinas-ferramentas mais inteligentes, bem conectadas, amplamente acessíveis, mais adaptativas e mais autônomas (LIU et al, 2018). Uma tecnologia em expansão no momento é a LoRa (Long Range) que utiliza rede de área ampla de baixa potência (LPWAN). Baseia-se em técnicas de modulação de espectro de propagação derivadas da tecnologia Chirp Spread Spectrum (CSS). Foi desenvolvido por Cycleo de Grenoble, França. O LoRa usa bandas de radiofrequência sub-gigahertz sem licença, como 433 MHz, 868 MHz (Europa), 915 MHz (Austrália e América do Norte) e 923 MHz (Ásia). O LoRa permite transmissões de longo alcance (mais de 10 km em áreas rurais) com baixo consumo de energia. As novas tecnologias permitem rápidas adaptações em equipamentos mais antigos, trazendo modernidade e inteligência com baixo custo de implementação. O objeto de estudo deste trabalho é uma máquina de 20 anos, que não possui sensores de monitoramento online como as máquinas modernas.

Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar a variação de temperatura em alguns pontos estratégicos distribuídos em um Centro de Usinagem e correlacionar estas temperaturas com as deformações nos respectivos eixos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A máquina avaliada é um Centro de Usinagem Romi, Discovery 560. Os dados principais da máquina são: Velocidade máxima: 7.500 rpm; Cursos: Curso longitudinal (eixo X): 560 mm; Curso transversal (eixo Y): 406 mm; Curso vertical (eixo Z): 508 mm; Mesa: Dimensões da mesa: 840 x 360 mm; Motor principal CA (30 min): 15 / 11 cv/kW; Potência total instalada: 20 kVA

Para visualização dos pontos quentes, foi utilizada uma câmera termográfica modelo FLUKE VT02. A máquina-ferramenta foi programada com um ciclo de aquecimento por 4 horas, tempo suficiente até a máquina atingir uma temperatura constante. O ciclo de aquecimento consistiu em movimentos lineares com avanço de 12000 mm/min; Rotação: 5000 rpm; Cursos: 400 mm no eixo X, 300 mm no eixo Y, 150 mm no Eixo Z.

Antes da utilização dos termopares, foi feita a calibração da variação das temperaturas registradas pelo sistema LoRa, utilizando forno com meio líquido agitado, e registrando a temperatura com um termo higrômetro digital. O procedimento foi feito no Centro de Pesquisas do Instituto Mauá e mostrou valores adequados, aprovando os termopares para esta aplicação. Cada sensor foi conectado por um cabo de extensão ligado a um transmissor da rede LoRa, infraestrutura existente no Campus do Instituto Mauá de Tecnologia. O LoRa recebeu os dados, e os disponibilizou em tempo real, junto a um gráfico gerado através do tempo, além dos relatórios.

O equipamento utilizado para realizar as medições por laser interferométrico foi o RENISHAW XL-80 e o compensador RENISHAW XC-80. Foram realizadas duas medições, uma com a máquina "fria", e a outra com a máquina já aquecida. A varredura no eixo realizou a medição a cada 50mm, e foi realizada continuamente até a temperatura do termopar chegar a aproximadamente 30°C. Este procedimento foi repetido para os 3 eixos.

A Figura 1 mostra a câmera termográfica utilizada e transmissor da tecnologia LoRa, que possui uma bateria interna que pode durar dias dependendo da utilização ou pode ser conectado a uma fonte de energia USB.

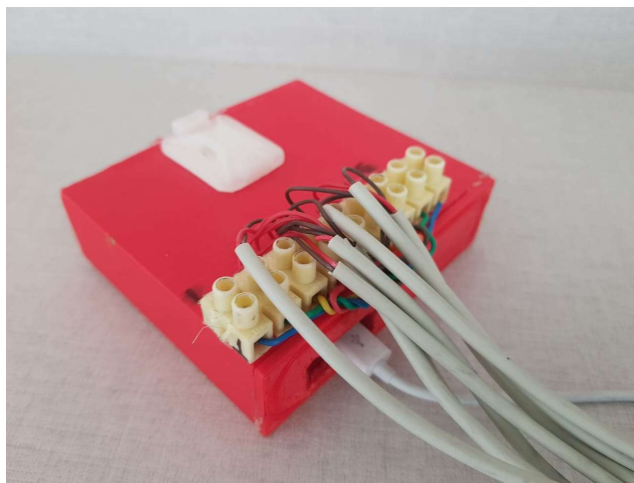


Figura 1. Câmera termográfica e transmissor LoRa (próprio autor)

A Figura 2 mostra uma imagem da câmera termográfica utilizada para levantamento dos pontos quentes. Trata-se de um dos mancais do eixo Y da máquina, após 4 h de funcionamento. A temperatura registrada foi de 28,7 °C e no ponto indicado foi instalado um termopar. Foram instalados 8 termopares, na região de maior temperatura, dois em cada eixo X, Y e Z. Um foi instalado na parte de fora da máquina para monitorar a temperatura ambiente e um outro foi instalado no cabeçote, também na região mais quente.

Com os termopares colocados nos pontos quentes da máquina, iniciou-se o monitoramento através da tecnologia LoRa. Foi criado um painel específico para esta aquisição na qual foi possível monitorar os valores online de forma contínua e foi possível coletar relatórios ao longo do tempo. A Figura 3 mostra o painel com um exemplo de coleta.

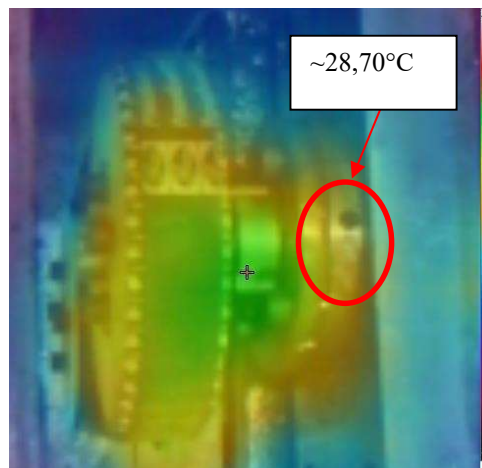


Figura 2. Ponto quente visto através da câmera termográfica, no eixo Y da máquina (próprio autor)

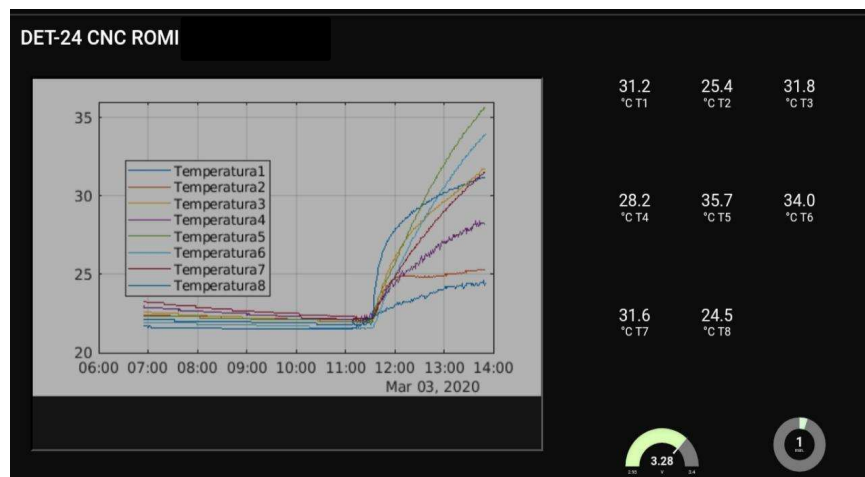


Figura 3. Painel utilizado para visualização da variação de temperatura em função dos termopares instalados (próprio autor)

Após instalados os sensores, a máquina ficou em operação por vários dias, para comprovar sua efetividade. Durante os testes percebeu-se que um dos mancais estava com temperatura bem acima dos outros, indicando que uma falha se aproximava e nos testes com ciclagem da máquina, o ruído do rolamento aumentou, sendo necessária sua substituição. Este evento mostrou de maneira muito clara que este monitoramento também serve para manutenção preditiva. As máquinas novas já contam com sensores de temperatura e acelerômetros para detectarem estas falhas, em máquinas antigas, a tecnologia aplicada aqui pode ajudar a detectar falhas em máquinas antigas com baixo custo.

Na sequência foram levantadas todas as medições com o uso de laser interferométrico, para a correlação entre as temperaturas e as deformações dos eixos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 4, 5 e 6 mostram o resumo dos levantamentos das deformações realizados pelo laser interferométrico para os eixos Y, X e Z respectivamente. A linha superior na cor azul mostra as deformações coletadas com a máquina fria e as linhas abaixo as variações ao longo do tempo.

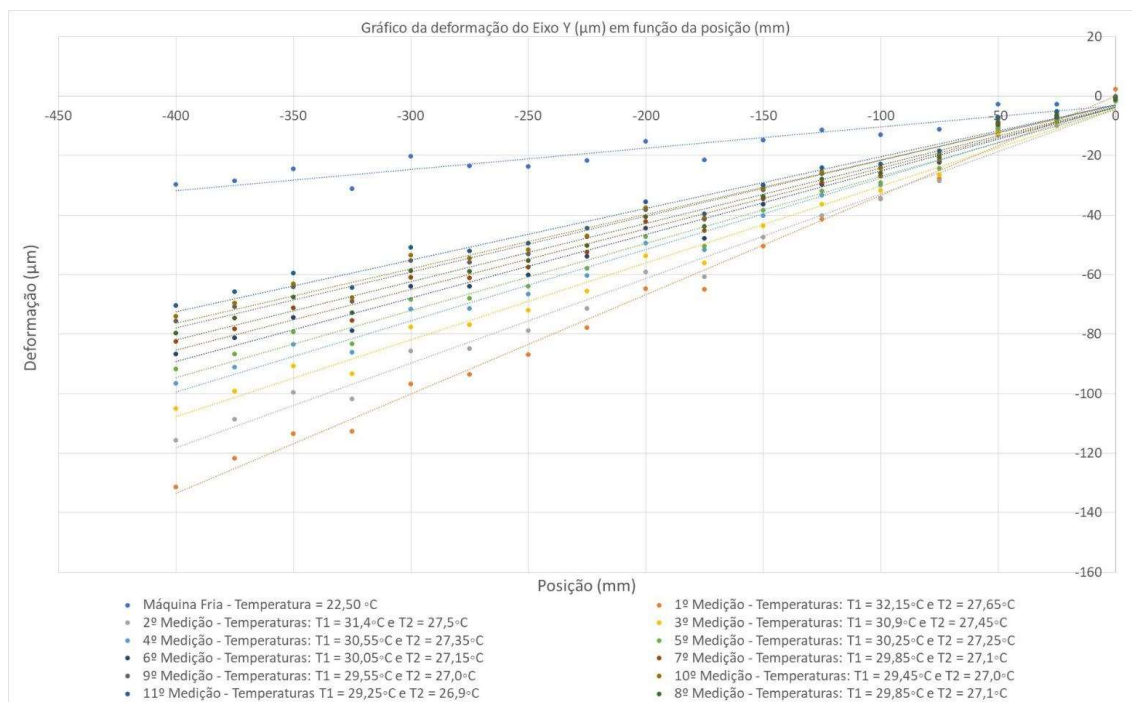


Figura 4. Deformação no eixo Y em função da temperatura (próprio autor)

Na Figura 4 percebe-se para o eixo Y que a maior deformação obtida foi de 135 μm , quando a temperatura média dos termopares estava em torno de 30 °C. As linhas subsequentes mostram as medições à medida que a temperatura dos termopares foi diminuindo.

Para o eixo X (Figura 5) a maior deformação obtida foi de 156 μm , quando a temperatura média dos termopares estava em torno de 38 °C. As linhas subsequentes mostram as medições à medida que a temperatura dos termopares foi diminuindo. Para o eixo Z (Figura 6) a maior deformação obtida foi de 162 μm , quando a temperatura média dos termopares estava em torno de 33,5 °C. As linhas subsequentes mostram as medições à medida que a temperatura dos termopares foi diminuindo.

Os resultados são coerentes, visto que os eixos com maiores comprimentos tiveram maiores deformações. As diferenças de quase 0,2 mm são significativas em um processo de usinagem de precisão, e podem influenciar negativamente na produção nas primeiras horas de funcionamento da máquina, a implementação de correções na máquina pode trazer maior confiabilidade ao processo.

Considerando que o ciclo de aquecimento da máquina pode durar até 4 h, e que neste período uma quantidade grande de peças deverá ser feita com variações de décimos de milímetros (a depender das dimensões das peças), o monitoramento proposto aqui com a devida correção pode trazer ganhos consideráveis no processo. Para uma peça que demora 10 min para ser fabricada, por exemplo, 24 peças estariam nesta condição de incertezas e correções, o que pode trazer uma economia considerável, a depender dos processos anteriores e tempo investido na fabricação das mesmas.

Uma próxima etapa para a continuidade deste trabalho é o desenvolvimento um modelo baseado em redes neurais para a compensação dos erros térmicos, visando sua implementação no Centro de Usinagem. Será necessário também neste modelo avaliar a confiabilidade dos resultados, com tratamento estatístico dos dados de maneira que o modelo implementados na máquina, que possui limitações no processamento destas informações seja o mais confiável possível.

O desenvolvimento do trabalho se mostrou efetivo e de baixo custo, mostrando uma oportunidade interessante de melhoria para equipamentos antigos e que ao invés de serem trocados podem ser conectados à Indústria 4.0. O exemplo mostrou efetividade em um processo, mas diversas possibilidades surgem com o uso desta tecnologia como a manutenção preditiva, já citada aqui. Diversos sensores podem instrumentar a máquina, desde um simples coletor de cavaco para indicar sua capacidade máxima, até sensores de vibração, variação de tensão, etc, todos conectados na rede, com fácil acesso e possibilidade de implementação de alarmes e interligações diversas.

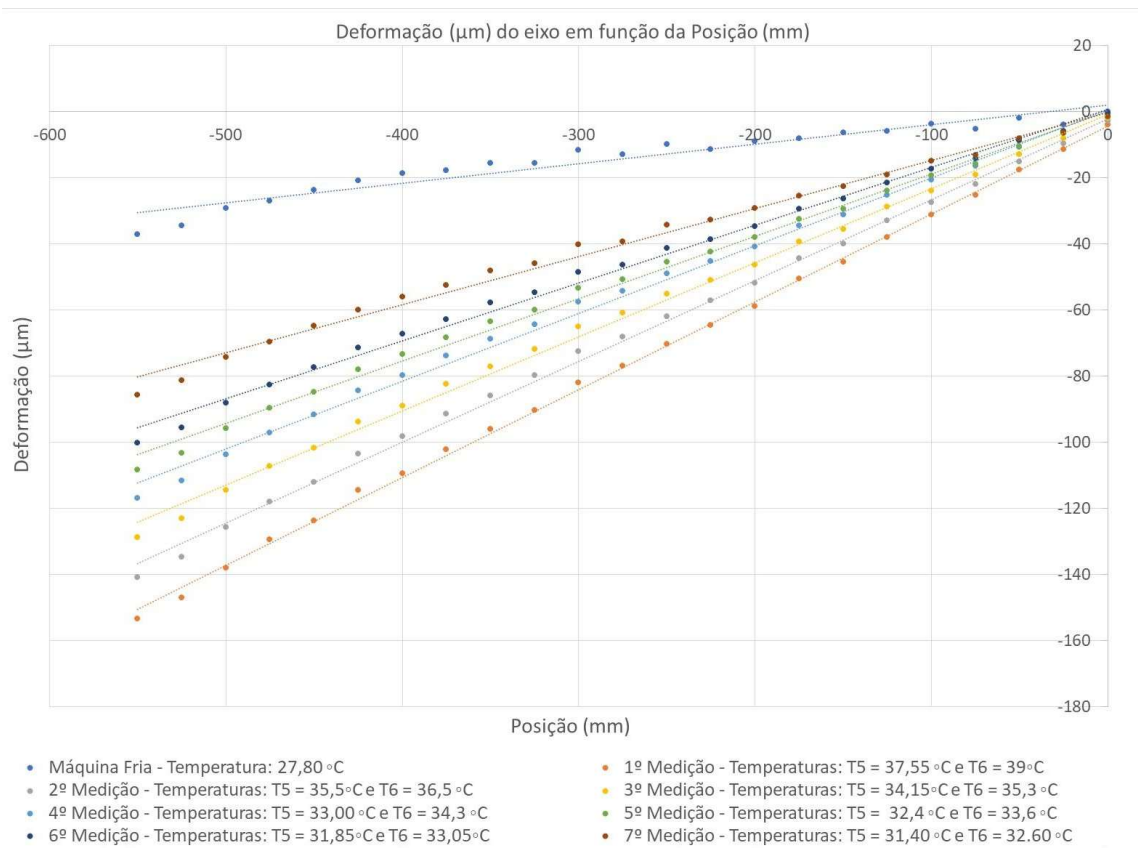


Figura 5. Deformação linear no eixo X em função da temperatura (próprio autor)

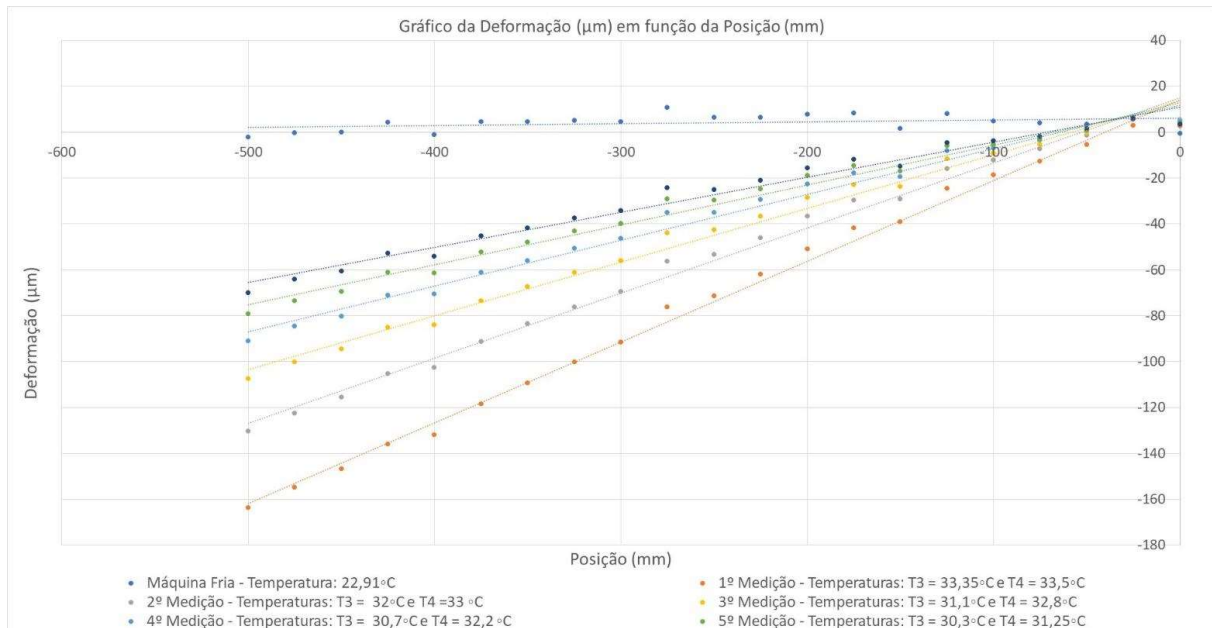


Figura 6. Deformação linear no eixo Z em função da temperatura (próprio autor)

4. CONCLUSÕES

As temperaturas monitoradas nos testes variaram de 25 °C à aproximadamente 39 °C. Em alguns testes onde se utilizaram parâmetros maiores, dificilmente utilizados no dia-a-dia por um tempo longo temperaturas acima de 40 °C foram observadas.

As deformações máximas variaram de 0,130 mm a 0,160 mm, Eixo X = 0,150 mm; Eixo Y = 0,130 mm; Eixo Z = 0,160 mm. O gráfico deformação em função da temperatura mostrou um comportamento aproximadamente linear, indicando que com o aumento da temperatura nos mancais o erro de posicionamento do eixo aumenta. Na medida que temperatura diminui, tendendo para temperatura da máquina fria menor a deformação do fuso.

A tecnologia LoRa mostrou-se capaz de realizar as medições, assim como outras aplicações.

5. REFERÊNCIAS

- Drossel, W.G.; Ihlenfeldt, ST.; Zwingerberger, C., 2013. Modellierung des Wärmeaustauschs Maschine-Umgebung. 16. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar – Fraunhofer IWU Chemnitz, pp. 95 – 113.
- Gurauskis, D., Kilikevičius, A., Borodinas, S., & Kasparaitis, A., 2019. Analysis of geometric and thermal errors of linear encoder for real-time compensation. *Sensors and Actuators A: Physical*, 296, 145–154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.06.055>
- Jedrzejewski, J. et al., 2008. Precise Model of HSC Machining Centre for Aerospace Parts Milling. *Journal of Mechanical Engineering* 8(3):29–41.
- Junior, O. H., 2014. Protótipo de um microgerador termoelétrico para captação de energias residuais baseado no efeito seeback co sistema de transferência de calor intercambiável.
- Junior, V. M., 2020. ELETRICIDADE - Nota de aula complementar. Fonte: <http://imt.mrooms.net>
- Liu, C. et al., 2018. A systematic development method for cyber-physical machine tools. *Journal of Manufacturing Systems*. JMSY-638.
- Mayr, J. et al., 2012. Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(2), pp. 771-791.
- Miao, E., Liu, Y., Liu, H., Gao, Z., & Li, W., 2015. Study on the effects of changes in temperature-sensitive points on thermal error compensation model for CNC machine tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.
- RENISHAW., 2020. Retrieved from RENISHAW: www.renishaw.com.br
- Zhang, B., Wu, J., 2019. Modeling and optimizing. *Journal of Engineering Manufacture*, pp. 1-14.
- Zhao, D., Bi, Y., Ke, Y., 2017. An efficient error compensation method for coordinated CNC five-axis machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.08.007>
- Zhou, H., Hu, P., Tan, H., Chen, J., Liu, G., 2018. Modelling and compensation of thermal deformation for machine tool based on the real-time data of the CNC system. *Procedia Manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.150>

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

MONITORING THERMAL ERRORS IN A MACHINING CENTER USING LORA TECHNOLOGY

Luigi Possari Clementi

Adalto de Farias

Instituto Mauá de Tecnologia – Praça Mauá, 01 – São Caetano do Sul/SP – 09580-900
luigipclementi77@hotmail.com – adalto.farias@maua.br

Marcelo Otávio dos Santos

Instituto Mauá de Tecnologia – Praça Mauá, 01 – São Caetano do Sul/SP – 09580-900
marcelo.santos@maua.br

Vanessa Seriacopi

Instituto Mauá de Tecnologia – Praça Mauá, 01 – São Caetano do Sul/SP – 09580-900
vanessa.seriacopi@maua.br

Éd Claudio Bordinassi

Instituto Mauá de Tecnologia – Praça Mauá, 01 – São Caetano do Sul/SP – 09580-900
ecb@maua.br

Abstract. *The objective of this work was to monitor thermal errors in a Machining Center. The machine's hot spots were surveyed using an infrared thermometer and a thermographic camera after the machine ran for about 4 hours. After this first analysis, thermocouples were inserted in the hot spots, which, in general, were close to the bearings and nuts of the ball screws. These thermocouples were connected to a LoRa system, which made it possible to collect data on the temperature variation of the machine as a function of time. After this phase, the deformations were measured by an interferometric laser system to correlate the temperatures with the thermal errors. The differences found with the heated machine, in relation to the cold, were around 0.3 mm. With this analysis it is possible to monitor the machine using a technology totally focused on Industry 4.0, with the possibility of performing maintenance in a predictive way, or acting on the positioning corrections of the machine through a compensation model.*

Keywords: *Thermal errors, Machining Center, Thermal error compensation*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.