



## SISTEMA DE MEDIÇÃO SEM CONTATO PARA INSPEÇÃO DE DIÂMETRO DE PEÇAS NO PROCESSO DE USINAGEM EM UM TORNO MECÂNICO

Rafael Franklin Alves Silva<sup>1</sup>, Luiz Henrique Melo Silva Nóbrega<sup>2</sup>, Verílton Nunes da Silva<sup>3</sup>, Erick Vagner Cabral de Lima Borges<sup>4</sup>, José Carlos de Oliveira Custódio<sup>5</sup>, Fábio de Andrade Barroso<sup>6</sup>, João Bosco de Aquino Silva<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Brasil, rafael.falves@hotmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Brasil, rikinobrega@hotmail.com

<sup>3</sup> Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Brasil, verilton@yahoo.com.br

<sup>4</sup> Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Brasil, erickvagnerr@gmail.com

<sup>5</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), carloscustodio@globo.com

<sup>6</sup> Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Brasil, fabiopb@ibest.com.br

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

**Resumo:** Este trabalho refere-se ao projeto e desenvolvimento de um sistema de medição sem contato de baixo custo, para inspeção de diâmetros de peças durante o processo de usinagem, em um torno mecânico. O sistema utiliza um sensor óptico de presença para realizar a varredura na peça e um *encoder* rotativo incremental para monitorar o deslocamento do sensor óptico. Ao final da operação de inspeção o diâmetro do mensurando é indicado em um *display* e transmitido ao computador pelo padrão de comunicação serial RS-232. Testes com o sistema de medição desenvolvido foram realizados em laboratório a fim de determinar a repetitividade e reprodutibilidade para operadores distintos. Com base nos experimentos realizados com o sistema de medição sem contato, verificou-se que o mesmo proporcionou maior produtividade, melhor ergonomia ao operador, menor tempo de operação e menor custo do processo.

**Palavras chave:** medição sem contato, medição de diâmetro, sensor óptico.

### 1. INTRODUÇÃO

Com o advento das máquinas-ferramenta comandadas numericamente por computador (CNC), bem como, a demanda por usinagem a alta velocidade e alta exatidão é importante o desenvolvimento de sistemas de medição capazes de garantir as tolerâncias especificadas no projeto das peças a serem usinadas. Os sistemas de medição são de extrema importância para os mais diversos processos produtivos atuais. A evolução tecnológica, a exigência por produtos de qualidade cada vez mais elevada, e a constante luta das empresas contra o desperdício durante o processo de fabricação dos produtos, tem motivado muitos pesquisadores a estudar, desenvolver e aperfeiçoar métodos de controle metrológico para os processos produtivos.

Com a evolução da automação, passou-se a ter um maior controle da planta industrial, possibilitando mais flexibilidade do processo produtivo, resultando assim, em menor custo e maior eficiência produtiva, pois há a possibilidade de realizar correções on-line. No caso dos

processos de usinagem, para o sistema de controle agir com eficácia é necessário ter um bom sistema de retroalimentação (*feedback*), isso significa que o sistema de medição deve apresentar certas características ao nível esperado, como: tempo de medição, incerteza, exatidão, resolução e repetitividade.

Métodos de inspeção automatizados são ditos como soluções para a crescente demanda por peças de alta qualidade e com custos menores. Estes métodos devem ser capazes de controlar a conformidade das peças em relação às dimensões especificadas no projeto, durante o processo de usinagem, e fornecer uma retroalimentação (*feedback*) necessários as correções [1].

Os sistemas de medição automáticos podem ser divididos em dois principais grupos: os com contato e os sem contato. Os sistemas de medição com contato são caracterizados por emitir um sinal binário como resultado do contato sensor-peça. Estes sistemas apresentam boa repetitividade, tendo em vista que os mesmos não são afetados pela iluminação do ambiente, porém, existe uma impossibilidade de realizar inspeções de peças em superfícies reduzidas e de difícil acesso, além da sua baixa velocidade de medição [2]. Os sistemas sem contato, principalmente os ópticos, apresentam algumas vantagens consideráveis em relação aos sistemas com contato, como, alta exatidão de medição, sem-contato com a peça, alta velocidade de captura de informações da medição, etc., por isso são amplamente usadas para inspecionar o diâmetro de peças durante a fabricação [3].

A luz como meio de medição proporciona uma série de vantagens. A total ausência de contato entre o mensurando e o sistema de medição resulta em uma técnica de medição não invasiva, em que não ocorrem perturbações no mensurando provocados pelo sistema de medição. Outro aspecto positivo é a velocidade de medição que, literalmente, ocorre “na velocidade da luz”, tornando possíveis medições extremamente rápidas e, inclusive, a medição de peças em movimento [4].

O presente artigo tem como objetivo apresentar o projeto e desenvolvimento de um protótipo de sistema de medição sem contato de baixo custo para medição do diâmetro de

peças no processo de usinagem em um torno mecânico. Realizar testes em ambiente de usinagem com o sistema desenvolvido, a fim de obter suas características metrológicas.

## 2. METODOLOGIA

O sistema proposto neste trabalho consiste, basicamente, de um sensor de presença, um sistema eletromecânico, um sensor de deslocamento e um microcontrolador PIC16F877 para gerenciar todo o sistema.

### 2.1. Sensor de presença

Para detectar a peça foi utilizado um sensor óptico de presença do tipo barreira de luz. Segundo Thomazini e Albuquerque [5] sensor óptico de detecção por barreira de luz ou transmissivo, possui o emissor e o receptor montados em corpos separados. Ao serem alinhados os dois componentes criam entre si uma barreira de luz. A presença de um objeto interrompendo essa barreira faz com que o sensor seja ativado, ver Fig. 1.

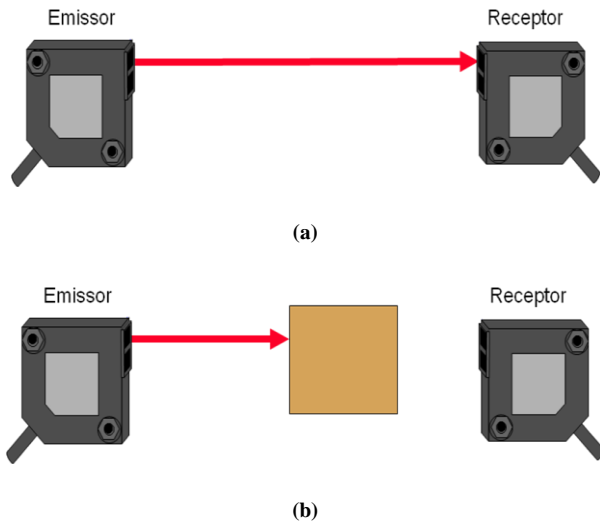


Fig. 1. (a) Sensor óptico por barreira de luz (b) Objeto interrompendo o feixe de luz

O sensor desenvolvido é constituído de um diodo emissor de laser, com sua respectiva lente para colimação do feixe, um filtro óptico e um fotodiodo receptor, todos encapsulados em uma estrutura no formato de “C”, como ilustra a Fig. 2. O feixe de luz teve seu diâmetro limitado e direcionado para o fotodiodo, formando uma barreira de luz no topo da fenda.

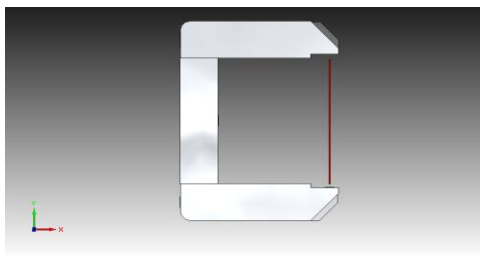


Fig. 2. Configuração do sensor de presença

Com a finalidade de obter uma melhor repetitividade para o sistema de medição, foi utilizado um comparador de tensão de alta velocidade, o *LT1016*. Este comparador apresenta um tempo de subida de 10 ns resultando em uma menor possibilidade de perda de pulsos do *encoder* e, conseqüentemente, um menor erro sistemático, uma medida mais exata do diâmetro da peça e um tempo de resposta mais rápido do sensor de presença.

Para realizar a medição do diâmetro é necessário que o feixe de luz do sensor óptico percorra a peça no sentido transversal da mesma. O deslocamento do sensor é executado pelo sistema eletromecânico.

### 2.2. Sistema eletromecânico

A estrutura mecânica para o deslocamento do sensor foi projetada com o auxílio da versão acadêmica do *software Solid Edge ST2*® da Siemens, esta estrutura é composta por uma base retangular, tracionada por um fuso trapezoidal com o passo de 4 mm e guiado por dois eixos de aço retificado. O acionamento do fuso para a movimentação da base se dar por meio de um motor de corrente contínua, com tensão nominal de 12 V. Como a haste do sensor de presença está fixada na base, o movimento de rotação do fuso é transformado em movimento linear do sensor supracitado. A montagem do projeto é ilustrada na Fig. 3.

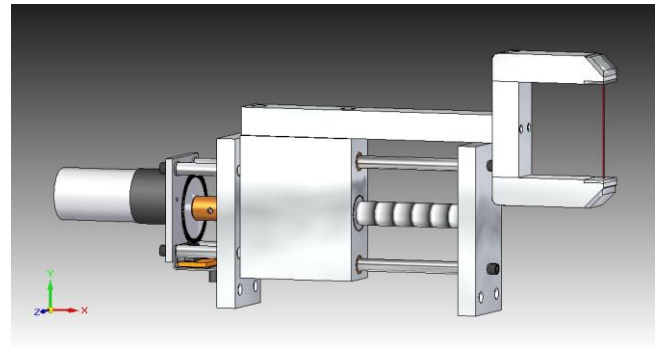


Fig. 3. Montagem do protótipo do sistema eletromecânico

O elemento responsável por monitorar o deslocamento da base é um *encoder* rotativo incremental. Este elemento é composto por uma chave óptica de dois canais e um disco com 1200 divisões. Os sinais de onda quadrada gerados pelo *encoder* são defasados de 90°. Para cada revolução do *encoder* tem-se 1200 pulsos, e utilizando uma configuração com portas lógicas é possível dobrar a quantidade de pulsos de *encoder*. Os sinais de onda quadrada defasados de 90° e o circuito digital para multiplicação da quantidade de pulsos podem ser observados nas Fig. 4 e Fig. 5, respectivamente.

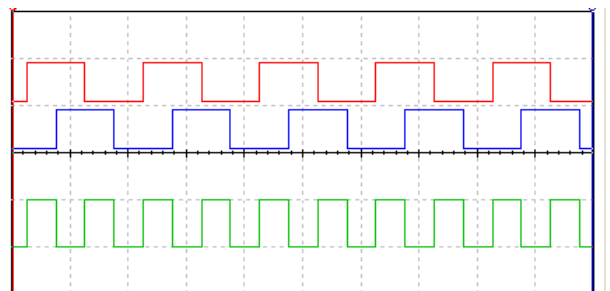


Fig. 4. Onda quadrada gerada pelo *encoder*

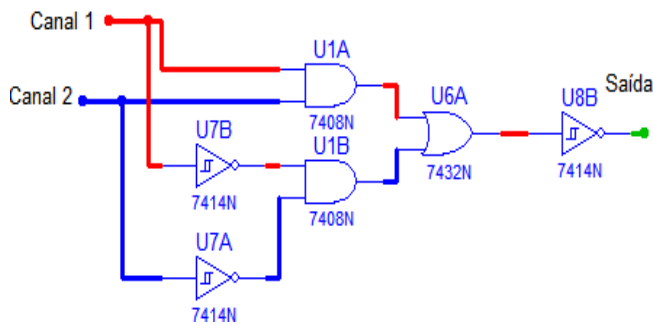


Fig. 5. Circuito digital para dobrar os pulsos do *encoder*

O resultado do deslocamento do sensor durante a detecção da peça é apresentado como o diâmetro.

Os pulsos do *encoder* e o sinal do sensor de presença são enviados para o microcontrolador, mas antes cada sinal é tratado para ter um tempo de subida e de descida mais rápidos. No microcontrolador são realizadas as operações de conversão de pulsos em deslocamento, compensação de erros sistemáticos, exibição do valor da medição em um display, comunicação serial com um computador via RS-232 e a introdução de comandos pelo operador via botões.

A utilização do controlador *PIC* é justificada por este ser um componente de baixo custo, quando comparado a outras tecnologias, possuir um baixo consumo de energia e ser dotado de uma inteligência programável. Este dispositivo é bastante utilizado para o controle de processos lógicos através de suas entradas e saídas, e internamente dispõe de todos os dispositivos típicos de um sistema microprocessado, como por exemplo: CPU, memória ROM, memória RAM e memória EEPROM, além de outras funções específicas, tais como: contador, conversor analógico-digital, *timers*, gerador PWM, entre outras.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após as etapas de desenvolvimento e instrumentação do sistema de medição, foram realizados ensaios experimentais com o objetivo de determinar as características metrológicas do mesmo. Para realização dos ensaios supracitados, usinaram-se três peças cilíndricas com os seguintes diâmetros nominais e materiais: 21,95 mm (aço), 18,00 mm (bronze) e 11,83 mm (*nylon* preto). O valor nominal do diâmetro de cada uma das peças foi obtido medindo-se três vezes consecutivas, com um paquímetro digital de resolução 10  $\mu\text{m}$ , e então calculada a média destes valores. O valor médio de cada diâmetro foi definido como sendo o VVC (Valor Verdadeiro Convencional). A Tab. 1 apresenta os valores nominais e os valores reais, sendo estes últimos determinados pela média dos valores obtidos pelo sistema de medição desenvolvido nesta pesquisa. A Fig. 6 ilustra o sistema de medição desenvolvido e as peças utilizadas nos experimentos.



Fig. 6. Sistema de medição e peça utilizadas nos experimentos

Tabela 1. Valores nominais e reais dos diâmetros

Peça	Valor nominal do diâmetro (VVC)	Valor real do diâmetro (medido pelo sistema)	Erro ( $\mu\text{m}$ )
Aço	21,95 mm	21,81 mm	141
Bronze	18,00 mm	17,84 mm	161
Nylon	11,83 mm	11,76 mm	67

#### 3.1. Repetitividade do sistema de medição

Para determinar a repetitividade do sistema de medição, foi utilizada a teoria de William Sealey Gosset, conhecida como: distribuição t de *Student*. Este parâmetro foi estimado realizando 25 medições em cada uma das peças com o sistema sem contato. Diante do VVC de cada mensurando e das médias das indicações, foram calculados os valores das constantes sistemáticas que, quando somada às indicações, compensa a parcela previsível do erro.

Com a finalidade de determinar a faixa de valores dentro do qual o erro aleatório é esperado, calculou-se a repetitividade do sistema de medição para uma probabilidade de 99%. Esta foi determinada como sendo o produto do desvio padrão pelo coeficiente de *Student*. Diante dos valores de repetitividade, foram estimados os limites superior e inferior de controle para cada grupo de medições. Os valores de repetitividade e os limites de controle para as peças de diâmetros distintos são apresentados na Tab. 2. As Fig. 7, 8 e 9 apresentam os respectivos gráficos de controle com a variabilidade das indicações.

Tabela 2. Valores referentes às medições das três peças com diâmetros distintos

	Peça de Aço	Peça de Bronze	Peça de Nylon
Re	0,02 mm	0,02 mm	0,01 mm
LSC	21,97 mm	18,02 mm	11,84 mm
LIC	21,93 mm	17,98 mm	11,82 mm

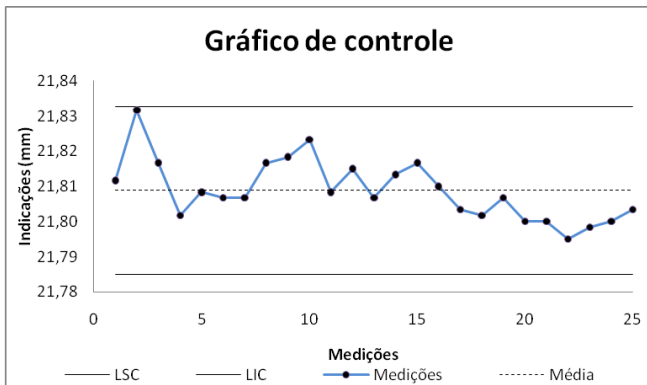


Fig. 7. Gráfico de controle para peça com diâmetro de 21,95 mm

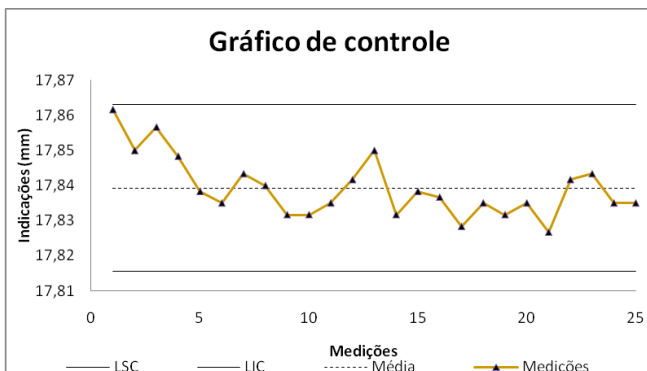


Fig. 8. Gráfico de controle para peça com diâmetro de 18,00 mm

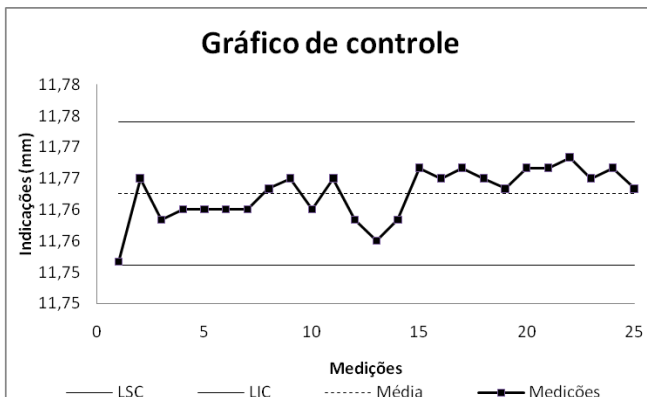


Fig. 9. Gráfico de controle para peça com diâmetro de 11,83 mm

Com a finalidade de investigar a influência das diferentes cores dos materiais, citados anteriormente, nos valores do erro e da repetitividade dos resultados das medições, foram usinadas três peças com o mesmo diâmetro nominal de 11,85 mm para cada um dos materiais (aço, bronze e nylon preto). De maneira análoga ao experimento anterior, nas Tab. 3 e 4 são apresentados os valores dos erros e das repetitividade e os limites de controle para as peças com o mesmo diâmetro, respectivamente. Como descrito anteriormente, o objetivo deste procedimento experimental é a análise da variabilidade das indicações para diferentes materiais. As Fig. 10, 11 e 12 ilustram os gráficos de controle com o comportamento das indicações fornecidas pelo sistema para cada material, respectivamente.

Tabela 3. Valores nominais e reais dos diâmetros

Peça	Valor nominal do diâmetro (VVC)	Valor real do diâmetro (medido pelo sistema)	Erro ( $\mu\text{m}$ )
Aço	11,85 mm	11,77 mm	82
Bronze	11,83 mm	11,76 mm	72
Nylon	11,83 mm	11,77 mm	58

Tabela 4. Valores referentes às medições das três peças com diâmetros iguais

	Peça de Aço	Peça de Bronze	Peça de Nylon
Re	0,01 mm	0,01 mm	0,01 mm
LSC	11,78 mm	11,77 mm	11,78 mm
LIC	11,76 mm	11,75 mm	11,76 mm

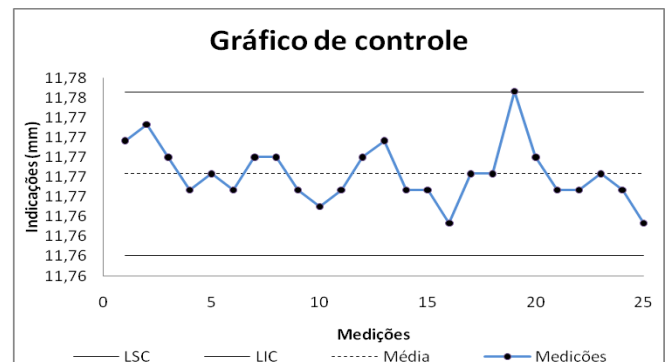


Fig. 10. Gráfico de controle para peça com diâmetro de 11,85 mm (Aço)

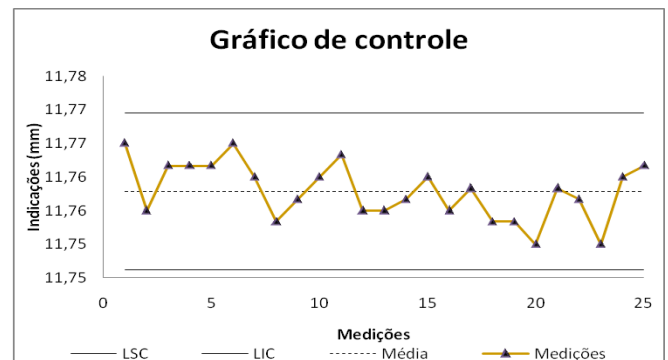


Fig. 11. Gráfico de controle para peça com diâmetro de 11,83 mm (Bronze)

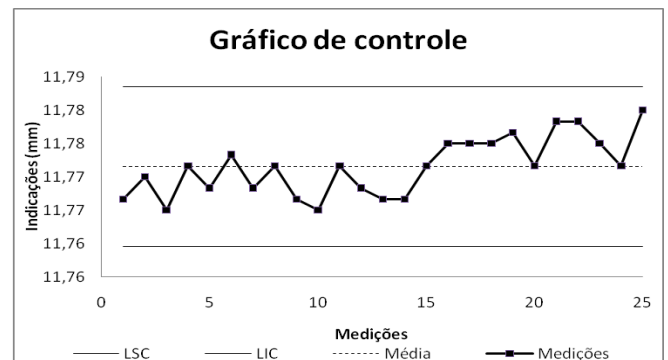


Fig. 12. Gráfico de controle para peça com diâmetro de 11,83 mm (Nylon preto)

### 3.2. Reprodutibilidade (operadores distintos)

Para analisar a influência de operadores distintos no sistema de medição sem contato, um procedimento experimental foi realizado, no qual foram envolvidos dois operadores. Cada operador realizou 15 medições consecutivas no cilindro com diâmetro de 11,83 mm. Com base nos valores das indicações obtidas para a peça e utilizando os mesmos métodos de avaliação empregados nos procedimentos anteriores, a Tab. 4 foi construída.

Tabela 5. Valores referentes aos dois operadores (Peça de 11,83 mm)

	Operador 1	Operador 2
Re	0,01 mm	0,01 mm
LSC	11,77 mm	11,78 mm
LIC	11,75 mm	11,76 mm

Com os valores da Tab. 5, o gráfico de controle para o referido ensaio foi construído e pode ser observado na Fig. 13. As linhas correspondentes a cada operador estão representadas por cores diferentes: a cor azul evidenciando as indicações do operador 1 e cor verde as indicações do operador 2. Verificou-se que não houve influência significativa nos valores obtidos pelos dois operadores o que indica que o sistema desenvolvido tem uma boa reprodutibilidade.

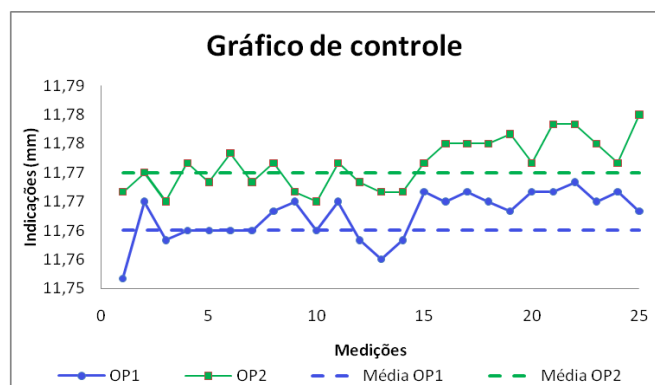


Fig. 13. Reprodutibilidade com operadores distintos (Peça de 11,83 mm)

## 4. CONCLUSÃO

Para o ensaio de repetitividade do sistema de medição com diferentes diâmetros e materiais, verificou-se que a menor valor estimado deste parâmetro foi para a peça de nylon preto, tendo em vista que este foi o menor diâmetro medido. Para verificar se este menor valor de repetitividade esta associado ao diâmetro da peça ou a sua cor, foram analisados os dados do segundo experimento, que consiste em peças com o mesmo diâmetro e cores diferentes. De acordo com os dados deste experimento foi possível verificar que a cor não é um fator que venha a influência na variabilidade das indicações, sendo assim é possível concluir que a dispersão dos valores em torno da média esta relacionado com o deslocamento do sistema mecânico.

Com o ensaio de reprodutibilidade entre operadores distintos foi possível verificar uma influência 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.

Por não necessitar que haja paradas para realizar medições, subtende-se que O tempo da operação de usinagem com o auxilio do sistema desenvolvido será menor em relação ao modo convencional de medição, que utiliza sistemas de medição com contato. Testes futuros poderão quantificar essa vantagem, além de proporcionar ao operador uma melhor ergonomia física e visual. Neste caso, não há necessidade do operador debruçar-se sobre a máquina com a intenção de evitar o erro de paralaxe, pois os resultados são apresentados em um *display*.

Em etapas futuras serão realizados outros trabalhos experimentais afim de obter outras características do sistema, como: exatidão, avaliar a repetitividade para peças com diferentes acabamentos superficiais, instalação do protótipo em um torno mecânico para avaliar o seu comportamento sob vibração da máquina e resolução.

## 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] T. Yandayan, M. Burdekin, *In-process Dimensional Measurement and Control of Workpiece Accuracy*. Int. J. Made. Tools Manufact. Vol. 37. No. 10. pp. 1423-1439. 1997.
- [2] E. C. Marinho, J. B. A. Silva, *Medição de Superfícies de Formas Livres: Um Estudo Comparativo de Medição com Contato e sem Contato para Fins de Uso de Inspeção e Engenharia Reversa*. V Congresso de Metrologia, Salvador, BA, 2009.
- [3] G.Y. Zhang, X. P. Xu, X. H. Fu, L. Yang, C. Z. Li, *The measurement and Control of Diameter in Large-scale Part Processing*. Journal of Materials Processing Technology 129, pp 653-657, 2002.
- [4] A. Albertazzi, A. Sousa, C. Pezzota, *Controle Geométrico Através da Metrologia Óptica: Chegando Onde Nenhum Outro Meio de Medição Conseguir Chegar*. Disponível em <http://www.photonita.com.br/downloads/artigo%20optica.pdf> acesso em 10/09/2010 as 14:00 h.
- [5] D. Thomazini, P. U. B. Albuquerque, *Sensores Industriais Fundamentos e Aplicações*. Editora Érica, 4 ed. São Paulo, Brasil, 2007.