

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM APALPADOR “TOUCH TRIGGER” DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO POR COORDENADAS

*Luiz Henrique Melo Silva Nóbrega*¹, *Verílton Nunes da Silva*², *Rafael Franklin Alves da Silva*³, *Igor Lucena Peixoto Andrezza*⁵, *José Carlos de Oliveira Custódio*⁵, *José Carlos de Lima Júnior*⁶, *João Bosco de Aquino Silva*⁷

¹ Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Brasil, rikinobrega@hotmail.com

² Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Brasil, verilton@yahoo.com.br

³ Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Brasil, rafael.falves@hotmail.com

⁴ Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Brasil, igorlpa90@gmail.com

⁵ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), João Pessoa, Brasil, carloscustodio@globo.com

⁶ Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Brasil, limajrcarlos@hotmail.com

⁷ Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Brasil, jbosco@ct.ufpb.br

Resumo: Este trabalho versa sobre o projeto e desenvolvimento do protótipo de um apalpador *touch trigger* de baixo custo para medição por coordenadas, utilizando o princípio dos contatos elétricos. É dada ênfase ao princípio de funcionamento mecânico e elétrico deste apalpador. Todo sistema desenvolvido é controlado por um micro-controlador PIC 16F877A, e as coordenadas de apalpação capturadas pelo sensor de medição são enviadas ao Computador Pessoal (PC) pelo padrão de comunicação serial RS-232. Um *display* LCD foi utilizado como dispositivo mostrador para visualização dos resultados das dimensões. Testes com o sistema de medição desenvolvido foram realizados em laboratório, revelando uma repetitividade de 50 μ m para uma confiabilidade de $\pm 2,75\sigma$ ou 99,00 %, e uma boa reprodutibilidade e estabilidade em longo prazo, sob condições definidas. Os resultados obtidos mostram que o sistema de medição desenvolvido apresentou características metrológicas aceitáveis para um protótipo de baixo custo.

Palavras - chave: apalpador, medição por coordenadas, repetitividade.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o aumento da competição mudou a forma das empresas abordarem os processos produtivos. Hoje, em plena era da economia globalizada, a concorrência é muito acirrada. Não há mais espaço para produtos de baixa qualidade, visto que os consumidores tornaram-se mais exigentes e possuem muitas opções no mercado [1]. Para as empresas, a manutenção da qualidade é uma questão crucial para sua sobrevivência. A qualidade dos produtos tem que ser assegurada o que só acontece quando os sistemas de medição confiáveis forem utilizados no controle da qualidade da produção.

Este contexto em que cresce os meios de controle dimensional foi o ambiente motivador para o surgimento da Máquina de Medir por Coordenadas (MMC). Em 1960, a Ferranti, fabricante inglês de máquinas operatrizes, apresentou o primeiro modelo de uso industrial das MMCs.

Desde então a evolução de diversas tecnologias como sensores lineares de deslocamento, análise de deformações

estruturais, sistemas de movimentação, entre outras, contribuíram para uma melhor performance das MMCs. Mas a invenção e desenvolvimento de um item em especial, podem ser considerados a chave para este crescimento e popularização da MMC. Sendo este o sensor eletrônico de contato [2].

Diante da necessidade de medir os dutos nos motores que equipavam o Concorde que um engenheiro da Rolls Royce, Sr. David McMurty inventou o sensor de toque eletrônico multidirecional batizado de TP1 (Touch Probe 1), o sensor inventado por McMurty revolucionou o uso das MMCs, e com ele foi possível realizar medições mais complexas, com exatidão e menor tempo. Na Fig. 1 pode ser observada a foto do primeiro apalpador tipo *touch trigger* [3].



Fig. 1. Primeiro apalpador 3D patentado por McMurty [3]

Após negociação da patente com a Rolls Royce, surgiu a empresa pioneira na fabricação e comercialização de tais equipamentos, tendo o Sr. David como fundador. Desde então, a linha de produtos se expandiu para atender a demanda por alta flexibilidade e automação dos processos de medição. Paralelamente, vários fabricantes surgiam, porém, com o princípio de funcionamento patentado, diferentes tecnologias precisavam ser desenvolvidas [4].

O presente artigo tem como objetivo apresentar o projeto e desenvolvimento do protótipo de um apalpador de baixo custo, baseado no princípio dos contatos elétricos para

medições de comprimentos de peças e, com este, realizar testes a fim de obter suas características metroológicas, em ambiente de laboratório.

2. COMPONENTES DE UMA MMC

Uma MMC pode ser vista como sendo um conjunto de sistemas funcionando de forma integrada com o objetivo de materializar um sistema coordenado cartesiano. Neste caso, existe a movimentação de três eixos para a determinação das coordenadas espaciais, sendo estes caracterizados por meio de um sistema de guias com mancais aerostáticos e escalas optoeletrônicas ou com um sistema a laser, para determinação das coordenadas com o cabeçote apalpador.

De modo generalizado, uma Máquina de Medição por Coordenadas é formada por equipamentos mecânicos (estrutura de sustentação, mesa, mancais, guias eixos e acionamentos), eletro-eletrônicos (servo-motores, controladores, cabeçote apalpador, circuito de controle), ópticos (escalas de medição optoeletrônicas), com funcionamento integrado gerenciado por um computador e através de processamento computacional para medição [5]. A Fig. 2 apresenta uma configuração básica de uma MMC. Dentre os componentes mostrados na Fig. 2, destaca-se o sistema de apalpação. O referido sistema é o componente que relaciona a posição do ponto a ser medido ao sistema de coordenadas da MMC.

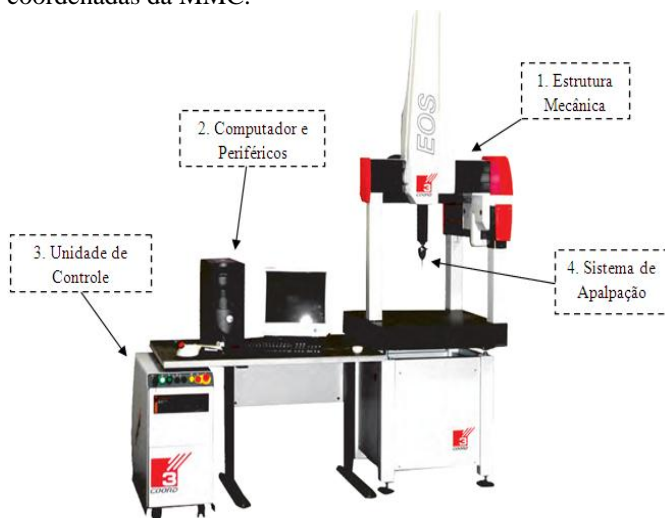


Fig. 2. Máquina de medição por coordenadas

3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO APALPADOR TOUCH TRIGGER

O princípio de funcionamento do sensor desenvolvido baseia-se na geração ou interrupção de um sinal elétrico no momento em que ocorre o contato entre o apalpador e a peça a ser medida. Este sinal é conhecido por *gatilho*, do inglês *trigger*. Rigorosamente, o sinal do *trigger* não é gerado assim que o apalpador entra em contato com a peça. Como pode ser observado na Fig. 3 [3] o dispositivo irá continuar o seu movimento mesmo após o contato com a peça, ocorrendo uma pequena deflexão da haste, e então é ativado o sistema sensor do apalpador. À distância percorrida entre o instante de toque e a geração efetiva do sinal é chamada de *pre-travel* [6].

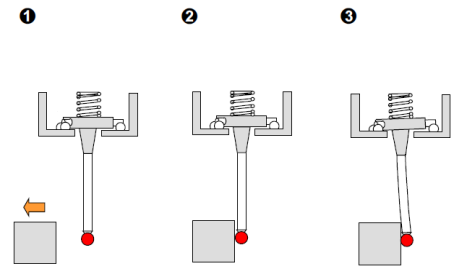


Fig. 3. Geração do sinal *trigger* [3]

3.1. Sistema Mecânico

A construção deste sensor de medição é composta de um mecanismo cinemático formado por três atuadores. Cada um desses atuadores é constituído por um par de esferas e um contato entre eles, dispostos a 120° entre si.

Outro componente muito importante que forma este tipo de configuração é a mola de sujeição, responsável por manter os três contatos assentados sobre as seis esferas quando o sensor estiver em seu estado de repouso. No geral, os atuadores têm a função de conduzir um sinal eletrônico durante seu estado inicial e interrompê-lo quando acionados, funcionando basicamente como uma chave NF (Normalmente Fechada). Para tanto, o sensor de medição trabalha com um sistema elétrico que altera sua condição de acordo com a força aplicada ao ponto de contato (ponta de contato), convertendo um evento mecânico em um sinal eletrônico. Ver Fig. 4 [7].

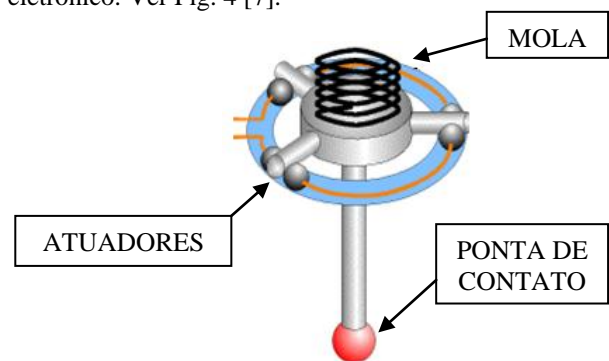


Fig. 4. Esquema mecânico do apalpador [7]

3.2. Sistema Elétrico

Para este tipo de configuração de apalpadores, tem-se que um circuito elétrico é montado através dos contatos cinemáticos. Neste caso, cada conjunto de atuador é isolado dos demais e uma corrente elétrica os percorrem como apresentado na Fig. 5 [3], sendo estes interligados por condutores elétricos.

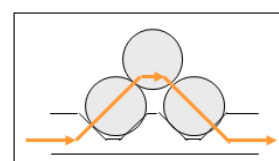


Fig. 5. Esquema elétrico do apalpador *touch trigger* [3]

4. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS PROPOSTO

Após estudar o princípio de funcionamento das Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs), os tipos de sensores utilizados nestas máquinas e as tecnologias empregadas em cada um deles, optou-se por desenvolver um sistema de medição utilizando um sensor por contato, o apalpador *touch trigger*, empregando o princípio dos contatos elétricos. De acordo com Abackerli e Gomes [8], este tipo de apalpador é um dos mais utilizado nas MMCs.

Inicialmente, para alcançar o modelo final do apalpador *touch trigger* que foi desenvolvido, algumas configurações foram projetadas num software computacional de CAD (Computer-Aided Design). As primeiras configurações técnicas realizados nesta ferramenta computacional serviram como incentivos para discussões a fim de obter melhores características do projeto, como: redução de peso, facilidade de instrumentação, manutenção e usinagem, e várias outras conclusões a respeito. Após diversas alterações, obteve-se o projeto final do apalpador para confecção. Este modelo pode ser observado na Fig. 6.

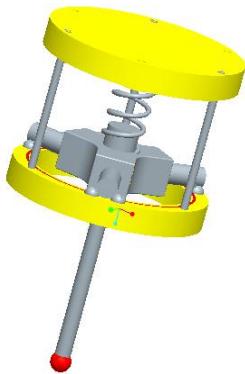


Fig. 6. Projeto do apalpador a ser confeccionado

A segunda etapa do desenvolvimento do protótipo consistiu em projetar uma estrutura mecânica com a finalidade de fixar o apalpador *touch trigger*, promovendo o seu movimento para realização das medições.

Desenvolvida a estrutura da máquina de medição, deu-se início ao processo de instrumentação do sistema. Todo o controle do protótipo é realizado através do microcontrolador *PIC 16F877A*. A utilização deste dispositivo é justificada por este ser um componente de baixo custo, quando comparado a outras tecnologias, possui um baixo consumo de energia e ser dotado de inteligência programável.

Para a visualização das coordenadas de apalpação, foi utilizado um *display* LCD. Também, as coordenadas são enviadas ao computador por meio do padrão de comunicação serial RS-232.

O elemento responsável por monitorar o deslocamento do sistema e informar ao microcontrolador as coordenadas em que ocorre o contato sensor-peça é um *encoder* rotativo incremental, caracterizado como um transdutor de movimento, capaz de converter o movimento angular do fuso em informações elétricas. A resolução do *encoder*

corresponde a 0,02 mm, pois foi utilizado um disco com 150 divisões acoplado a um fuso com passo de 3 mm.

A Fig. 7 ilustra a foto do sistema de medição depois de concluída todas as etapas.

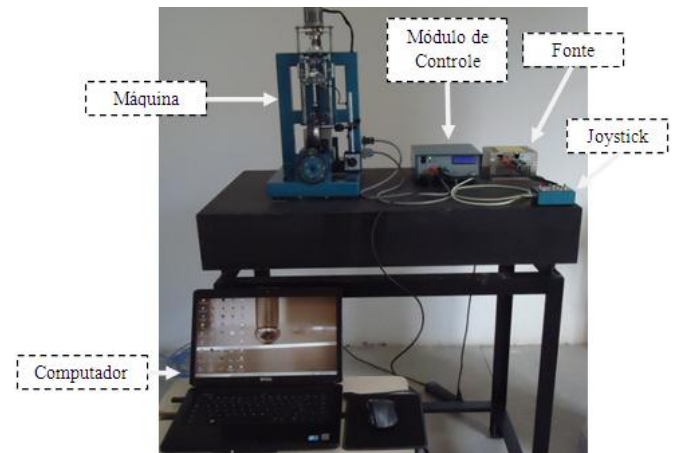


Fig. 7. Sistema de medição com o uso do apalpador *touch trigger*

5. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Para realização dos ensaios apresentados foram usinadas seis peças prismáticas, sendo cinco delas de alumínio fundido e uma de alumínio laminado. O conjunto das cinco peças de alumínio fundido foi projetado para os seguintes comprimentos nominais: 5,0 mm; 10,0 mm; 15,00 mm; 20,00 mm e 30,00 mm. A peça de alumínio laminado foi projetada para o comprimento nominal de 25,40 mm, além de dois furos com diâmetros nominais de 25, 75 mm. Ver Figs. 8a e 8b.

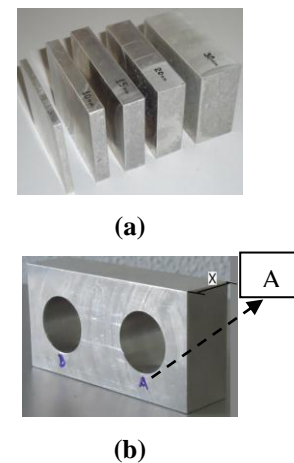


Fig. 8. (a) Peças de alumínio fundido (b) Peça de alumínio laminado com X = 25,40 mm

5.1. Repetitividade do sistema de medição

Para determinar a repetitividade do sistema de medição desenvolvido neste trabalho, utilizou-se a teoria de William Sealey Gosset, conhecida como: distribuição t de *Student*. Inicialmente, com a finalidade de determinar o Valor Verdadeiro Convencional (VVC) de cada mensurando, o

conjunto das cinco peças foi inspecionado utilizando um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm e faixa de medição de 0 – 150,00 mm. Cada medição manual com o paquímetro foi realizada três vezes seguidas e então calculada a média dos valores, de maneira a obter um resultado mais expressivo do valor real do comprimento para cada peça. Após este procedimento, cada peça foi montada na máquina e 30 medições consecutivas foram realizadas, totalizando 150 medições. A Tab. 1 apresenta os valores nominais e os valores reais de cada peça, sendo estes determinados pela média das três indicações fornecidas pelo paquímetro digital.

Diante dos Valores Verdadeiros Convencionais (VVC) de cada mensurando inspecionado e das cinco médias, calculadas a partir das 30 indicações fornecidas pelo sistema de medição para cada peça, foram determinadas as constantes aditivas para cada faixa de medição que, quando somada à indicação, compensa os *erros sistemáticos*. A distribuição das várias indicações corrigidas da peça de 5,03 mm pode ser representada graficamente pelo histograma da Fig. 9, no qual é possível perceber a variação em torno do valor médio corrigido.

Tabela 1. Valores nominais e valores reais das peças usinadas.

Valor Nominal	Valor Real
5,00 mm	5,03 mm
10,00 mm	10,04 mm
15,00 mm	14,99 mm
20,00 mm	19,89 mm
30,00 mm	29,98 mm

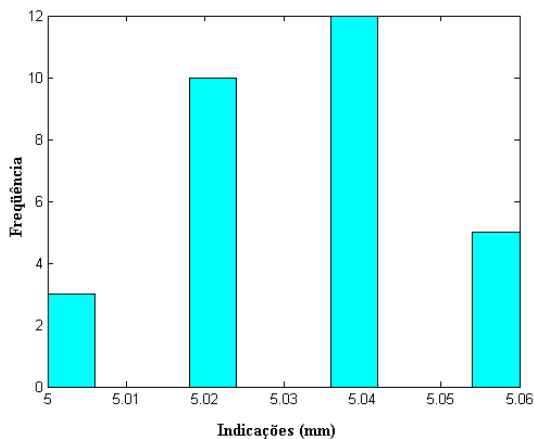


Fig. 9. Histograma representando as 30 indicações da peça de 5,03 mm

Como se pode perceber no histograma citado anteriormente, as variações ocorrem de maneira aleatória, ficando difícil prever qual seria exatamente o valor da 31ª indicação se uma nova medição fosse efetuada.

Com a finalidade de determinar a faixa dentro da qual o erro aleatório é esperado, foi calculada a repetitividade do sistema de medição para uma probabilidade de 99,00 %, sendo esta determinada pelo produto do desvio-padrão (σ) com o respectivo coeficiente *t* de Student. A repetitividade encontrada foi de 50 μ m. Determinada a repetitividade, foram encontrados os limites superior e inferior de controle (LSC e LIC). O gráfico da Fig. 10 apresenta o

comportamento das 30 medições consecutivas para peça de 5,03 mm, bem como o LSC e LIC.

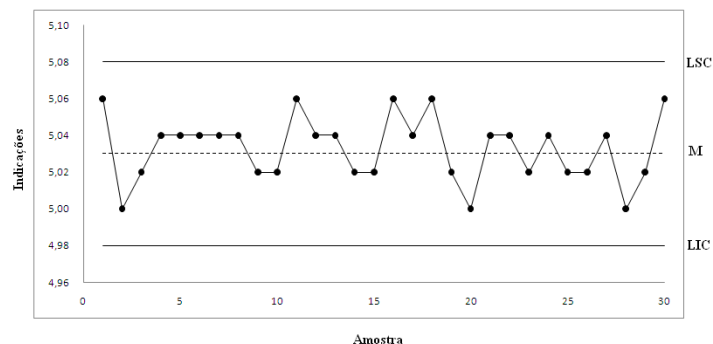


Fig. 10. Gráfico de controle da peça com dimensão x = 5,03 mm

Como mencionado no início do tópico corrente, foram inspecionadas as cinco peças de alumínio fundido, porém até o presente momento as atenções foram voltadas apenas para os resultados referentes à peça de 5,03 mm. Levando em consideração que o mesmo procedimento foi realizado para as demais peças, a Tab. 2 apresenta os valores da repetitividade, LSC e LIC para as outras peças.

Tabela 2. Valores referente às medições das peças de alumínio fundido.

	5,03mm	10,04mm	14,99mm	19,89mm	29,98mm
Re	50 μ m	40 μ m	50 μ m	50 μ m	50 μ m
LSC	5,08mm	10,08mm	15,04mm	19,94mm	30,03mm
LIC	4,98mm	10,00mm	14,94mm	19,84mm	29,93mm

5.2. Repetitividade do apalpador

Para realização do ensaio de repetitividade do apalpador, foram estabelecidas condições de operação que minimizasse as influências da máquina sobre o processo de medição. Neste caso, o referido experimento tinha como objetivo realizar medições de maneira que a máquina se movimentasse o mínimo possível em torno do seu eixo, para que a repetitividade do apalpador fosse bem mais evidenciada, ou seja, os erros e/ou efeitos da máquina fossem minimizados.

A fim de verificar tal parâmetro, foram realizadas medições no furo “A” da peça de alumínio laminado (Fig. 8b), uma vez que este apresentava um diâmetro um pouco maior que a esfera do apalpador, fazendo com que a máquina se deslocasse em um curto espaço. É importante destacar que este procedimento não tinha como objetivo medir o diâmetro do furo, e sim caracterizar o nível de dispersão do apalpador, a repetitividade.

Para caracterizar a repetitividade do probe, foram realizadas 30 medições sucessivas. De posse das 30 indicações, foi empregado o mesmo método de avaliação utilizado no experimento anterior, com uma probabilidade de 99,00 %. O histograma da Fig. 11 apresenta as ocorrências das 30 indicações. Para este caso, a repetitividade encontrada foi de 30 μ m.

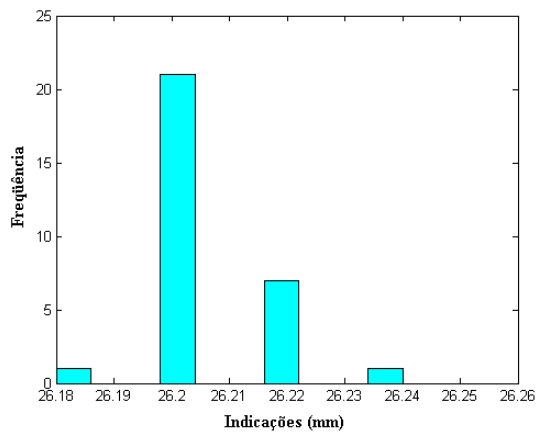


Fig. 11. Histograma representando as 30 indicações da medição do Furo A

A Fig. 12 apresenta o gráfico de controle referente à medição do furo A, no qual estão indicados: LSC, LIC e as 30 indicações.

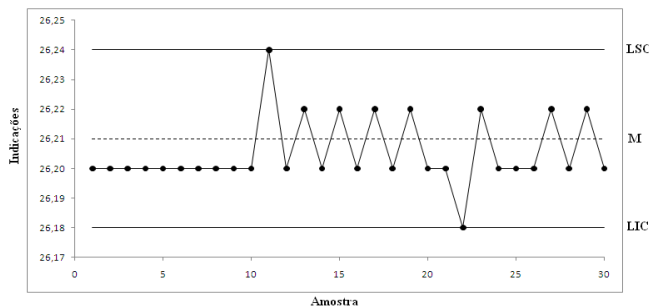


Fig. 12. Gráfico de controle (Furo A)

5.3. Reprodutibilidade (operadores distintos)

Com a finalidade de analisar a influência de operadores distintos no sistema de medição desenvolvido, um procedimento experimental foi realizado. Neste procedimento dois operadores foram envolvidos, e cada um deles realizou 30 medições repetidamente na peça com dimensão real de 5,03 mm. Com base nos valores das indicações obtidas para a peça supracitada e utilizando o mesmo método de avaliação empregado nos procedimentos das seções anteriores, a Tab. 3 foi construída.

Tabela 3. Valores referente aos dois operadores (Peça de 5,03 mm).

	Operador 1	Operador 2
Re	50 μ m	50 μ m
LSC	5,08 mm	5,07 mm
LIC	4,98 mm	4,97mm

Com os valores da Tab. 3, o gráfico de controle para o referido comprimento foi construído e pode ser observado na Fig. 13. As linhas correspondentes a cada operador são representadas por cores diferentes: a cor preta evidenciando as indicações do operador 1 e cor azul as indicações do operador 2.

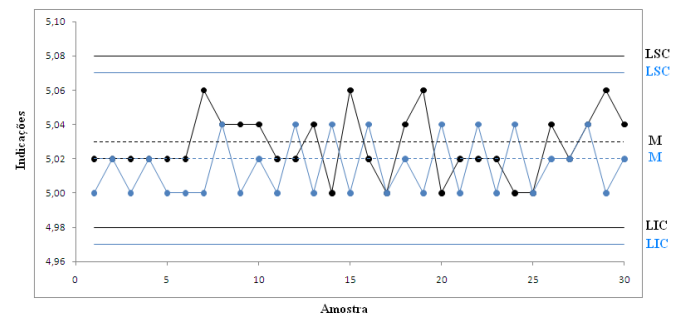


Fig. 13. Reprodutibilidade com operadores distintos (Peça de 5,03 mm)

5.4. Estabilidade em longo prazo

Com o objetivo de avaliar a estabilidade de longo prazo do sistema medição desenvolvido, uma série de medições foram executadas em 6 dias distintos. De acordo com Guerra e Coelho [4], as cartas de controle de média amplitude são bastante indicadas para este tipo de análise, com isso, este método foi empregado neste ensaio.

O ensaio foi realizado com as peças de valores reais de 5,03 e 29,98 mm, sendo cada uma inspecionada por cinco vezes consecutivas nos dias mencionados. O período entre os dias de medições foram planejados a fim de analisar a variação das médias e amplitudes entre tempos mais longos e mais curtos. Ao final do experimento diário os resultados foram registrados e calculados os valores de média e amplitude para cada conjunto de medições, como mostra a Tab. 4. Todos os dados da Tab. 4 estão em mm.

Tabela 4. Valores de médias e amplitudes das peças inspecionadas.

Dias	Peça de 5,03 mm		Peça de 29,98 mm	
	Média	Amplitude	Média	Amplitude
1	5,04	0,04	29,98	0,04
2	5,00	0,04	30,01	0,02
3	5,03	0,02	29,99	0,04
4	5,02	0,06	29,99	0,04
5	5,03	0,02	30,00	0,02
6	5,01	0,04	29,99	0,06

Com os resultados apresentados na Tab. 4 foi calculada a média das médias e a média das amplitudes, referentes a cada peça. Estes resultados foram utilizados para determinar os limites de controle das cartas de médias (CM) e das cartas de amplitudes (CA), para cada mensurando, em mm, como pode ser observado na Tab. 5.

Tabela 5. Valores de LSC e LIC para CM e CA.

	Peça de 5,03 mm		Peça de 29,98 mm	
	CM	CA	CM	CA
LSC	5,04	0,08	30,01	0,08
LIC	5,00	0,00	29,97	0,00

De posse dos valores da Tab. 5, foram traçados as cartas de controle para os dois comprimentos. Estas são representadas pelas Fig. 14 e 15, respectivamente.

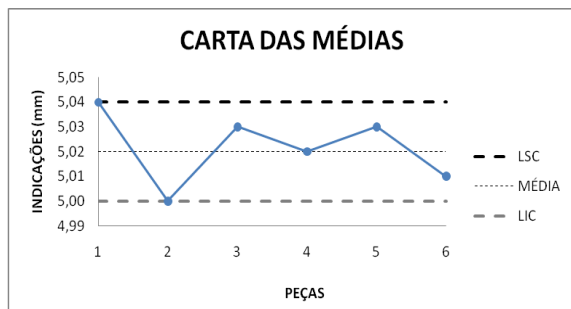


Fig. 14. Carta das médias: Peça com valor real de 5,03 mm

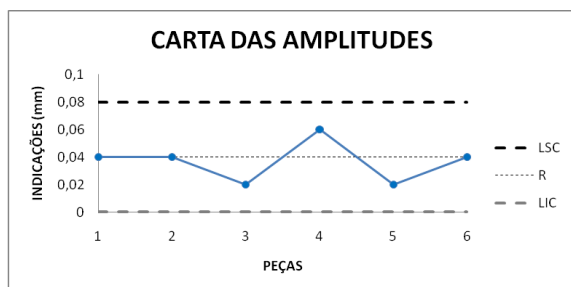


Fig. 15. Carta das amplitudes: Peça com valor real de 5,03 mm

6. CONCLUSÕES

No ensaio de repetitividade do sistema de medição, verificou-se que a variabilidade máxima dos resultados das indicações assumiu um valor de 60 μm , no qual este último corresponde a três pulsos do encoder. Isso significa dizer que para alcançar menores variações entre as indicações, um encoder com mais divisões seria uma solução. Além disso, o maior valor de repetitividade apresentada foi de aproximadamente 50 μm .

No ensaio de repetitividade do apalpador foi possível verificar que este parâmetro é menor 20 μm , quando comparado com a repetitividade do sistema de medição. Este fato era esperado, pois na aplicação do sistema de medição estão incluídas as incertezas tanto da máquina quanto do apalpador, além da incerteza do sistema de aquisição de dados (encoder).

Com o ensaio de reprodutibilidade entre operadores distintos foi possível verificar uma influencia insignificante dos operadores. Este fato também era esperado, tendo em vista que o sistema de medição é automatizado. Podemos mencionar tal evento como sendo uma vantagem, uma vez que se este mesmo procedimento fosse realizado com instrumentos de medição convencionais (por exemplos: paquímetro e micrômetro) isso poderia não acontecer.

No ensaio de estabilidade de longo foi possível atestar que o sistema e/ou processo de medição se tornou estável no período avaliado, uma vez que as cartas de controle não apresentaram tendências que indique a presença de alguma causa de variação especial. Além de todas as indicações se encontrarem dentro dos limites de controle estabelecidos.

Diante do exposto, pode-se concluir que o sistema de medição desenvolvido apresentou as características metrológicas aceitáveis para um sistema de baixo custo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal da Paraíba (UFPB), ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte ao referido projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Albertazzi, A. R. Sousa, “*Fundamentos da Metrologia Científica e Industrial*”. 1 ed. Barueri, SP, Manole, 2008.
- [2] M. A. M. Bueno, “*Sensores Eletrônicos para uso em Máquinas de Medir por Coordenadas*”, Metrologia e Instrumentação, Ano 6, Nº 52, Fevereiro/Março, 2008.
- [3] RENISHAW PLC, Metrology Division, New Mills, Technical Literature “*Innovations in Touch Trigger Probe Sensor Technology*”, disponível em: <http://www.renishaw.com>, acessado em: 15 de janeiro de 2010.
- [4] M. D. Guerra, R. T. Coelho “*Development of a low cost Touch Trigger Probe for CNC Lathes*”. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 179, pp 117 - 123, 2006.
- [5] T. L. Rolim, “*Sistemática Indicadora de Método para Calibração de Máquina de Medição por Coordenadas*”, Tese de Doutorado (PPGEM), João Pessoa, PB, Brasil, 2003.
- [6] Shen, S. Moon, “*Error Compensation of Coordinate Measurements in Computer-Integrated Manufacturing using Neural Networks*”. J. Mater. Vol. 61, pp. 12-17, 1996.
- [7] A. Weckenmann, T. Estles, G. Peggs, “*Probing Systems in Dimensional Metrology*”, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 53, Pag. 657-684, 2004.
- [8] A. J. Abackerli, A. L. Gomes, “*Aplicação de Ferramentas Estatísticas para Avaliar o Desempenho de Apalpadores de MMCs*”, Universidade Metodista de Piracicaba, 2008.