

## **DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA CNC COM DOIS PARES DE EIXOS PARALELOS PARA PROTOTIPAGEM**

**Augusto César Coelho Félix, droutsky@yahoo.com.br**<sup>1</sup>  
**Walter de Britto Vidal Filho, wbritto@unb.br**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Brasília, Faculdade de tecnologia, Depto Eng. Mecânica, CEP 70910-900

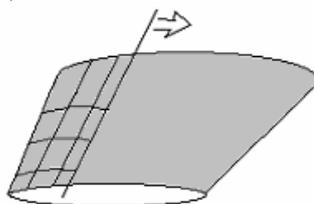
**Resumo:** *O presente artigo descreve o desenvolvimento de uma máquina CNC para prototipagem em Isopor. Apresentado a metodologia de projeto desenvolvida e as soluções adotadas. O projeto é dividido no projeto de três sistemas : Sistema mecânico, eletro-eletrônico e computacional. O sistema computacional apresentou o desafio de controle de dois pares de eixos paralelos.*

**Palavras-chave:** *CNC, metodologia de projeto, prototipagem*

### **1. INTRODUÇÃO**

A prototipagem de uma peça corresponde à fabricação de um modelo da peça para validar o projeto antes da fabricação do produto final. A prototipagem pode ser feita das formas clássicas por remoção de material (usinagem) ou por adição de material. A técnica conhecida por prototipagem rápida (PR) é comumente entendida como a combinação do processo de adição com controle e processamento computacional. Contudo alguns entendem o termo prototipagem rápida como qualquer tecnologia que pode automaticamente construir modelos físicos a partir de dados de um modelo em CAD (Palm,1998). Desta forma e segundo (Ferreira et al, 2001) apud (Mello et al, 2006) as técnicas de PR podem ser classificadas nas de remoção de material e nas de adição de material.

O presente artigo aborda o estudo e desenvolvimento de uma máquina CNC com dois pares de eixos paralelos para prototipagem em poliestireno expandido (isopor). A necessidade desta máquina foi sentida na prototipagem de superfícies aerodinâmicas para testes em túnel de vento, mas pode também ser usada no desenvolvimento de modelos para confecção de moldes de fundição em areia. Esta máquina visa à prototipagem de peças que possuam uma linha geratriz de desenvolvimento da superfície( Fig.1).



**Figura 1. Linha geratriz da superfície.**

### **2. METODOLOGIA**

Um projeto deve seguir uma sistemática para garantir que a busca da melhor solução tenha sucesso. Para se buscar a melhor solução, várias metodologias de projeto podem ser encontradas atualmente, voltadas a várias áreas (Kaminski,2000; Baxter,2003). Na engenharia mecânica o estudo do processo de projetar é antigo e tem fortes escolas de pensamento. Segundo Pahl e Beitz (1989) um processo metódico de projeto deve definir metas, indicar condições iniciais e periféricas, buscar variantes de soluções, avaliar as soluções e fornecer meios de tomada de decisões. Alguns costumam dividir o processo de projetar em: definição do problema, estudo de viabilidade, projeto preliminar, projeto detalhado.

A definição do problema é uma das etapas de projeto mais importantes e menos observadas. Nesta etapa são convertidas necessidades em parâmetros de projeto. Uma falha de compreensão do problema irá gerar parâmetros de projeto que não atenderão as reais necessidades que motivaram o projeto. O estudo de viabilidade é o primeiro estudo realizado visando verificar a viabilidade técnica e econômica do projeto. Algumas vezes é nesta fase que se percebe

equivocos na determinação de alguns parâmetros de projeto. Em seguida um projeto preliminar é realizado na busca de uma solução. Esta é uma etapa interativa que pode resultar em vários projetos preliminares até encontrar um conceito que atenda aos parâmetros ou metas do projeto. Uma outra forma de dividir o de forma simplificada é em projeto conceitual e projeto detalhado, no primeiro tem-se a definição do problema e o projeto preliminar que visar testar o conceito de solução.

A sistemática convencional de um projeto de uma máquina CNC é seqüencial e pode ser estruturado e hierárquico, ou seja, pode ser subdividido em partes que dependem uma das outras. Geralmente este projeto é dividido no projeto do sistema mecânico, projeto do sistema eletro-eletrônico e do sistema computacional. E estes são executados em seqüência, cabendo ao projeto mecânico ser o primeiro e fornecer os parâmetros para os demais projetos subseqüentes.

### 3. PROJETO CONCEITUAL

Nesta fase, deve-se definir o problema pela análise das necessidades e estabelecer os parâmetros de projeto. É aqui que se cria o conceito do produto. A necessidade básica deste trabalho é criar protótipos de peças para testes em túnel de vento de forma rápida em um material leve e barato. O material adotado foi o poliestireno expandido. A peça requisitou um corte com acabamento superficial que poderia ser feito por laser ou por um fio metálico aquecido. Pela primeira diretriz de projeto, baixo custo, optou-se pelo fio quente. A segunda diretriz de projeto é o emprego de componentes encontrados no mercado nacional. Seguindo esta, optou-se em aproveitar um sistema computacional livre. Sistemas computacionais para CNC livres ou abertos são temas de vários estudos e podem ser encontrados facilmente (Moril et al, 2001; EMC,2003). Devido a isso, a seqüência de projeto que começa pelo sistema mecânico e segue pelo projeto do sistema eletro-eletrônico e acaba com o projeto do sistema computacional foi alterada (Fig.2). O projeto do sistema computacional passou a ser uma seleção de programas livres e a forma de comunicação destes com a eletrônica determinou o projeto do sistema eletro-eletrônico.

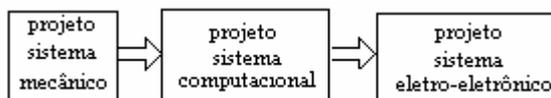


Figura 2. Seqüência de projeto.

O projeto conceitual começa pelas especificações dos diversos subsistemas que compõem a máquina, começando pelo sistema mecânico. Neste é feita as especificações de alguns parâmetros de projeto como, volume de trabalho, velocidade máxima de posicionamento, velocidade máxima de corte, ferramenta de corte, precisão e repetibilidade. A velocidade de corte e a forma da ferramenta determinam a força de corte e conseqüentemente os esforços submetidos à estrutura. A velocidade máxima tem interação com a precisão e repetibilidade. Os parâmetros adotados são vistos na Tabela (1) a seguir.

Tabela 1. Parâmetros de projeto

| Parâmetros                 | valores        |
|----------------------------|----------------|
| Volume de trabalho         | 300x300x300 mm |
| Velocidade máxima de corte | 10 mm/s        |
| Precisão                   | 0.5 -1 mm      |
| repetibilidade             | 0.5- 1 mm      |

#### 3.1. Conceito do sistema mecânico

A configuração da máquina depende da ferramenta de corte e da complexidade da operação. A ferramenta é um fio de corte que necessita de quatro graus de liberdade para gerar as superfícies desejadas, a máquina deve contar portanto com esta quantidade de graus de liberdade. Inicialmente faz-se um estudo das possíveis combinações destes 4 g.d.l, os quais podem ser visto na Tabela (2) a seguir. Cada uma das configurações do tipo 2, 3 e 4, permitem mais três variações. Cada uma destas configurações possui eixos em série, ou seja, um eixo é movido pelo eixo anterior, o que pode se acumular erros de posicionamento. As configurações 1 e 5 são as mais sensíveis a isso. A configuração 3 é a menos sensível a isso, pois tem menos eixos em série. Geralmente a escolha de mover a ferramenta ou a peça é baseada na massa, ou seja, quem tem a menor massa será a movida. Neste caso a ferramenta é tão leve quanto a peça, portanto o principal critério de escolha recai sobre a precisão.

Com o intuito de eliminar a necessidade de interpolação de movimentos lineares com angulares, além de reduzir a quantidade de eixos em série, verificou-se a existência de outro tipo de configuração. Esta configuração observada na figura não possui movimentos angulares, só possui movimentos lineares.

A vantagem desta configuração está em poucos eixos em série e na facilidade de interpolação dos movimentos, pois não há a necessidade de interpolar movimentos angulares com lineares. Esta configuração permite peças de volume de trabalho maiores no mesmo espaço que ocupariam as outras configurações analisadas.

Tabela 2. Configurações da estrutura mecânica.

|  |  |  |                                       |                                       |
|--|--|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
|  |  |  |                                       |                                       |
| <b>Tipo 1:</b><br>4 movimentos na peça | <b>Tipo 2:</b><br>3 movimentos na peça | <b>Tipo 3:</b><br>2 movimentos na peça | <b>Tipo 4:</b><br>1 movimento na peça | <b>Tipo 5:</b><br>0 movimento na peça |

Um experimento inicial foi realizado para quantificar a força de corte necessária para cortar o isopor com o fio aquecido. Observou-se que não se deve exercer muita força na movimentação do fio, pois afeta a precisão. A força necessária para o corte é a mínima para vencer o atrito viscoso do material fundido. Quanto mais quente o fio menos força se precisa. A quantidade linear de fio em contato com o material influencia na força de corte, pois aumenta a área de atuação do atrito viscoso e reduz a temperatura do fio pelo aumento da dissipação de calor.

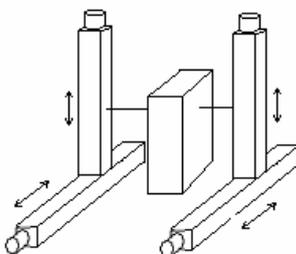


Figura 3. Configuração com 4 movimentos de translação

Como a força de corte é muito menor que a carga proporcionada pelo peso próprio da estrutura, esta determina a carga nos atuadores. Portanto para determinação da potência requerida nos 4 atuadores levou-se em conta só as inércias da estrutura.

### 3.2. Sistema computacional de comando

A especificação do sistema computacional começa pela escolha da unidade de processamento que será utilizada. No caso foi baseado em um microcomputador. Em seguida no tipo de controle a ser empregado que pode ser em malha aberta ou fechada. Um controle em malha aberta foi escolhido porque se desejou o emprego de atuadores de baixo custo como os motores de passo. Em seguida deve-se levar em conta a forma de comunicação da unidade de processamento com a eletrônica de acionamento dos atuadores. Desta forma a escolha do programa de controle foi direcionada pelas seguintes especificações: Empregar código G padrão, permitir controlar eixos em paralelo, permitir o controle de motores de passo via porta paralela de um PC e ser de uso livre.

### 3.3. Sistema eletro-eletrônico

A especificação deste sistema depende do tipo de atuador escolhido e do tipo de comunicação com o sistema computacional. Geralmente o sistema computacional é especificado depois do sistema eletro-eletrônico. No presente projeto desejou-se aproveitar programas livres. A comunicação escolhida foi à paralela, pela simplicidade. Os atuadores escolhidos foram motores de passo, pelo custo reduzido, pela baixa potencia necessária e pela facilidade de controle.

Desta forma a especificação:

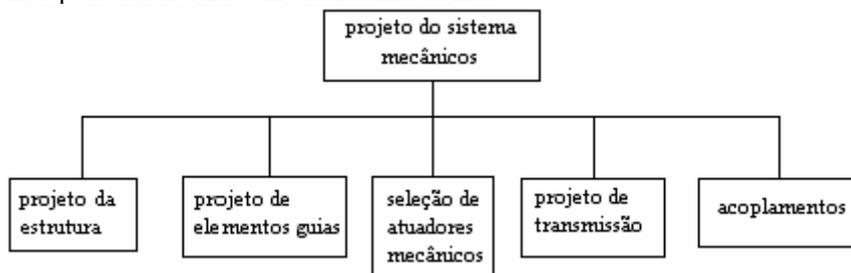
- Acionamento de um motor de passo unipolar de duas fases;
- Capacidade de acionamento em passo simples;
- Recepção externa dos sinais de *clock* / sentido;
- Capacidade de até 2A por bobina.

## 4. PROJETO DETALHADO

Nesta fase é feito o detalhamento do projeto no nível de seus componentes. Este projeto começa desmembrando o projeto conceitual em subprojetos menores que podem ser desenvolvimento ou especificação de componentes. Nesta fase deve-se aliar a sistemática de projeto com a experiência na seleção e projeto de componentes. O conhecimento das soluções comerciais e suas principais características são muito importantes.

### 4.1. Sistema mecânico

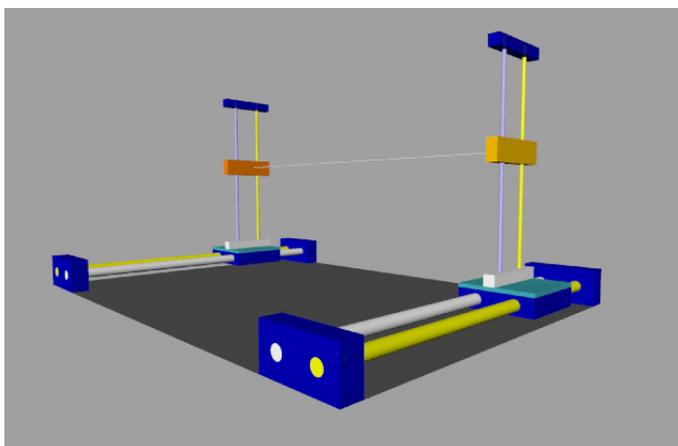
O projeto mecânico pode ser dividido em subsistemas como:



**Figura 4. Subsistemas do projeto mecânico.**

O projeto da estrutura deve ser pautado pelo critério de rigidez e não pela resistência a deformação permanente, pois é considerada falha de projeto se as deflexões elásticas forem na magnitude da precisão de posicionamento. Deve-se depois analisar os modos de vibração da estrutura para que a frequência natural destes não coincida com a frequência de trabalho dos motores de passo.

Os elementos de guia de movimento determinam os tipos dos movimentos que serão realizados pela máquina. No presente caso desejam-se movimentos de translação e por tanto se pode empregar: Guias de deslizamento, de rolamento e de escoamento fluídico. As primeiras são as de menor custo e podem ser do tipo metal/metal ou plástico/metal. Foi escolhida a última onde uma bucha de plástico desliza sobre um eixo de metal. O projeto em CAD pode ser observado na Figura (5).



**Figura 5. Desenho em CAD da máquina projetada.**

Os motores de passo foram selecionados através da curva torque x velocidade. Deve-se ter em mente que os motores de passo tem a propriedade de fornecer menos torque com o aumento da velocidade.

Os elementos de transmissão são escolhidos pautado-se na rigidez, mínima folga e baixas inércias de movimento. Os principais tipos são: Fusos, fusos de esferas re-circulantes, correias dentadas, cabos e engrenagens. Devido as baixas solicitações pode-se empregar cabos que são os elementos de mais baixo custo. Contudo foi escolhido o fuso de deslizamento, pois servia como elemento redutor para os motores disponíveis de baixo torque.

### 4.2. Sistema eletrônico

O sistema de acionamento dos motores de passo depende do tipo de motor, ou seja, unipolar ou bipolar e da complexidade do acionamento. Pelas especificações iniciais, poderia se desenvolver uma placa ou adquirir uma placa comercial. Os custos das placas comerciais motivaram o desenvolvimento.

O projeto da eletrônica parte da especificação da comunicação paralela, envio da quantidade de passo e a direção de giro, e desenvolve uma placa que emprega um contador de 4 bits, 74ls191, porém utilizado somente os dois bits menos significativos para chavear o demultiplexador, 74ls138, que comanda um sistema de potência com dois tipos de transistores, BC556 e TIP122. O primeiro recebe o sinal do demultiplexador trabalhando ainda com a tensão de 5V fornece um sinal ao TIP122 que fornece potência na corrente necessária para os motores (Fig.6).

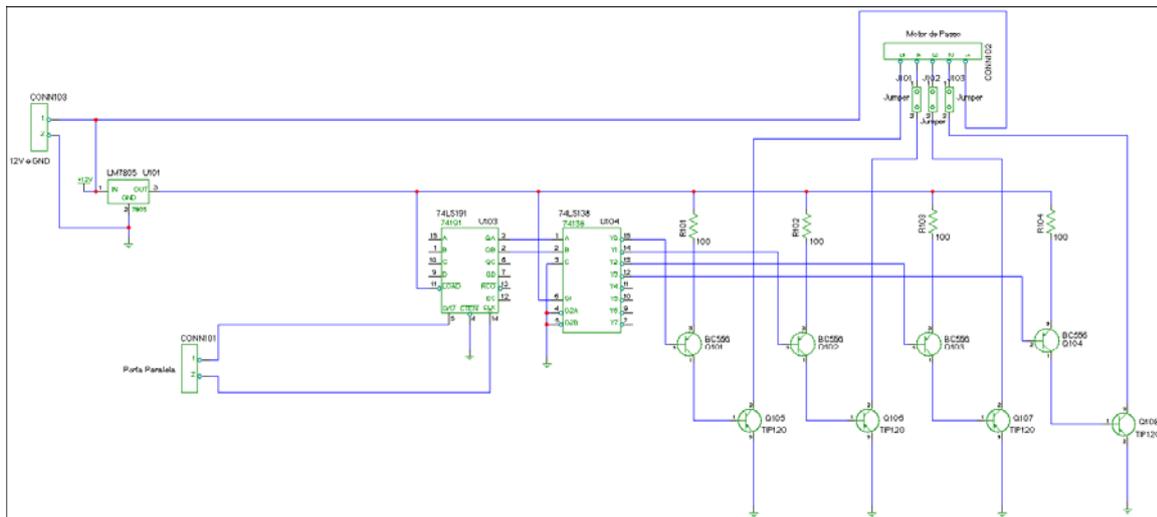


Figura 6. Circuito da placa de acionamento do motor de passo

Foram montadas as referidas placas e testadas com os motores de passo, apresentando um bom desempenho. Estas placas não têm controle de corrente, portanto foram projetadas para um corrente maior que a necessária nos motores.

### 4.3. Sistema Computacional

Foram analisados os programas livres disponíveis, segundo as especificações iniciais de projeto. Encontraram-se alguns como o EMC e Turbo CNC que poderiam ser empregados(EMC,2003 e turboCNC,2008). Contudo eles não possuem a capacidade de controlar dois pares de eixos em paralelo. Eles consideram  $n$  eixos em série comandados por um código G que os relacionam. Esses sistemas não consideram eixos em paralelo, pois não recebem um programa para cada par de eixos (planos) que se desejaria controlar. Para o programa controlar a máquina projetada e cortar a superfície mostrada na Figura (1), este deveria executar uma trajetória no plano  $x_1y_1$  e outra trajetória no plano  $x_2y_2$ , de forma sincronizada(Fig.7). Para solucionar isso o programa em código G que é passado ao sistema de comando é uma combinação de dois programas, uma para cada plano. Isso solicita a utilização de um sistema pré-processador do código.

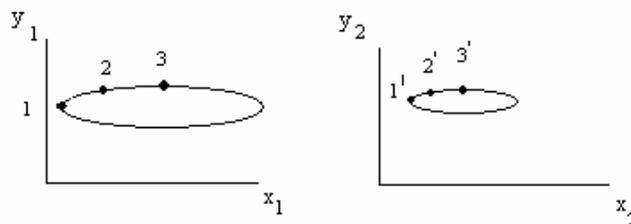


Figura 7. Planos paralelos.

A transformação de dois códigos em um único é possível interpolando os eixos paralelos, ou seja, o programa resultante interpolaria os eixos  $x_1x_2$  e os eixos  $y_1y_2$ . Primeiro a trajetória é dividida em pontos intermediários, em seguida executa-se um deslocamento par a par, ou seja, um deslocamento é feito em  $x_1$  e em  $x_2$ , depois outro deslocamento é feito em  $y_1$  em  $y_2$  até atingir o ponto intermediário e assim sucessivamente.

## 5. IMPLEMENTAÇÃO

Foi construído um protótipo da máquina para testar o conceito e a sistemática de projeto adotado. A montagem empregou materiais comerciais e reciclados de outras máquinas. Foram utilizadas barras cilíndricas como guias lineares, obtidas de impressoras antigas. Buchas de plástico foram usinadas para estas guias. Empregaram-se barras roscadas e porcas como fusos de deslizamento. O emprego de porca apresenta folga que pode ser minimizada aplicando uma pré-tensão. Os motores de passo também foram obtidos de impressoras antigas. Como não se tinha as especificações destes motores, testes de torque estático foram realizados. Apesar desses motores possuir baixo torque o processo de corte com fio quente não apresentou uma resistência considerável ao deslocamento. Foram feitos testes para

medir a força mínima de resistência ao deslocamento. Um fio aquecido por corrente elétrica era passado por vários blocos de Isopor. Media-se a força necessária para o fio deslizar cortando cada bloco. Verificou-se que esta força dependia do comprimento de fio em contato com o bloco, da temperatura e da velocidade de corte.

As placas de acionamento foram construídas em placas de fenolite com o circuito impresso feito por corrosão através do percloroato de ferro. Os componentes foram soldados nesta placa obtendo uma relação custo/ benefício muito favorável em relação à compra de acionamentos disponíveis comercialmente. A temperatura do fio quente era obtida por efeito joule e não se empregou um controle em malha fechada. Uma mola foi empregada para tracionar o fio quando este dilatava com o calor.

Foram testados alguns softwares e se conseguiu fazer a comunicação dos softwares disponíveis através da porta paralela do PC e a placa construída.

Inicialmente foram cortadas figuras geométricas simples como retângulos, onde se analisou qualitativamente perpendicularismo e paralelismo da montagem da máquina. Em seguida figuras como círculos e curvas foram cortados e o conceito do projeto analisado qualitativamente.

## 6. CONCLUSÕES

O artigo apresentou uma metodologia de projeto que pode ser empregada para máquinas CNC em geral. O projeto e as soluções adotadas foram descritos. A construção de um protótipo da máquina permitiu testes para validar as decisões de projeto. Foi identificado um atrito entre as buchas e as barras maior que o estimado na fase de projeto. O comportamento do fio quente deve ser melhor analisado, pois um controle em malha aberta da temperatura do fio pode provocar algumas imperfeições na superfície cortada. Foi observado ser possível aproveitar programas livres disponíveis, projetando uma placa de acionamento que aceite os sinais de comando via porta paralela do PC. O emprego de dois pares de eixos paralelos permite o corte de figuras com superfície obtida por reta geratriz. O emprego de fio quente permitiu uma qualidade da superfície cortada melhor do que utilizando fresamento. Isto decorre mais das características do material.

É possível empregar um programa convencional de interpretação de código G para controle de dois pares de eixos paralelos, contudo um programa específico deve ser estudado para facilitar a programação.

## 7. REFERÊNCIAS

- Mike Baxter, 2003. "Projeto de produto : guia prático para o design de novos produtos", São Paulo : Edgard Blucher
- Ferreira, J. M. G. C.; Alves, N. M. F.; Mateus, A. J. S.; Custódio, P. M. C., 2001. "Desenvolvimento integrado de produtos e ferramentas por metodologias de engenharia inversa e prototipagem rápida." 3º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, Florianópolis.
- Pahl, G., Beitz W., 1989. "Engineering Design, a Systematic Approach"; The Design Council, London
- Palm, William. *Rapid Prototyping Primer. The learning factory.* Disponível em: <http://www.mne.psu.edu/lamancusa/rapidpro/primer/chapter2.htm>, 2008. Acesso em 10/06/2008.
- Mello, C. H. P.; da Silva, C. E. S.; da Costa, S. C.; 2006, "Comparação de três diferentes tecnologias de prototipagem rápida em relação a critérios de custo e tempo", XXVI ENEGEP - Fortaleza, CE, Brasil, 9 a 11 de Outubro.
- Kaminski, P. C. 2000, "*Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade*", Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos.
- Masahiko Moril, Kazuo Yamazaki, Makoto Fujishima, Jiancheng Liu, Norio Furukawa, 2001, "A Study on Development of an Open Servo System for Intelligent Control of a CNC Machine Tool", CIRP ,Vol. 50, Issue 1, Pages 247-250.
- The Enhanced Machine Control – Developer Handbook, 2003. Disponível em: [http://www.sherline.com/emc/User\\_Handbook.pdf](http://www.sherline.com/emc/User_Handbook.pdf). acessado em 10/06/2008
- TurboCNC, Disponível em: <http://www.turboCNC.com/> acessado em 10/06/2008

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## The development of CNC Machine with two pairs of parallel axes for prototyping.

Augusto César Coelho Félix  
Walter de Britto Vidal Filho

Universidade de Brasília, Faculdade de tecnologia, Depto Eng. Mecânica, CEP 70910-900

**Abstract.** *This paper describes the development of a CNC machine for prototyping in polystyrene. The design methodology and the solutions adopted are presented. The design is divided into three systems: mechanical, electronic and computational. The design of computational system presented the challenge of controlling two pairs of parallel axes.*