

# INTERFACE ELETRÔNICA E COMPUTACIONAL PARA MEDAÇÃO A TRÊS COORDENADAS.

## Alessandro Marques

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro – São Carlos – SP – CEP: 13566-590  
E-mail: [amarques@sc.usp.br](mailto:amarques@sc.usp.br)

## Benedito Di Giacomo

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro – São Carlos – SP – CEP: 13566-590  
E-mail: [bgiacomo@sc.usp.br](mailto:bgiacomo@sc.usp.br)

## Roberto Hideaki Tsunaki

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro – São Carlos – SP – CEP: 13566-590  
E-mail: [rtsunaki@sc.usp.br](mailto:rtsunaki@sc.usp.br)

**Resumo.** *Este trabalho apresenta os resultados de uma interface desenvolvida para Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs). Esta interface é composta de dois elementos principais. O primeiro elemento é constituído de uma placa eletrônica que realiza a leitura dos sinais das escalas e do sinal de “trigger” da sonda de medição, capturando os pontos coordenados dentro do volume de trabalho da MM3C. O segundo elemento consiste de um programa computacional que processa diversas rotinas numéricas, entre elas as rotinas da estratégia de compensação de erros utilizada e as rotinas que calculam os parâmetros dos elementos geométricos a serem medidos. O programa desenvolvido possui uma interface gráfica amigável e intuitiva, facilitando o seu próprio aprendizado e o da utilização da MM3C. Entre as características mais importantes da interface estão a possibilidade da incorporação de rotinas desenvolvidas pelo usuário e de ser um sistema totalmente aberto, permitindo o conhecimento de todos os algoritmos utilizados.*

**Palavras-chave:** Máquinas de Medir a Três Coordenadas, Programa computacional, interface eletrônica.

## 1. INTRODUÇÃO

O controle de processo e garantia de qualidade na fabricação moderna depende cada vez mais das Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs), que nos últimos anos têm substituído os equipamentos convencionais de inspeção. Com grande flexibilidade as MM3Cs podem reduzir o custo no controle de qualidade enquanto ao mesmo tempo aumentam a eficiência da inspeção.

Na metrologia convencional os elementos geométricos são na maioria das vezes medidos independentemente uns dos outros, com diferentes instrumentos de medição, utilizando-se de diferentes montagens e diferentes sistemas de referência. Por outro lado, na metrologia a três coordenadas, as medições são feitas através de ajustes de pontos coordenados em um sistema de coordenadas que pode ser colocado na peça. Por esse motivo, geralmente não é necessária mais de uma montagem e as medições podem ser feitas utilizando apenas o apalpador de medição. Desta

forma, varias características podem ser medidas durante o mesmo processo de medição (HOCKEN, 1977; NI e WÄLDELE, 1995).

As MM3Cs são sistemas complexos de medição, que possuem a capacidade de medir coordenadas cartesianas em determinado volume de trabalho. A máquina simula mecanicamente um sistema de coordenadas cartesianas capaz de gerar as coordenadas de um ponto no espaço.

As MM3Cs não têm a ação natural de medição, na verdade elas apenas tomam pontos coordenados, através das escalas e do apalpador, e enviam estes pontos a um microcomputador dedicado. A seguir, um programa computacional calcula as características da medição desejada. O programa computacional é uma das peças mais importantes no processo de medição, pois é ele que ajusta os pontos coordenados, obtidos através do toque do apalpador, a um modelo matemático em termos de parâmetros específicos de dimensão, forma e localização.

Algumas das características do sistema eletrônico e programas computacionais comerciais utilizados durante as medições são a sua inacessibilidade e rigidez. São exemplos clássicos destas características a impossibilidade de se conhecer em profundidade os métodos de ajustes utilizados na definição das grandezas nem a sua escolha ou modificação pelo usuário.

Este trabalho apresenta os resultados de uma interface desenvolvida para Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs) que torna possível quebrar a rigidez descrita anteriormente. Esta interface é composta de dois elementos principais. O primeiro elemento é constituído de uma placa eletrônica que realiza a leitura dos sinais das escalas e do sinal de “trigger” da sonda de medição, capturando os pontos coordenados dentro do volume de trabalho da MM3C. O segundo elemento consiste de um programa computacional que processa diversas rotinas numéricas, entre elas as rotinas da estratégia de compensação de erros utilizada e as rotinas que calculam os parâmetros dos elementos geométricos a serem medidos. O programa desenvolvido possui uma interface gráfica amigável e intuitiva, facilitando o seu próprio aprendizado e o da utilização da MM3C. Entre as características mais importantes da interface estão a possibilidade da incorporação de rotinas desenvolvidas pelo usuário e de ser um sistema totalmente aberto, permitindo o conhecimento de todos os algoritmos utilizados.

A interface desenvolvida foi testada numa MM3C do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC/USP, permitindo validar e avaliar o seu desempenho. Atualmente, a interface vem sendo utilizada cotidianamente no Laboratório de Metrologia deste departamento, substituindo os programas e interface eletrônica originais da máquina.

A seguir são descritos em detalhes a interface eletrônica e o programa desenvolvidos.

## 2. INTERFACEAMENTO ELETRÔNICO

Os programas computacionais que são utilizados pelas MM3Cs não podem ser modificados pelo usuário. Por isso, foi preparado um sistema cujo esquema pode ser visto na Figura 1. Nessa Figura pode-se observar a MM3C, sua Unidade Central de Processamento (CPU) e as ligações que foram necessárias para a aquisição dos valores das réguas e do apalpador de medição.

O sistema implementado tem como função capturar, através de uma saída A *quad* B, e enviar para um microcomputador, o sinal das três escalas da MM3C, antes que este sofra qualquer influência da CPU da MM3C. O microcomputador que recebe o sinal tem uma placa de aquisição, que será detalhada no item 2.1, confeccionada exclusivamente pra este fim.

Ainda na Figura 1, pode-se ver dois cabos entrando no microcomputador, um possui os sinais A *quad* B das réguas óticas e o outro, o sinal de *trigger* do apalpador de medição.

Os sinais, tipo A *quad* B, das réguas óticas são enviados para a CPU da MM3C, e são A<sub>x</sub> e B<sub>x</sub>, A<sub>y</sub> e B<sub>y</sub> e A<sub>z</sub> e B<sub>z</sub> referentes as coordenadas X, Y e Z respectivamente. Uma saída A *quad* B foi construída na CPU da MM3C para adquirir esses sinais.

O microcomputador equipado com a placa de aquisição, e o programa computacional MaqMed 2000 recebe os sinais A *quad* B. O sinal do apalpador de medição (sinal de trigger) passa por uma interface comercial da Renishaw, Probe Interface PI4-2, e é enviado para um controlador (ver diagrama esquemático na Figura 2) que ajusta, a largura de pulso t. Após testes experimentais feitos

com auxílio de instrumentação adequada constatou-se que o valor  $t$  deveria ser igual a 70ms, para que houvesse o gatilhamento, na placa de aquisição.

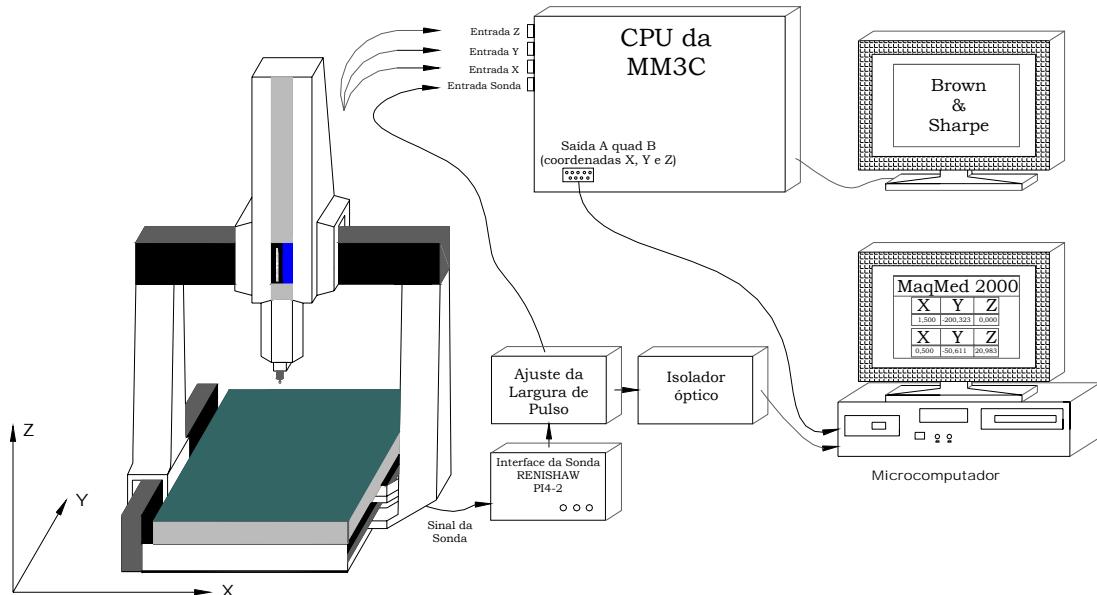


Figura 1. Descrição do Sistema

O sinal de *trigger*, depois de ajustado pelo controlador de largura de pulso, percorre dois caminhos: um que vai até a CPU da MM3C e outro que vai para um isolador ótico e para o microcomputador. O isolador ótico é utilizado para que haja uma proteção elétrica entre a MM3C e a placa.

Com os sinais X, Y e Z das réguas óticas e o sinal de *trigger* do apalpador de medição disponíveis no microcomputador, pode-se fazer qualquer tipo de manipulação numérica ou computacional.

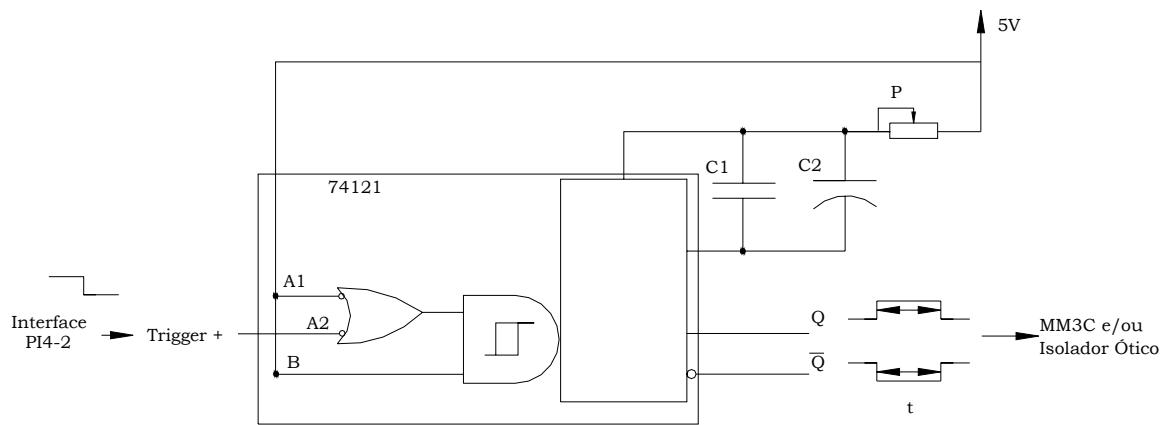


Figura 2. Diagrama esquemático do gerador de largura de pulso

## 2.1. Placa de Aquisição

A placa de aquisição que recebe os sinais da régua ótica é composta por dois dispositivos principais, um CPLD (Dispositivo Programável para Lógica Complexa) da marca Altera tipo EPF7128, e um microcontrolador PIC 16C64 (ENCINAS e MOREIRA, 1999). Tal placa foi

confeccionada pela T&S Equipamentos Eletrônicos projetada para a leitura dos sinais em quadratura das escalas dos três eixos da MM3C, além do “congelamento” destas leituras quando um sinal do apalpador for enviado. Esta placa é conectada ao barramento ISA de um microcomputador, responsável pelo controle do sistema e visualização da leitura, através de um programa desenvolvido em *Borland Delphi<sup>TM</sup>* versão 6.0.

A placa foi projetada para a medição em eixos de comprimento máximo de 1m nesta resolução (19 bits). O comprimento do maior eixo da MM3C, que é o Y, é de 406mm, com uma resolução de 2  $\mu\text{m}$ , portanto é suficiente realizar a medição de cada um dos 3 eixos desta máquina. Cada eixo envia dois sinais em quadratura (A *quad* B) para a placa, a qual deve realizar a contagem e repassar estes dados para o computador que hospeda esta placa.

Para uma velocidade máxima de deslocamento em um eixo desta máquina o período do sinal de quadratura não deve ser inferior a 40 $\mu\text{s}$ , o que significa uma frequência máxima de contagem de 25KHz, capacidade suportada pela placa. Além disto, a placa é dotada de um *buffer FIFO (First Input First Output)* de 20 posições para não haver nenhuma perda de contagem na velocidade máxima.

O microcomputador que hospeda a placa deverá ler a posição dos três eixos, simultaneamente e em qualquer instante. Tal leitura deverá ser realizada com mínimo atraso, a partir do sinal de *trigger* externo que é gerado pelo apalpador de medição.

A principal vantagem desta placa é o seu projeto otimizado especificamente para esta máquina e para o desenvolvimento dos programas computacionais, objetivos deste trabalho. Para tanto, o projeto da placa também envolve a especificação de bibliotecas de vínculo dinâmico (DLLs) com todas as funções necessárias para a implementação e programação dos algoritmos aqui desenvolvidos, testados e validados experimentalmente.

### 2.1.1. Arquitetura da Placa

A Placa Contadora foi confeccionada de acordo com as funções previamente preestabelecidas, e são as seguintes: uma função *Quad Decoder* para mostrar a direção e a velocidade do deslocamento; um Contador *Up-Down* para localizar a posição medida; um Supervisor de *Trigger* Externo para congelar e armazenar a posição quando acontecer o gatilhamento do apalpador de medição; um armazenador de posição e um dispositivo para calcular a velocidade de deslocamento. Assim sendo, foi utilizada a arquitetura da Figura 3 para execução destas tarefas. Três destes circuitos foram confeccionados, um para cada eixo.

Um contador em um típico CPLD usa um ou dois blocos lógicos por *bit*. Como existem três contadores com 19 *bit*, são utilizados pelo menos 57 blocos lógicos para construir estes contadores, além disso, são necessários outros blocos lógicos para realizar outras tarefas. Para simplificar o projeto os blocos lógicos de um CPLD foram programados para implementar todos estes contadores e estas tarefas.

Toda a lógica do sistema pode ser dividida em três “processadores” organizados em diferentes níveis de hierarquia. O *PreScaler* faz o processamento a nível de *bit* (*Quad Decoder*) e modifica o tamanho do contador para um valor apropriado para que o microcontrolador o possa acompanhar. O contador, além da contagem, guarda a posição desta contagem em um *Buffer FIFO*. O microcontrolador controla toda a comunicação com o microcomputador e esse faz as tarefas de nível mais alto, tais como, a interface usuário-máquina, processamentos mais complexos e armazenamento permanente de dados.

O *PreScaler* foi construído usando o CPLD Altera EPF7128. Devido ao fato da implementação do *PreScaler* ser feita usando poucos *bits*.

Para o controle dos contadores foi utilizado um microcontrolador PIC 16C64 com frequência de *Clock* de 4MHz. Uma estimativa obtida através de simulação mostrou a necessidade de executar 3500 instruções entre duas leituras do *PreScaler*. Assim um *PreScaler* de 8 *bits* é suficiente, pois trabalha com um período de leitura de  $40\mu\text{s} \times 2^{8-1} = 5,12 \text{ ms}$ , podendo assim executar 5120

instruções. A contagem é implementada usando uma palavra de 24 bits e enviado byte a byte para o microcomputador, usando Transmissão Paralela (*Parallel Slave Port* ou PSP).

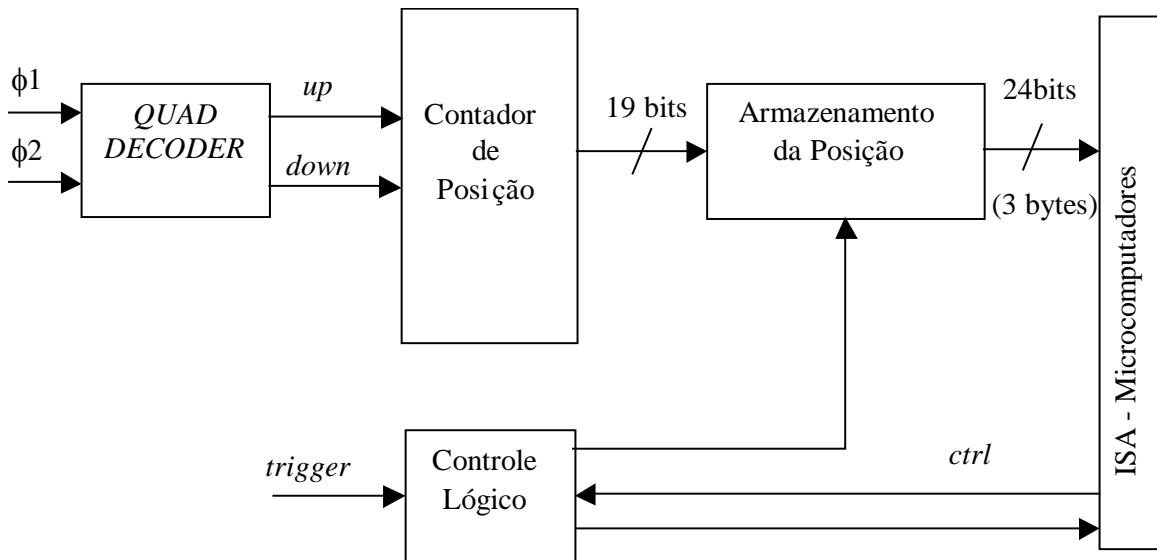


Figura 3. Arquitetura do hardware

O microcomputador recebe estas informações através do barramento de dados ISA, onde a placa é conectada. Um programa computacional tem acesso aos dados da forma mais conveniente, que é através de funções implementadas em uma DLL.

O microcomputador controla o *software* contador e é responsável por alguns comandos, tais como: zerar o microcontrolador, limpar os contadores, tanto o de *hardware* como o de *software*, carregar os contadores dos três *PreScaler*, especificar um dos três contadores, ler o status do sistema, entre outros.

### 3. O PROGRAMA COMPUTACIONAL *MAQMED 2000*

O programa computacional utilizado na MM3C foi desenvolvido em ambiente *DELPHI<sup>TM</sup>*. A programação visual *DELPHI<sup>TM</sup>* é apropriada para a manipulação de dados e possui fácil implementação. Isso deve-se ao fato de existir uma biblioteca de componentes visuais (VCL) disponível, ou seja, o programador não precisa implementar rotinas para a construção de botões, janelas, gráficos e outros, para que o programa fique com visual agradável e de fácil utilização.

O aplicativo *MaqMed 2000* consiste em uma série de janelas e menus que convida o usuário a selecionar e desenvolver as tarefas de medição. Pode-se observar na Figura 4 algumas destas janelas.

Após o inicio do aplicativo uma janela com instruções conduz o usuário a escolher a origem do sistema de coordenadas que será utilizado como referência, movimentam-se os carros da máquina, e define-se a posição no volume de trabalho, que deve ser necessariamente a seguinte: o carro “Y” na frente da máquina, o “X” no extremo esquerdo e o braço “Z” totalmente recuado. Após colocar a máquina nessa posição, deve-se informar ao programa, através da tecla ENTER, que a origem foi definida. Um sistema de coordenadas é colocado no extremo inferior do eixo Z.

O passo seguinte é a qualificação do apalpador, ou seja, determinar a dimensão do apalpador e o diâmetro da esfera da ponta do apalpador. Isso é feito através de um procedimento que utiliza uma esfera padrão com dimensões conhecidas pelo programa computacional. Os procedimentos para qualificação do apalpador são os seguintes: o usuário deve posicionar o extremo inferior do eixo Z sobre a esfera padrão, e informar o programa, através da tecla ENTER, que foi definida a posição da esfera padrão.

O apalpador de medição, depois de inserido no braço Z da máquina, deve tomar no mínimo quatro pontos coordenados sobre a esfera padrão. Através desses pontos calcula-se as dimensões do apalpador de medição (DAM) e o diâmetro da ponta do apalpador (DPA) e o programa compensa esses valores das coordenadas medidas, ou seja, o sistema de coordenadas auxiliar será transferido para o centro da ponta do apalpador de medição.

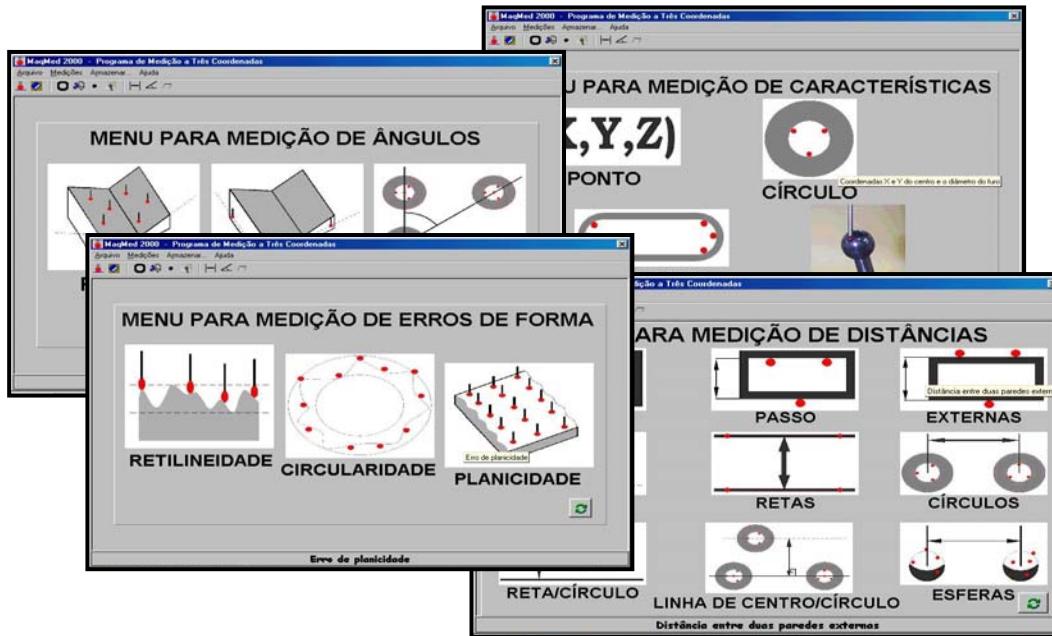


Figura 4. Telas do *MaqMed 2000*

Após a qualificação do apalpador pode ser iniciado o processo de medição de peças. O mensurando deve ser fixado sobre o desempeno da máquina e escolhe-se no menu principal o “MENU ALINHAMENTO”, este menu possui rotina para transferir o sistema de coordenadas da máquina para a peça, isto é feito para facilitar as medições.

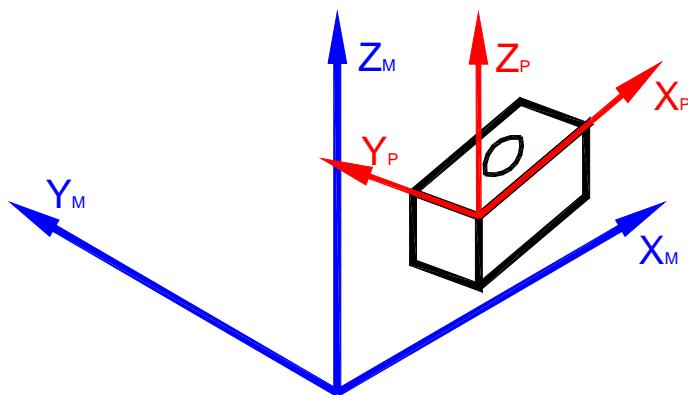


Figura 5. Sistema de coordenadas da peça e da MM3C

O procedimento de alinhamento da peça consiste na determinação da posição da peça (sistema de coordenadas  $XP$ ,  $YP$ ,  $ZP$ ) no sistema de coordenadas da máquina,  $XM$ ,  $YM$ ,  $ZM$ , Figura 5).

Gerado o alinhamento deve-se escolher o tipo de medição a ser feita, a partir da escolha do usuário, o programa executa um PROCEDIMENTO correspondente a essa opção. Tomam-se pontos na peça, utilizando o apalpador de medição, pelo menos o mínimo necessário para a definição da geometria e então o programa apresenta uma tela de resultados contendo a característica desejada. Se o número de pontos for maior que o mínimo necessário para o cálculo da característica, o desvio padrão das medições e a incerteza associada a esta medição também são mostrados na tela de resultados.

O programa desenvolvido faz a medição de círculos, oblongos, esferas, pontos, distâncias entre entes geométricos, além da medição de ângulos.

Para a medição de furos, por exemplo, deve-se escolher no menu “CARACTERÍSTICAS” o modo “CÍRCULO”. Tomar pelo menos três pontos no perfil da peça, neste caso três pontos definirão o círculo. Caso sejam tomados mais pontos o programa ajusta um círculo aos pontos, através do Método dos Mínimos Quadrados. Após ajustar os pontos a um círculo o aplicativo mostra uma tela contendo o valor do diâmetro do furo, os valores X e Y do centro em relação à origem do sistema de coordenada e o desvio padrão das medições.

#### **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Para a validação do programa computacional foi feita a colocação de pontos coordenados de entes geométricos conhecidos no programa e feita a verificação se os valores são iguais aos da geometria euclidiana. Por exemplo, toma-se um círculo perfeito e calculam-se os pontos coordenados deste círculo, estes pontos são colocados no programa *MaqMed 2000* e então, verificam-se os valores do diâmetro e das coordenadas do centro. Oferecendo variações radiais no círculo e conhecendo o erro de circularidade, verifica-se os resultados obtidos através do programa. Verificou-se que as diferenças nos resultados são devido ao algoritmo utilizado.

Na validação do sistema placa/programa computacional foi utilizado o Interferômetro Laser para medição do posicionamento da máquina e analisadas as leituras das réguas óticas.

E, finalmente, para validar todo o sistema (placa, programa computacional e apalpador de medição) foi feita a medição de uma peça padrão, pré-calibrada, em diversas posições e orientações no volume de trabalho da MM3C. Os pontos coordenados foram tratados no programa computacional que possui as rotinas de medição. Os resultados obtidos foram comparados ao valor calibrado da peça padrão e mostraram excelente concordância.

#### **5. CONCLUSÕES**

Os programas herméticos das MM3Cs não permitem ao usuário saber os cálculos que estão sendo feitos com os pontos coordenados e nem o método que está sendo usado para a compensação dos erros. O sistema desenvolvido e construído elimina esta desvantagem, tendo a possibilidade de incorporar qualquer tipo de algoritmo e permitindo a avaliação destes algoritmos em situações reais, fornecendo o embasamento para compará-los. Além disso, a possibilidade de inclusão de sistemas de compensação de erros pelo usuário permite o desenvolvimento de novas estratégias de compensação, específicas para uma determinada aplicação.

Todo o sistema construído mostrou-se confiável e eficiente, além do baixo custo para a sua implementação.

#### **6. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro para desenvolvimento desta pesquisa e à Escola de Engenharia de São Carlos pela infra-estrutura oferecida.

## 7. REFERÊNCIAS

- ENCINAS, W. S.; MOREIRA, E. "Hardware and Software Partition With Microcontrollers and CPLDs: A Case Study", Proc. International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications - PDPTA'99, pp. 3002-3008, Las Vegas, NV, 1999.
- HOCKEN, R. et al "Three Dimensional Metrology". CIRP Annals, v.26, p. 403-408, 1977.
- NI, J. and WÄLDELE, F. in BOSCH, J.A. "Coordinate Measuring Machines and Systems". New York, Marcel Dekker, Inc. 1995.

## ELECTRONIC AND COMPUTATIONAL INTERFACE FOR COORDINATE MEASUREMENT.

### **Alessandro Marques**

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro – São Carlos – SP – CEP: 13566-590  
E-mail: [amarques@sc.usp.br](mailto:amarques@sc.usp.br)

### **Benedito Di Giacomo**

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro – São Carlos – SP – CEP: 13566-590  
E-mail: [bgiacomo@sc.usp.br](mailto:bgiacomo@sc.usp.br)

### **Roberto Hideaki Tsunaki**

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro – São Carlos – SP – CEP: 13566-590  
E-mail: [rtsunaki@sc.usp.br](mailto:rtsunaki@sc.usp.br)

**Abstract:** *This research aims to exhibit the interface that copes with the system inflexibility and enables signal acquisition from the scales of the CMM, allowing the development of new computational programs. A program that uses the values of the coordinate points acquired in the CMM work volume was created. Providing the microcomputer with the X, Y and Z optical scales signals and the measuring probe triggering signal allows the user to perform any kind of numerical manipulation.*

**Keywords:** *Three Coordinate Measuring Machines (CMM), software, electronic interface.*