

**Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Mecânica**

**Projeto de máquina-ferramenta
baseado em
Plataforma de Stewart**

**Elaborado por:
Anderson Daigo Tanaka**

**Orientador:
Tarcísio Antonio Hess Coelho**

**São Paulo
2001**

Média final
7,0 (ste)
Wong

9,0 (move)
Aminio
Média final com pr-
e consb no Boletim
de alteração de notas
localizado na
13-fer 2001 Secretaria do PGR
Edes

**Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Mecânica**

**Projeto de máquina-ferramenta
baseado em
Plataforma de Stewart**

**Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Graduação em Engenharia.**

**Orientador: Tarcísio Antonio Hess
Coelho**

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica
Automação e Sistemas**

**São Paulo
2001**

Agradecimentos

Aos amigos, pelo companheirismo.

Ao prof. Tarcísio pela orientação, apoio e dedicação.

Aos amigos, Marcelo Bockzo e Daniel Moraes, pela ajuda no projeto.

Aos familiares, especialmente aos pais, pelo incentivo.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

E principalmente, ao Deus Todo Poderoso, pelo imenso amor.

Anderson Daigo Tanaka

Índice

1	Introdução.....	2
1.1	Motivação.....	2
1.2	Objetivo	2
2	Usinagem.....	3
2.1	Introdução	3
2.2	Comparação entre algumas operações de usinagem	3
2.2.1	Fresadora X Furadeiras	3
2.2.2	Fresadora X Plaina	3
2.3	Tipos de Fresamento.....	4
2.4	Fundamento Teórico.....	4
2.4.1	Cálculo de avanço e velocidade de corte	4
2.4.2	Cálculo de potência	5
2.4.3	Exemplo	7
3	Plataforma de Stewart	10
3.1	Introdução	10
3.2	Vantagens e Desvantagens das plataformas de Stewart.....	10
3.3	Algumas possíveis aplicações da plataforma de Stewart.....	11
3.4	Plataforma de Stewart utilizado	11
3.4.1	Equipamento.....	12
3.4.2	Modelagem matemática	12
3.4.3	Software	14
4	Fixação.....	21
4.1	Morsa	21
4.2	Fixação com grampos de fixação	21
4.3	Seleção	21
5	Estrutura	22
5.1	Requisitos	22
6	Avaliação do custo	24
6.1	Fixação com grampos	24
6.2	Acoplamento da ferramenta fresa com o eixo.....	25
6.3	Estrutura	25
7	Ensaios	26
8	Conclusão.....	27
9	Bibliografia	28
10	Apêndice.....	29
10.1	Tabelas	29
10.2	Interbus	32
10.3	Código Fonte.....	37

Símbolos utilizados

- P_C = potência de corte, kW;
 P_M = potência do motor, kW;
 K_p = Constante de potência, kW s/cm³;
 Q = taxa de remoção de metal, cm³/s;
 C = Fator de avanço para a constante de potência;
 W = fator de desgaste da ferramenta;
 E = fatores de eficiência da máquina ferramenta;
 V = velocidade de corte, m/min;
 N = velocidade de corte, rpm;
 f = taxa de avanço para torneamento, mm/rev;
 f = taxa de avanço para aplainamento, mm/golpe;
 f_m = avanço, mm/min;
 f_t = avanço por dente, mm/dente;
 dt = máxima profundidade de corte por dente, mm;
 d = profundidade de corte, mm;
 nt = números de dentes na fresa;
 nc = números de dentes empenhados no trabalho;
 w = largura de corte, mm

1 Introdução

1.1 Motivação

Na busca de produtos cada vez melhores e mais precisos, o homem necessita de ferramentas cada vez mais precisas para produzi-los, especialmente as indústrias aeronáutica e espacial que exigem equipamentos de alta precisão. A plataforma de Stewart tem sido alvo de pesquisas em universidades de todo o mundo, pois uma de suas características é exatamente uma precisão maior quando comparada com robôs de cadeia cinemática aberta. A plataforma de Stewart pode ser aplicada em diversas áreas, desde a área médica, entretenimento até a aeronáutica e espacial. Este trabalho foi então proposto visando um conhecimento maior sobre as plataformas de Stewart utilizado como uma máquina ferramenta.

1.2 Objetivo

O objetivo deste projeto consiste na adaptação de um modelo de plataforma de Stewart para que o mesmo trabalhe como uma máquina ferramenta. A plataforma de Stewart foi projetada em anos anteriores, sendo sua implementação ocorrida em paralelo a este trabalho através dos alunos de graduação Daniel Moraes e Marcelo Boczeko, e também com desenvolvimento de um projeto por Guilherme Haszl, aluno de pós-graduação da Escola Politécnica.

Para alcançar o objetivo foram realizados estudos sobre usinagem, plataforma de Stewart, seleção de equipamentos, desenvolvimento de software e testes.

2 Usinagem

2.1 Introdução

A máquina ferramenta a ser projetada é uma máquina que realizará a operação de fresamento. O fresamento é uma operação que se caracteriza por utilizar uma ferramenta multicortante, dita fresa, que realiza um movimento de rotação ao redor do seu eixo para retirar parte do material que lhe compete fazê-lo. Geralmente, o movimento de avanço, que permite o prosseguimento da operação, é realizado pela peça.

A fresadora é um equipamento bem versátil devido ao fato da ferramenta utilizada ser multicortante e se apresentar sob diversas formas, permitindo realizar operações como por exemplo, furação, alargamento, aplainamento. A figura 1 mostra alguns exemplos de fresa.



Figura 1

2.2 Comparação entre algumas operações de usinagem

2.2.1 Fresadora X Furadeiras

As fresadoras são capazes de usinar furos com um alto grau de precisão. Elas levam vantagem econômica em relação às furadeiras para pouca quantidade de peça, quando não há dispositivos ou gabaritos para a furação. Quando o número de peças a serem usinadas é grande não há vantagem sendo melhor, portanto, o uso de furadeira com gabaritos.

2.2.2 Fresadora X Plaina

As fresadoras também são capazes de usinar diversas tipos de superfícies, entre elas o plano. As fresadoras são capazes de realizar a operação de aplainamento mais rapidamente que as plainas, contudo, o custo inicial e de manutenção de uma fresadora é maior que o de uma plaina. Assim, para grandes produções é preferível ter uma plaina.

Além das operações acima citadas, o fresamento permite a usinagem quando a superfície a ser usinada intersecciona qualquer outra existente.

Para uma boa qualidade de usinagem, é preciso retificar após o fresamento.

2.3 Tipos de Fresamento

Podemos classificar o fresamento em basicamente dois tipos de acordo com a disposição dos dentes ativos da fresa:

- Fresamento tangencial (Concordante ou discordante);
- Fresamento frontal.

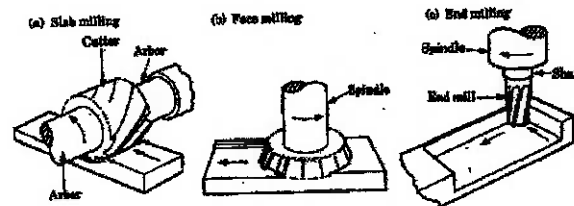


Figura 2

Neste trabalho será abordado apenas o fresamento frontal adaptando-se à plataforma de Stewart.

2.4 Fundamento Teórico

2.4.1 Cálculo de avanço e velocidade de corte

O avanço básico no fresamento é o avanço por dente, que pode ser medido em mm por dente ou polegadas por dente, porém não há nenhuma fórmula para determiná-la pois existem vários fatores a serem considerados na sua seleção. Dentre esses fatores a serem considerados temos o material da ferramenta; o material a ser trabalhado e a sua dureza; a largura e profundidade de corte; o tipo e o tamanho da fresa; o acabamento a ser produzido; a potência disponibilizada pela máquina ferramenta; e a rigidez da máquina ferramenta, o trabalho da peça, seu setup e o engaste.

O princípio básico a ser seguido é utilizar o maior avanço que as condições permitirem, evitando usar um avanço menor que 0,001 polegada por dente (0,0254mm/dente) pois este avanço reduz muito a vida útil da ferramenta. Quando se realizar um fresamento em um material duro com uma ferramenta de pequeno diâmetro tal avanço é necessário, porém em outras condições, use o maior avanço que for possível. Em geral, materiais a serem usinados mais duros requerem menor avanço que materiais menos duros. A largura e profundidade do corte também afetam o avanço. Um corte com largura e profundidade grandes terá um avanço menor que um de pequena largura

e profundidade. Um avanço menor resultará em um acabamento final melhor, contudo a recomendação é que se utilize o maior avanço que resulta no acabamento desejado.

Alguns cuidados devem ser tomados ao se realizar a usinagem de magnésio e aço inoxidável.

Fresamento de magnésio: Ao se usinar magnésio deve-se utilizar um avanço grande para se obter grandes lascas. As finas lascas produzidas pelo fino avanço são perigosos porque pode-se ocorrer uma combustão espontânea.

Aço inoxidável: A usinagem de aço inoxidável produz uma camada temperada por trabalho na superfície trabalhada. Então, quando se trabalha com este material, deve-se usar um avanço grande o suficiente para que cada aresta de corte penetre na superfície abaixo da camada temperada no corte anterior.

Os grandes avanços recomendados para fresas de topo são para ser usados primeiramente por grandes fresas em máquinas que possuam a potência adequada. Para fresas de topo menores, é recomendado que se comece com um avanço baixo e se aumente conforme a sua performance e a da máquina.

Quando se planeja uma operação de fresamento que requer alta velocidade de corte e grande avanço, deve-se sempre verificar se a potência requerida para o corte é disponível na máquina ferramenta. Geralmente, quando se utilizam fresas de carbonetos cementado na operação de usinagem, exige-se potência em excesso. A grande taxa de remoção de material que pode ser obtido requer muita potência. Se o tamanho do corte deve ser reduzido para se manter dentro da disponibilidade de potência, é recomendado que se reduza inicialmente a velocidade de corte (rotação) que o avanço por dente. A fórmula para se calcular a taxa de avanço é:

$$f_m = f_t n_t N$$

2.4.2 Cálculo de potência

O conhecimento da potência requerida para realizar as operações de usinagem é útil no planejamento de uma nova operação de usinagem, na otimização de uma operação de usinagem já existente e no desenvolvimento de especificações de uma nova máquina a ser adquirida. A potência disponível em cada máquina limita o tamanho do corte a ser realizado. Quando é preciso remover uma grande quantidade de material, é aconselhável estimar as condições de corte

que consomem o máximo de potência da máquina. Porém muitas operações de usinagem consomem uma parcela muito pequena da potência disponível na máquina, sendo nesses casos, o cálculo um desperdício de esforço. Sendo as máquinas diferentes entre si, projetadas de modo diferentes, existem variações entre o valor de potência estimado e o resultado obtido no trabalho, contudo, através de dados tabelados pode-se ter uma boa aproximação da potência requerida, que será suficiente em maior parte das situações práticas. Algumas dessas tabelas se encontram no apêndice deste trabalho.

A unidade de medida de potência é o kilowatt, que é utilizado tanto para indicar potência mecânica como elétrica. A potência requerida para se usinar um material é dependente da taxa em que o material é removido, e também da constante de potência determinada experimentalmente. A constante de potência, também chamada de unidade de potência ou consumo específico de potência, é a quantidade de potência em kW necessária para remover o material a uma taxa de um centímetro cúbico por segundo. Valores da constante de potência na tabela 4 podem ser utilizados para todas operações de usinagem exceto furação e retificação, sendo os valores para ferramentas afiadas.

O valor da constante de potência praticamente não é afetado pela velocidade de corte, profundidade de corte e do material da ferramenta de corte. Há, contudo, fatores que afetam a constante de corte e consequentemente a potência requerida para remover o material. Estes fatores incluem a dureza e microestrutura do material a ser removido, o avanço, o ângulo de saída da ferramenta de corte (*rake angle*), e a condição da ferramenta de corte, se está afiada ou gasta. Valores da constante de potência são dadas na tabela 4 para diversos materiais com suas respectivas durezas quando disponíveis.

O fator de avanço também possui valores tabelados, vide tabela 5. Todas as ferramentas de corte sofrem desgaste a medida que são utilizadas, porém espera-se que elas continuem a remover o material da mesma forma que não estivesse gasta. Uma ferramenta gasta, ou seja, menos afiada, requer mais potência para realizar o trabalho. Valores para esse desgaste também podem ser obtidos na tabela 6. Nesta tabela, o fresamento de topo de serviço extra pesado é indicado para usinagens em que a ferramenta de corte se desgasta de forma mais rápida que o normal. Na maioria das operações de corte, o *rake angle* pode ser desconsiderado. Os valores de potência da tabela são referente a uma ferramenta com o *rake angle* de 14 graus positivos. Apenas quando a diferença de ângulo é muito grande, esse valor deve ser corrigido. Quanto mais positivo o ângulo, menor a potência requerida para a usinagem, e vice-versa, sendo que o valor se altera

aproximadamente de um por cento por grau. Muitas ferramentas de corte de inserção indexáveis possuem modificações na extremidade de corte que alteram a potência de corte requerida para se remover material. Os efeitos dessas alterações não podem ser previstos sem um teste para cada desenho. Fluidos de corte também reduzem a potência necessária para o corte, quando se operam em baixas velocidades de corte. Novamente, os efeitos na potência de corte não podem ser previstas porque cada fluido de corte apresenta sua própria característica. A máquina ferramenta transmite a potência do motor para a peça a ser trabalhada. A eficiência na transmissão (E) está tabelado sendo os valores médios na tabela 7.

A tabela 8 mostra as fórmulas de cálculo da taxa de remoção de metal, Q, para as diferentes operações de usinagem.

As fórmulas da tabela 8 são utilizadas juntamente com a fórmula abaixo.

$$P_C = K_p C Q W$$

$$P_M = \frac{P_C}{E}$$

2.4.3 Exemplo

Cálculo da potência necessária para se usinar uma peça de liga de alumínio fundido com uma profundidade de corte de 0,05 polegada (1,27mm). Utiliza-se uma fresa de topo de aço rápido, diâmetro de 2,5 polegadas (63,5mm) com 6 dentes, e lead angle de 45°.

Dados:

Operação: fresamento de topo

Fresa:

Material: aço rápido (HSS)

Diâmetro: D = 2,5in (63,5mm)

Número de dentes: $n_t = 6$ dentes

Lead angle = 45°

Profundidade de corte: d = 0,1 in (2,54mm)

Solução:

Largura de corte:

$$w = 0,75D \Rightarrow w = 0,75 \cdot 2,5 \Rightarrow w = 1,875 \text{ in } (47,625 \text{ mm})$$

Da tabela 1 podemos obter os valores recomendados de velocidade e avanço.

Utilizando o valor ótimo de avanço (s na tabela):

$$V = 30 \text{ ft/min } (152,4 \text{ mm/s})$$

Fazendo a correção do valor de avanço temos:

Da tabela 1 obtemos a relação entre a velocidade média e ótima:

$$\frac{V_{\text{medio}}}{V_{\text{otimo}}} = \frac{90}{30} = 3 \Rightarrow \text{Da tabela 3, } F_F = 1,00.$$

Ainda da tabela 3 obtemos:

$$F_d = 1,29 ; e$$

$$F_{ar} = 1,00.$$

Assim,

$$V = V_{\text{otimo}} * F_f * F_d * F_{ar} \Rightarrow V = 152,4 \times 1 \times 1,29 \times 1$$

A velocidade de avanço é:

$$V = 196,6 \text{ mm/s } (38,7 \text{ ft/min})$$

Cálculo da velocidade de corte:

(V em ft/min; D em in; N em rpm)

$$V = \frac{\pi D N}{12} \Rightarrow 38,7 = \frac{\pi * 2,5 * N}{12}$$

Assim, a velocidade de corte fica:

$$N = 59,13 \text{ rpm}$$

Da tabela 2 podemos obter o avanço por dente recomendado.

$$f_t = 0,005 \text{ in/dente, ou seja, } f_t = 0,127 \text{ mm/dente}$$

Assim, podemos calcular o avanço:

$$f_m = f_t \times n_t \times N \Rightarrow f_m = 0,005 \cdot 6 \cdot 59,13$$

$$f_m = 1,774 \text{ in/min ou } f_m = 0,75 \text{ mm/s}$$

Pode-se, então, estimar a potência de corte.

Calculamos primeiramente o volume de material a ser removido por unidade de tempo:

$$Q = f_m \cdot w \cdot d \Rightarrow Q = 1,774 \cdot 1,875 \cdot 0,1$$

$$Q = 0,333 \text{ in}^3/\text{min ou } 90,726 \text{ mm}^3/\text{s}$$

$$P_c = K_p * C * Q * W$$

Da tabela 4, obtemos a constante de potência.

$$K_p = 0,68 \text{ (SI)}$$

Da tabela 5, obtemos o fator de avanço.

$$C = 1,20$$

Da tabela 6, obtemos o fator de desgaste da ferramenta.

W é 1,25 (fresamento de topo leve ou médio).

Assim,

$$P_c = 0,68 * 1,20 * 90,726 * 1,25$$

$$P_c = 92,54 \text{ W ou } 0,125 \text{ hp}$$

Esta é a potência necessária na ponta da ferramenta para se usinar o alumínio. Deve-se ainda considerar as perdas e a eficiência durante a transmissão para se obter a potência requerida no motor.

Supondo uma perda total de 40% da potência até a ponta da ferramenta, estimamos a potência oferecida no motor sendo:

$$P_m = 92,54 / 0,60$$

$$P_m = 154,23 \text{ W ou } 0,21 \text{ hp.}$$

3 Plataforma de Stewart

3.1 Introdução

A plataforma de Stewart consiste em um mecanismo de estrutura paralela, constituído de seis suportes de comprimento variável ligando uma base fixa à uma plataforma móvel. Estes suportes podem ser conectados à base e à plataforma através de juntas esféricas ou/e juntas universais. A forma da base fixa, assim como da plataforma podem ser quaisquer desde que a estrutura seja estável. O número de suportes também pode variar, desde que se mantenha a estrutura estável. A figura 3 mostra um exemplo de plataforma de Stewart, com seis suportes de comprimento variável.



Figura 3

3.2 Vantagens e Desvantagens das plataformas de Stewart

As principais vantagens deste mecanismo na aplicação de máquina ferramenta quando comparado com as máquinas ferramentas convencionais são:

- maior rigidez – a disposição dos atuadores conferem a este mecanismo uma alta rigidez pois as forças aplicadas sobre a plataforma são distribuídas entre as colunas tornando as forças necessárias para a movimentação menores;
- menor erro de posicionamento e orientação – por ser um mecanismo de cadeia cinemática fechada, este possui uma precisão maior já que os erros não se acumulam. Num mecanismo de cadeia cinemática aberta os erros vão se acumulando pelo fato dos atuadores estarem ligados em série;
- maior simplicidade na solução das equações da cinemática inversa – a cinemática inversa parte da posição da plataforma em relação à base, e a partir desta posição determina os comprimentos dos atuadores.

As principais desvantagens são:

- maior complexidade na solução das equações de cinemática direta – através da cinemática direta pretende-se determinar as coordenadas cartesianas das articulações da plataforma por meio do comprimento dos atuadores;
- presença de posições singulares – estas são as posições nas quais o mecanismo não pode ser controlado. Uma plataforma de Stewart pode atingir estas posições de diferentes formas, sendo duas mais significativas: uma quando a plataforma torna-se coplanar a base e outra quando a plataforma gira 90° em torno do eixo perpendicular a ela;
- menor volume de trabalho.

3.3 Algumas possíveis aplicações da plataforma de Stewart

Dentre as aplicações da plataforma de Stewart podemos citar:

- Máquina-ferramenta;
- Simuladores,
- Manipulador nanométrico para Micro-fabricação;
- Absorvedor/Isolador de vibração (posicionadores de seis eixos);
- Sensores de força;
- Manipulador motorizado para cirurgia coronária de ponte de safena (CABG).

3.4 Plataforma de Stewart utilizado

A plataforma de Stewart utilizado neste projeto consiste de um sistema de 4 atuadores fixos, acionados por motores elétricos, disposto conforme a figura 4a. Variando-se os comprimentos dos atuadores fixos, move-se as colunas de comprimento fixo, movendo a

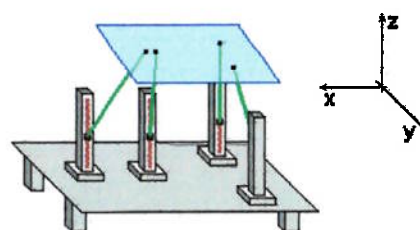


Figura 4a

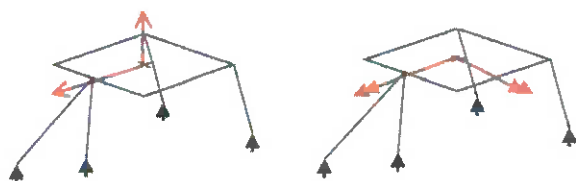


Figura 4b

plataforma. Este mecanismo, com esta estrutura, tem quatro graus de mobilidade, sendo duas rotações e duas translações (figura 4b).

3.4.1 Equipamento

Neste trabalho está sendo utilizado uma plataforma de Stewart existente que utiliza os seguintes equipamentos:

- 1 Placa controladora IBS PC ISA SC/I-T (Interbus);
- 4 Motores SEW;
- 4 Resistores de Frenagem;
- 4 Inversores SEW – MOVIDRIVE;

3.4.2 Modelagem matemática

A modelagem matemática realizada visando a plataforma de Stewart utilizada. Neste equipamento é preciso lembrar que a ferramenta fresa realizará o movimento na direção Y. A figura 6a mostra o equipamento a ser modelado.

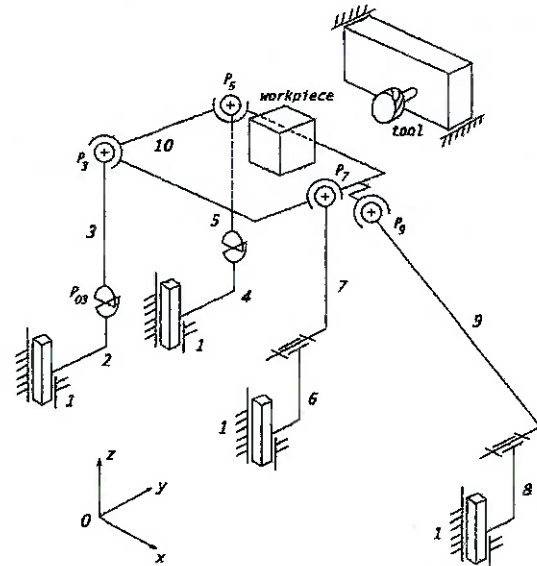


Figura 6a

3.4.2.1 Equacionamento

Para um dos suportes da mesa, ilustrado na figura 6b, temos:

$$A = [A_x, A_y, A_z]$$

$$E = [E_x, E_y, E_z]$$

$$M = [A_x, A_y, E_z]$$

$$P = [E_x, E_y, \Delta H]$$

$$DH = E_z + h_a$$

$$K = [A_x, A_y, DH]$$

Pelo teorema de Pitágoras, podemos escrever:

$$L_1^2 = ||A-K||^2 + ||K-P||^2$$

.....equação 1

Mas

$$||A-K|| = ||A-M|| - ||K-M||, \text{ sendo que } ||K-M|| = h_a$$

Assim,

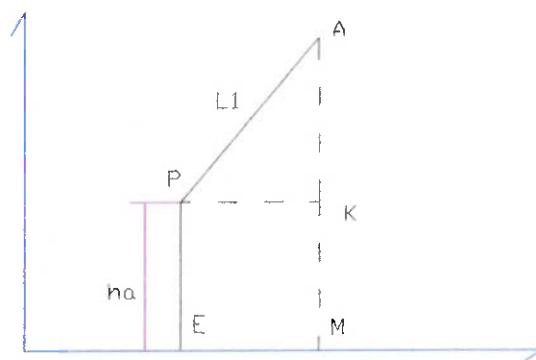


Figura 6b

$$||A-K|| = ||A-M|| - ha$$

$$\text{E também, } ||K-P|| = ||M-E||$$

Assim, reescrevendo a equação 1 temos o seguinte:

$$L_1^2 = (||A-M|| - ha)^2 + ||M-E||^2$$

$$L_1^2 - ||M-E||^2 = (||A-M|| - ha)^2$$

$$||A-M|| - ha = \sqrt{L_1^2 - ||M-E||^2}$$

$$ha = ||A-M|| - \sqrt{L_1^2 - ||M-E||^2}$$

Lembrando que

$$||A-M|| = \sqrt{(x_A - x_M)^2 + (y_A - y_M)^2 + (z_A - z_M)^2}$$

Analogamente, para os outros suportes teremos:

$$ha = ||A-M_A|| - \sqrt{L_1^2 - ||M_A-E||^2}$$

$$hb = ||A-M_A|| - \sqrt{L_2^2 - ||M_A-F||^2}$$

$$hc = ||C-M_C|| - \sqrt{L_2^2 - ||M_C-I||^2}$$

$$hd = ||D-M_D|| - \sqrt{L_2^2 - ||M_D-H||^2}$$

Podemos ainda escrever o posicionamento das posições dos pontos A, C e D em relação à posição do centro de gravidade da mesa, o ponto G, com as seguintes equações:

$$P_f = P_i + [T] + ([R-1])(P_i - G_i)$$

$$[T] = [\Delta x, 0, \Delta z]^T$$

$$[R] = \begin{bmatrix} e_x^2(1-\cos\theta) + \cos\theta & e_x e_y(1-\cos\theta) & e_y \sin\theta \\ e_x e_y(1-\cos\theta) & e_y^2(1-\cos\theta) + \cos\theta & -e_x \sin\theta \\ -e_y \sin\theta & e_x \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$e = [e_x, e_y]^T$$

Onde, P representa a posição dos pontos, por exemplo, A, C ou D, [T] é o vetor de translação e [R] é o matriz de rotação em torno de um vetor e, este pertencendo ao plano XY.

Com essas equações podemos obter as alturas ha, hb, hc e hd dada uma posição do centro de gravidade e o ângulo em que esta mesa estiver inclinada.

3.4.3 Software

Utilizando as equações desenvolvidas na modelagem matemática, foi escrita o código em o software Visual Basic 4.

A movimentação que a plataforma pode realizar é basicamente de translação e rotação. Assim, foram desenvolvidas funções para que a plataforma realizasse esses movimentos. São basicamente dois módulos, um de translação e um de rotação. Além dessas funções, foram desenvolvidas funções que pudessem alterar a configuração do software, ou seja, caso o equipamento (hardware) fosse alterado, não seria necessário reescrever as funções para o “novo” equipamento. O usuário simplesmente alteraria alguns parâmetros. Contudo essa alteração só é possível para equipamentos semelhantes ao mecanismo utilizado. Por exemplo, este software não se aplica a plataformas de Stewart com o comprimento das barras todas diferentes, deve-se utilizar três de mesmo comprimento, e mais uma de comprimento diferente, podendo ser esta igual às anteriores.

Foram utilizadas funções internas ao Visual Basic, de forma que estas não serão descritas aqui.

Funções de configuração

Função: *dimensoes* – esta função divide o comprimento e a largura da plataforma móvel por dois.

Entrada: dois *double*

Saída: nenhuma

Funções utilizadas: nenhuma

Função: *dimbarras* – função que altera a dimensão das duas barras.

Entrada: dois *double*

Saída: nenhuma

Funções utilizadas: nenhuma

Função: *alterapg* – esta função altera o centro de gravidade atual

Entrada: três *double*

Saída: nenhuma

Funções utilizadas: nenhuma

Função: *alterape* – altera o ponto E

Entrada: três *double*

Saída: nenhuma

Funções utilizadas nenhuma

Função: *alterapf* – altera o ponto F

Entrada: três *double*

Saída: nenhuma

Funções utilizadas nenhuma

Função: *alteraph* – altera o ponto H

Entrada: três *double*

Saída: nenhuma

Funções utilizadas nenhuma

Função: *alterapi* – altera o ponto I

Entrada: três *double*

Saída: nenhuma

Funções utilizadas nenhuma

Função: *altera_avanco* – procedimento para a alteração do avanço

Entrada: um *double*

Saída: nenhuma

Funções utilizadas: nenhuma

Função: *altera_passarosca* – este procedimento altera o passo da rosca

Entrada: um *double*

Saída: nenhuma

Funções utilizadas: nenhuma

Funções de translação

Função: *muda* – esta função converte um ângulo de grau para radianos.

Entrada: um *double*

Saída: um *double*

Funções utilizadas: nenhuma

Função: *pontosABCD* – esta função calcula as coordenadas dos pontos A, B, C e D.

Entrada: nenhuma

Saída: nenhuma

Funções utilizadas: *sin*, *cos*

Função: *teste_h* – procedimento de teste da altura *h* para que este esteja dentro de um limite mínimo e máximo

Entrada: um *double*

Saída: nenhuma

Funções utilizadas: nenhuma

Função: *calc_M* – procedimento para calcular as projeções dos pontos A, B, C e D.

Entrada: nenhuma

Saída: nenhuma

Funções utilizadas: nenhuma

Função: *calcula_modulo* – esta função o módulo entre dois pontos

Entrada: dois *arrays* de *double*

Saída: um *double*

Funções utilizadas: *Sqr*

Função: *calc_tempo* – esta função calcula o tempo necessário para que a plataforma chegue ao ponto de destino dada uma velocidade.

Entrada: dois *double*

Saída: um *double*

Funções utilizadas: nenhuma

Função: *calc_h* – esta função calcula a altura *h* dos fusos

Entrada: três *arrays* de *double*, um *double*

Saída: um *double*

Funções utilizadas: *calc_modulo*, *Sqr*

Função: *simula2* – realiza a simulação da movimentação da plataforma de forma a se obter a área de trabalho da plataforma.

Entrada: nenhuma

Saída: nenhuma

Funções utilizadas: *Inicializa_default*, *pontosABCD*, *calc_m*, *calc_b*

Função: *inicializa_default* – esta função inicializa o equipamento com os parâmetros padrões

Entrada: nenhuma

Saída: nenhuma

Funções utilizadas: *pontosABCD*, *calc_M*

Função: *coefang* – esta função calcula o coeficiente angular de uma reta dados os pontos iniciais e finais

Entrada: quatro *double*

Saída: um *double*

Funções utilizadas: nenhuma

Função: *Pos_atual* – esta função exibe a posição atual do centro de gravidade da plataforma móvel

Entrada: nenhuma

Saída: nenhuma

Funções utilizadas: *CStr*

Função: *Calcula_b* – esta função calcula os valores das alturas dos fusos

Entrada: nenhuma

Saída: nenhuma

Funções utilizadas: *calc_b*

Função: *guarda_btemp* – armazena temporariamente os valores das alturas dos fusos

Entrada: nenhuma

Saída: nenhuma

Funções utilizadas: nenhuma

Função: *dif_b* – calcula a diferença de altura

Entrada: nenhuma

Saída: nenhuma

Funções utilizadas: nenhuma

Função: *altera_passo* – função para alterar o passo

Entrada: um *double*

Saída: nenhuma

Função utilizada: nenhuma

Função: *movimenta* – função que realiza a movimentação da plataforma móvel em linha reta.

Entrada: quatro *double*

Saída: nenhuma

Funções utilizadas: *calc_modulo*, *calc_tempo*, *calcula_b*, *guarda_btemp*, *dif_b*, *movimenta_fusos*, *coefang*.

O Visual Basic possui um tipo especial de estrutura de dados chamada *variant*. Esta estrutura especial pode fazer o papel de diferentes estruturas de dados, ou seja, um *variant* pode ser, por exemplo, *inteiro*, *texto*, *vetor*, *real*, *booleano*, de acordo com a necessidade. Quando se deseja que uma função retorne um vetor é necessário que este seja *variant*, caso contrário, o Visual Basic não permite fazê-lo.

Funções de rotação

Estas funções foram desenvolvidas com a finalidade de rotacionar em torno do eixo y. Devido ao fato de que nestas funções foram utilizadas estruturas *variant*, foram indicadas também o tipo de estrutura que se espera como entrada e/ou saída das funções.

Função: *acha_quadrante* – esta função retorna o quadrante de um dado ponto.

Entrada: *variant* – vetor de duas posições

Saída: *inteiro*

Funções utilizadas: nenhuma

Função: *arccosseno* – na versão do Visual Basic utilizada não havia esta função, por esse motivo, foi necessário escrever uma que realizasse essa operação. Foi utilizada uma indicação da própria ferramenta de desenvolvimento para escrevê-la, utilizando funções básicas.

Entrada: *double*

Saída: *double*

Funções utilizadas: *Atn*, *Abs*, *Sqr*

Função: *prox_ponto* – função que calcula o próximo ponto aonde a máquina deve ir.

Entrada: duas *variant* – vetor de duas posições, *booleano* – sentido de rotação

Saída: *variant* – vetor de duas posições

Funções utilizadas: *translacao, rot_unit*

Função: *rot_unit* – função que rotaciona em um grau em torno do ponto (0,0).

Entrada: *variant* – vetor de duas posições, *booleano* – sentido de rotação

Saída: *variant* – vetor de duas posições

Funções utilizadas: *sqr, Cstr, cos, sen, acha_quadrante*.

Função: *rotaciona* – esta função rotaciona a plataforma dada a posição inicial, o centro de rotação, e o ângulo de rotação.

Entrada: duas *variant* – vetor de duas posições, *double* – ângulo

Saída: *variant* – vetor de duas posições

Funções utilizadas: *Abs, prox_ponto*

Função: *translacao* – função que realiza a soma de dois pontos.

Entrada: duas *variant* – vetor de duas posições

Saída: *variant* - vetor de duas posições

Funções utilizadas: *CDbl*

Com parte do programa desenvolvido, simulou-se a movimentação possível da mesa tentando limitar a área de trabalho do equipamento. Os limites definidos foram apenas os limites de curso dos suportes de fusos,

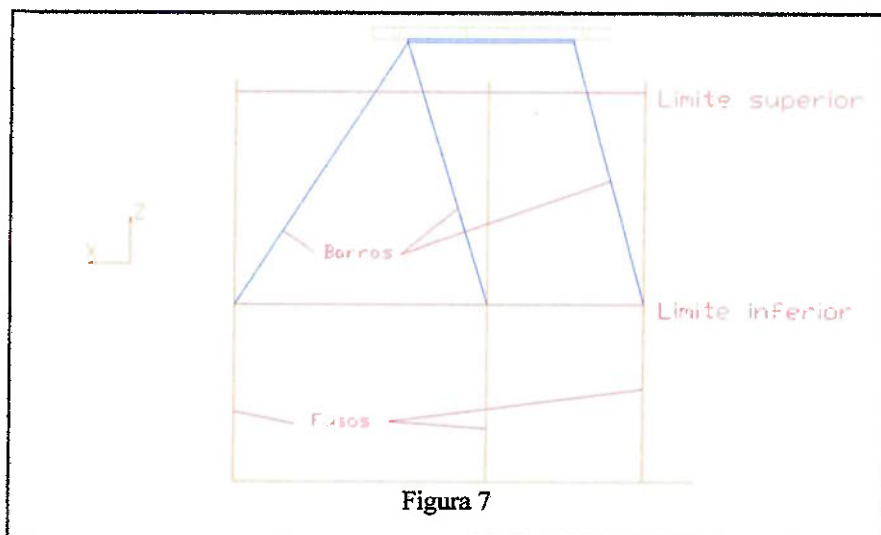


Figura 7

sendo ainda necessária a inclusão de limites devido às juntas universais.

Lembrando que a plataforma de Stewart utilizada (vide figura 7) pode realizar movimentos de translação na direção X e Z e que a mesa estaria sempre na horizontal, realizou-se uma simulação verificando sua área de trabalho nesse plano. Não foram consideradas as possíveis

movimentações de rotação tanto no eixo x, como no eixo y. Assim, obteve-se o seguinte (gráfico1).

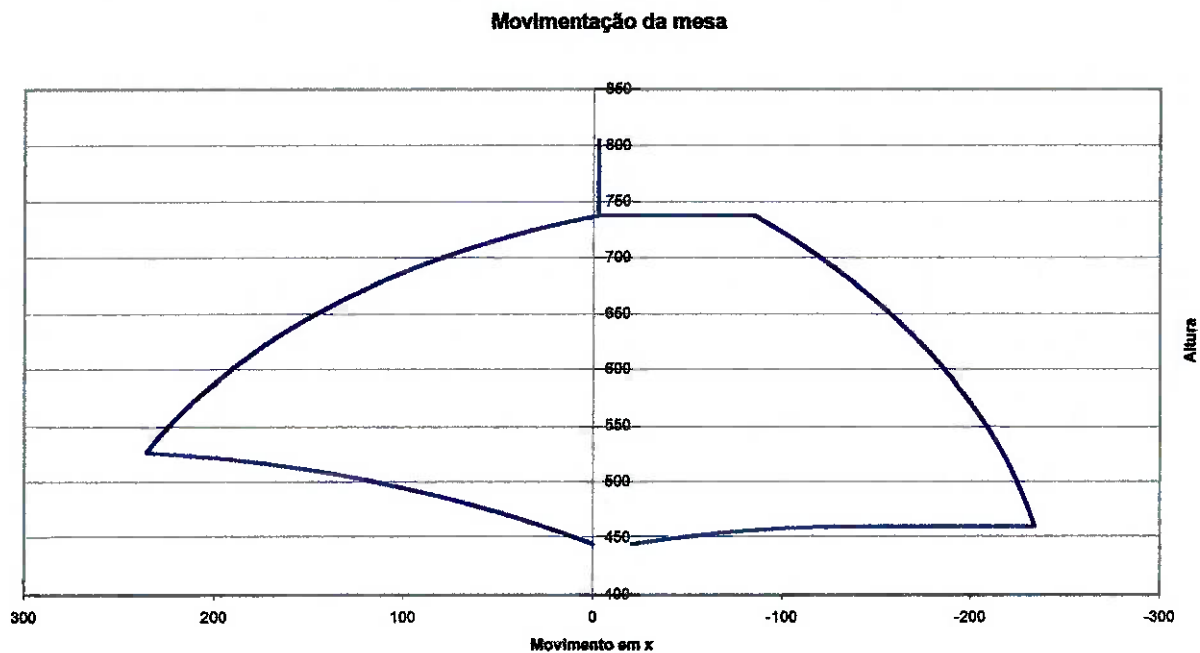


Gráfico 1

Pelo gráfico 1 pode-se verificar que a plataforma pode-se deslocar no máximo cerca de 235 mm na direção x sendo a altura nesse momento de aproximadamente de 530mm sendo o início de 423mm. Como a plataforma não é completamente simétrica, ela apresenta a área e conseqüentemente o volume de trabalho não simétrico. No sentido negativo do eixo x, o máximo que a plataforma pode atingir é aproximadamente 232mm quando a altura é de aproximadamente 463mm.

4 Fixação

A peça a ser usinada será fixada na plataforma. Como é a plataforma que realiza o movimento, é interessante que sua massa da mesa seja reduzida a fim de que a potência utilizada seja para a usinagem e não para a movimentação. Assim, procurou-se o equipamento que apresentasse a menor massa possível e que realizasse devidamente a fixação da peça.

4.1 Morsa

A morsa (figura3) é um equipamento que tem sido muito utilizada como meio de fixação de peças, tanto a hidráulica como a mecânica. Estes equipamentos trabalham tanto nas posições vertical como horizontal ou mesmo lateral, permitindo uma grande flexibilidade para usinagem. Elas oferecem alta pressão de aperto e possibilidade de trabalhar peças interna ou externamente.

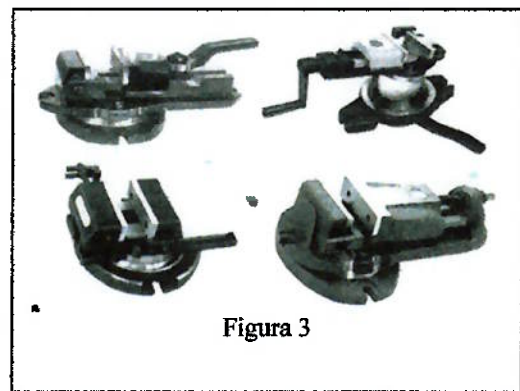


Figura 3

4.2 Fixação com grampos de fixação



Figura 4

Neste tipo de fixação, utiliza-se grampos de fixação junto com tirantes e calços (figura4) de forma a se fixar a peça (vide figura5). Neste caso, é necessária a utilização de pallets, ou seja, placas de fixação em que tivessem canais tipo T ou roscas. Elas

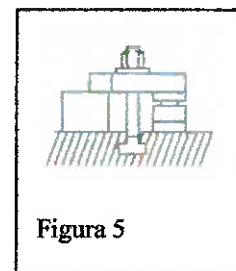


Figura 5

apresentam uma boa pressão de aperto e também flexibilidade para fixação de peças.

4.3 Seleção

O tipo de fixação escolhido foi a fixação com grampos devido à baixa massa. Tanto a morsa como os grampos apresentam características interessantes como flexibilidade e pressão de aperto, porém devido às características do equipamento existente é preferível que o tipo de fixação seja o mais leve possível.

5 Estrutura

Devido às características inerentes a uma plataforma de Stewart, a sua utilização como uma máquina de precisão é muito interessante.

Para que a estrutura resulte numa máquina mais precisa podemos citar alguns princípios de projeto mecânico, que visam tornar um equipamento mais preciso.

- Princípio da isolamento: seria interessante que o equipamento fosse isolado de vibração externa assim como de variação de temperatura ambiental. Poderia-se utilizar uma base para isolamento das vibrações externas e um chuveiro com óleo resfriado.
- Princípio do fluxo de energia: deve-se projetar a máquina tendo em mente que usando motores embutidos pode-se ocorrer uma deformação na base com o aquecimento destes de forma a distorcer a estrutura da máquina.
- Uso de simetria: uma estrutura tipo ponte seria melhor que um tipo C.
- Seleção de materiais: deve-se realizar um estudo dos materiais segundo a estabilidade, resistência, propriedades térmicas, resistência a corrosão e umidade, etc.

Porém o projeto de uma estrutura de precisão seria suficiente para um tema de conclusão de graduação, sendo assim uma sugestão para um futuro projeto.

Assim, decidiu-se por procurar no mercado um equipamento que apresentasse as características necessárias ao projeto.

5.1 Requisitos

Essa estrutura deveria permitir uma translação na direção horizontal, ou seja, no eixo Y. Isso é devido ao fato de que a plataforma de Stewart utilizada não dispõe deste grau de liberdade, limitando a máquina.

Além disso, é desejável que o eixo da ferramenta também fique na

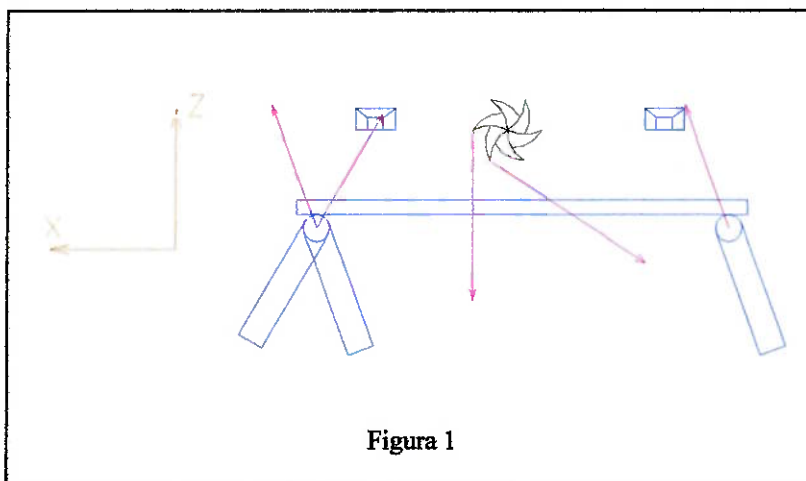
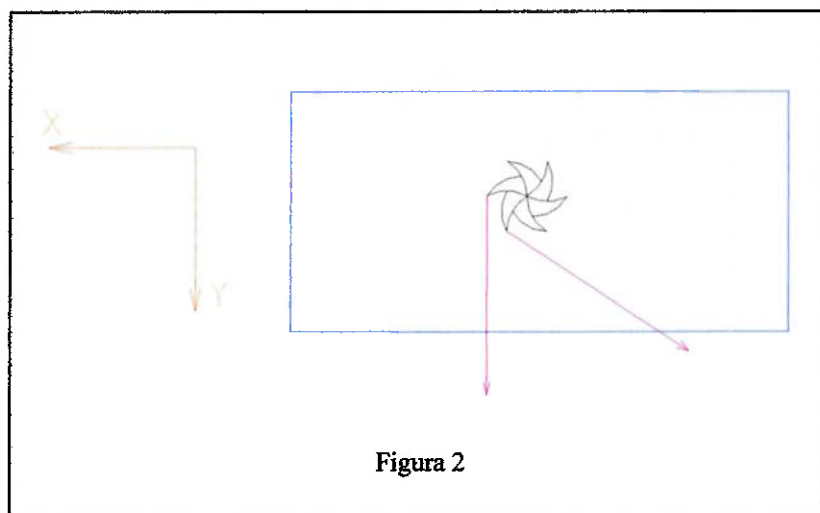


Figura 1

direção do eixo y (horizontal), pois desta forma, a plataforma de Stewart suportaria melhor as reações originadas da força de usinagem (figura 1).

Se a ferramenta ficasse na vertical, as forças estariam no plano XY de forma que não haveria nenhuma parte (suporte) da plataforma que produzisse a força de reação (figura 2). Isto poderia ser uma fonte de vibração indesejável que deve ser evitada.

Desta forma o equipamento que mais se adequa aos requisitos seria uma furadeira vertical utilizada na produção de rasgos em madeira, sendo necessárias algumas alterações, como o acoplamento da



ferramenta fresa ao eixo e da potência do motor, caso seja insuficiente.

6 Avaliação do custo

A implementação da plataforma de Stewart pelos alunos Daniel Moraes e Marcelo Boczko foi possível devido à parceria com as empresas SEW e Phoenix Contact que forneceriam os equipamentos havendo um comprometimento por parte da USP de tornar o equipamento utilizável em feiras e exposições.

Além da plataforma, foi realizada uma pesquisa sobre os preços de peças e equipamentos para a fixação da peça na plataforma e da estrutura de suporte do motor.

6.1 Fixação com grampos

Foram encontradas duas empresas que poderiam fornecer grampos de fixação. As opções 1, 2, 4 e 5 são alternativas com o mínimo de peças necessárias para se realizar a fixação de um objeto, ou seja, a peça. Contudo, ambas empresas disponibilizam um kit (opções 3 e 6), não com o mesmo número de peças, mas que permitem uma flexibilidade muito maior de fixação de uma peça. Assim, a aquisição de um kit seria ideal para qualquer trabalho a ser realizado na máquina-ferramenta.

Embora apresente um menor número de peças o kit da Insdutécnica é o de menor preço sendo o recomendável para a aplicação.

Empresa: Insdutécnica equipamentos industriais Ltda.

Dispositivo de fixação						
Opção 1			Valores em reais			
Referência	descrição	quant.	preço unit.	sub-total	IPI	Total
85175	Conjunto tirante com porcas	2	12.94	25.88	2.59	28.47
73304	Calço universal	2	15.71	31.42	3.14	34.56
70375	Grampo de aperto dentado	2	15.32	30.64	3.06	33.70
Total						96.734
Opção 2						
73304	Calço universal	2	15.71	31.42	3.14	34.56
70375	Grampo de aperto dentado	2	15.32	30.64	3.06	33.70
84848	Tirante	2	3.55	7.10	0.71	7.81
82388	Porca	4	2.07	8.28	0.83	9.11
82834	Arruelas	4	2.28	9.12	0.91	10.03
Total						95.216
Opção 3						
83632	Kit de fixação	1	501.00	501.00	25.05	526.05
OBS: 66 peças						

Empresa: Brasfixo fixo do Brasil Ltda.

Dispositivo de fixação

Opção 4

Valores em reais

Referência	descrição	quant.	preço unit.	sub-total	IPI	Total
78714	Parafusos T	2	38.70	77.40	0.00	77.40
410U	Calço universal	2	12.10	24.20	0.00	24.20
415	Fixador escadinha	2	13.90	27.80	0.00	27.80
4015	Porca	2	3.10	6.20	0.00	6.20
5015	Arruelas	2	2.10	4.20	0.00	4.20
Total						139.80

Opção 5

410U	Calço universal	2	12.10	24.20	0.00	24.20
415	Fixador escadinha	2	15.32	30.64	0.00	30.64
180-PR	Prisioneiro	2	2.50	5.00	0.00	5.00
4015	Porca	4	3.10	12.40	0.00	12.40
5015	Arruelas	4	2.10	8.40	0.00	8.40
Total						80.64

Opção 6

BJG10	Kit de fixação	1	1109.00	1109.00	0.00	1109.00
-------	----------------	---	---------	---------	------	---------

OBS: 98 peças no kit

6.2 Acoplamento da ferramenta fresa com o eixo

Porta fresa

Preço: Entre R\$140,53 a R\$273,56 dependendo do diâmetro (valores à vista).

Empresa: Braita equipamentos industriais Ltda.

Contato: sr. Amaury Ciossani

6.3 Estrutura

Furadeira horizontal

Preço: aproximadamente R\$1500,00

Existe a possibilidade de se obter uma máquina com as características necessárias para o projeto através de doação de um equipamento. Esta possibilidade está sendo estudada, e possivelmente será viabilizada, pelo aluno de pós-graduação Guilherme Raszl.

7 Ensaios

Devido ao comprometimento da USP de ceder a plataforma para SEW em feiras, foi necessário que a mesma apresentasse características de marketing e apresentação. A SEW decidiu por sub-contratar uma empresa, Droid, para a elaboração do projeto visual da máquina. Contudo, a empresa sub-contratada atuou de forma que resultaram em atrasos nos cronogramas. E, por incompetência, acabaram por queimar dois dos quatro inversores de frequência de modo a inviabilizar os ajustes e ensaios propostos no cronograma. Dessa forma, até o momento não foi realizada a interface entre o software desenvolvido e a plataforma, impedindo a realização dos ensaios.

8 Conclusão

Para o desenvolvimento deste projeto, procurou-se fazer um estudo sobre usinagem, em especial, sobre fresamento. Buscou-se bibliografias sobre forças e potências de cortes para fresamento, assim como dados para se projetar o equipamento.

Estudou-se também as plataformas de Stewart familiarizando-se com o sistema já existente, em especial com o sistema Interbus de redes de campo, assistindo, inclusive, um curso sobre o sistema.

Foi realizado também a seleção e o levantamento de preços de equipamentos a serem utilizados. A fixação do peça a ser usinada na plataforma será feita através de grampos de fixação devido à sua menor massa em comparação com outros sistemas de fixação. O equipamento de suporte do motor selecionado foi uma furadeira horizontal. Contudo existe a possibilidade de se conseguir um equipamento mais adequado através do aluno de pós-graduação Guilherme Hazl, por esse motivo, a furadeira não foi adquirida.

Foi implementado também um programa em Visual Basic para o controle do movimento da plataforma, contudo não foi possível realizar os ensaios devido à queima dos inversores de frequência.

Mas pôde-se simular a movimentação da plataforma para verificou-se a área de trabalho que é limitada e não simétrica.

9 Bibliografia

FERRARESI, D.; PALLEROSI, C. A.; RUFFINO, R. T. *Fresamento – Tipos, Operações, Formas construtivas e afiação de fresas, Forças e Potências* Grêmio Politécnico, Departamento de Engenharia Mecânica. 1972.

Machinery's Handbook 25, Vigésima quinta edição, Industrial Press Inc., Nova Iorque, NY, EUA. 1996.

FERRARESI, D.; *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Volume 1. Editora Edgar Blücher Ltda, São Paulo, SP, Brasil. 1970.

Morita, D., Fukunaga, F., Mazza, M. D. M., Paulino, R. S. *Projeto didático de simulador de Voo com base nos princípios de Plataforma de Stewart*. Trabalho de formatura, Universidade de São Paulo, 1999.

www.brasfixo.com.br

www.fixo.com.br

www.adriatica.com.br

www.i-way.co.uk/~storrs/lme/LMEHexapodMachine.html

Guia NEI Abril 2000

Douglas Hergert Visual Basic 4 Bíblia do Programador – tradução Ana Beatriz T. S. Pereira – Editora Berkeley. São Paulo, Berkeley Brasil, 1996.

10 Apêndice

10.1 Tabelas

Tabela 1 – Valores recomendados de avanço por dente para o fresamento de ligas de alumínio

Recommended Cutting Feeds and Speeds for Milling Aluminum Alloys													
Material	Material Condition*	End Milling				Face Milling				Slit Milling			
		HSS		Indexable Insert Uncoated Carbide		Indexable Insert Uncoated Carbide		Polycrystalline Diamond		HSS		Indexable Insert Uncoated Carbide	
		f = feed (0.001 in/tooth), s = speed (ft/min)											
		Opt.	Avg.	Opt.	Avg.	Opt.	Avg.	Opt.	Avg.	Opt.	Avg.	Opt.	Avg.
All wrought aluminum alloys, 6061-T651, 5000, 6000, 7000 series	CD ST and A	f 15 s 165	8 850	15 620	8 2020	39 755	20 1720	8 3750	4 8430	16 1600	8 4680	39 840	20 2390
All aluminum sand and permanent mold casting alloys	CD ST and A												
Aluminum Die-Casting Alloys													
Alloys 308.0 and 319.0	ST and A	f 15 s 30	8 100	15 620	8 2020	39 755	20 1720			16 160	8 375	39 840	20 2390
Alloys 360.0 and 380.0		f 15 s 30	8 90	15 485	8 1905	39 555	20 1380	8 3105	4 7845	16 145	8 355	39 690	20 2320
Alloys 390.0 and 392.0		f s				39 220	20 370						
Alloy 413		f s		15 355	8 1385	39 405	20 665	8 2320	4 4755			39 500	20 1680
All other aluminum die-casting alloys		AC	f 15 s 30	8 90	15 485	8 1905	39 555	20 1380	8 3105	4 7845	16 145	8 335	39 690	20 2320

Abbreviations designate: A, annealed; AC, as cast; CD, cold drawn; and ST and A, solution treated and aged, respectively.

End Milling: Table data for end milling are based on a 3-tooth, 20-degree helix angle tool with a diameter of 1.0 inch, an axial depth of cut of 0.2 inch, and a radial depth of cut of 1 inch (full slot). Use Table 15b to adjust speeds for other feeds and axial depths of cut, and Table 15c to adjust speeds if the radial depth of cut is less than the tool diameter. Speeds are valid for all tool diameters.

Face Milling: Table data for face milling are based on a 10-tooth, 8-inch diameter face mill, operating with a 15-degree lead angle, 3/4-inch nose radius, axial depth of cut = 0.1 inch, and radial depth (width) of cut = 6 inches (i.e., width of cut to cutter diameter ratio = 3/4). These speeds are valid if the cutter axis is above or close to the center line of the workpiece (eccentricity is small). Under these conditions, use Table 15d

to adjust speeds for other feeds and axial and radial depths of cut. For larger eccentricity (i.e., when the cutter axis to workpiece center line offset is one half the cutter diameter or more), use the end and side milling adjustment factors (Tables 15b and 15c) instead of the face milling factors.

Slit and Slot Milling: Table data for slit milling are based on an 8-tooth, 10-degree helix angle tool with a cutter width of 0.4 inch, diameter D of 4.0 inch, and a depth of cut of 0.6 inch. Speeds are valid for all tool diameters and widths. See the examples in the text for adjustments to the given speeds for other feeds and depths of cut.

Tool life for all tabulated values is approximately 45 minutes; use Table 15e to adjust tool life from 15 to 180 minutes. The combined feed/speed data in this table are based on tool grades (identified in Table 16) as follows: uncoated carbide = 15; diamond = 9.

Tabela 2a - Avanço recomendado para fresamento com fresas de aço rápido

Recommended Feed in Inches per Tooth (f_z) for Milling with High Speed Steel Cutters													
Material	Hardness, HB	End Mills								Plain or Slab Mills	Form Relieved Cutters	Face Mills and Shell End Mills	Slotting and Side Mills
		Depth of Cut, .250 in				Depth of Cut, .050 in							
		Cutter Diam., in				Cutter Diam., in							
		1/2	3/4	1 and up	1/4	1/2	3/4	1 and up					
Feed per Tooth, inch													
Free machining plain carbon steels	100-185	.001	.003	.004	.001	.002	.003	.004	.003-.008	.005	.004-.012	.002-.008	
Plain carbon steels, AISI 1006 to 1030; 1513 to 1522	100-150	.001	.003	.003	.001	.002	.003	.004	.003-.008	.004	.004-.012	.002-.008	
	150-200	.001	.002	.003	.001	.002	.002	.003	.003-.008	.004	.003-.012	.002-.008	
	120-180	.001	.003	.003	.001	.002	.003	.004	.003-.008	.004	.004-.012	.002-.008	
	180-220	.001	.002	.003	.001	.002	.002	.003	.003-.008	.004	.003-.012	.002-.008	
AISI 1033 to 1095; 1524 to 1566	220-300	.001	.002	.002	.001	.001	.002	.003	.002-.006	.003	.002-.008	.002-.006	
Alloy steels having less than 3% carbon. Typical examples: AISI 4012, 4023, 4027, 4118, 4320, 4422, 4427, 4615, 4620, 4626, 4720, 4820, 5015, 5120, 6118, 8115, 8620, 8627, 8720, 8822, 9310, 93B17	125-175	.001	.003	.003	.001	.002	.003	.004	.003-.008	.004	.004-.012	.002-.008	
	175-225	.001	.002	.003	.001	.002	.003	.003	.003-.008	.004	.003-.012	.002-.008	
	225-275	.001	.002	.003	.001	.001	.002	.003	.002-.006	.003	.003-.008	.002-.006	
	275-325	.001	.002	.002	.001	.001	.002	.002	.002-.005	.003	.002-.008	.002-.005	
Alloy steels having 3% carbon or more. Typical examples: AISI 1330, 1340, 4032, 4037, 4130, 4140, 4150, 4340, 50B40, 50B60, 5130, 51B60, 6150, 81B45, 8630, 8640, 86B45, 8660, 8740, 94B30	175-225	.001	.002	.003	.001	.002	.003	.004	.003-.008	.004	.003-.012	.002-.008	
	225-275	.001	.002	.003	.001	.001	.002	.003	.002-.006	.003	.003-.010	.002-.006	
	275-325	.001	.002	.002	.001	.001	.002	.003	.002-.005	.003	.002-.008	.002-.005	
	325-375	.001	.002	.002	.001	.001	.002	.002	.002-.004	.002	.002-.008	.002-.005	
Tool steel	150-200	.001	.002	.002	.001	.002	.003	.003	.003-.008	.004	.003-.010	.002-.006	
	200-250	.001	.002	.002	.001	.002	.002	.003	.002-.006	.003	.003-.008	.002-.005	
Gray cast iron	120-180	.001	.003	.004	.002	.003	.004	.004	.004-.012	.005	.005-.016	.002-.010	
	180-225	.001	.002	.003	.001	.002	.003	.003	.003-.010	.004	.004-.012	.002-.008	
	225-300	.001	.002	.002	.001	.001	.002	.002	.002-.006	.003	.002-.008	.002-.005	
Free malleable iron	110-160	.001	.003	.004	.002	.003	.004	.004	.003-.010	.005	.005-.016	.002-.010	
Pearlitic-Martensitic malleable iron	160-200	.001	.003	.004	.001	.002	.003	.004	.003-.010	.004	.004-.012	.002-.018	
	200-240	.001	.002	.003	.001	.002	.003	.003	.003-.007	.004	.003-.010	.002-.006	
	240-300	.001	.002	.002	.001	.001	.002	.002	.002-.006	.003	.002-.008	.002-.005	

Tabela 2b – Continuação da tabela 2a

Recommended Feed in Inches per Tooth (f_t) for Milling with High Speed Steel Cutters (Concluded)												
Material	Hardness, HB	End Mills							Plain or Slab Mills	Form Relieved Cutters	Face Mills and Shell End Mills	Slotting and Side Mills
		Depth of Cut, .250 in			Depth of Cut, .050 in							
		Cutter Diam., in			Cutter Diam., in							
		1/2	3/4	1 and up	1/4	1/2	3/4	1 and up				
		Feed per Tooth, inch										
Cast steel	100-180 180-240 240-300	.001 .001 .001	.003 .002 .002	.003 .003 .002	.001 .001 .0005	.002 .002 .002	.003 .003 .002	.004 .003 .002	.003-.008 .003-.008 .002-.006	.004 .004 .003	.003-.012 .003-.010 .003-.008	.002-.008 .002-.006 .002-.005
Zinc alloys (die castings)	...	.002	.003	.004	.001	.003	.004	.006	.003-.010	.005	.004-.015	.002-.012
Copper alloys (brasses & bronzes)	100-150 150-250	.002 .002	.004 .003	.005 .004	.002 .001	.003 .003	.005 .004	.006 .005	.003-.015 .003-.015	.004 .004	.004-.020 .003-.012	.002-.010 .002-.008
Free cutting brasses & bronzes	80-100	.002	.004	.005	.002	.003	.005	.006	.003-.015	.004	.004-.015	.002-.010
Cast aluminum alloys—as cast	...	.003	.004	.005	.002	.004	.005	.006	.005-.016	.006	.005-.020	.004-.012
Cast aluminum alloys—hardened	...	.003	.004	.005	.002	.003	.004	.005	.004-.012	.005	.005-.020	.004-.012
Wrought aluminum alloys—cold drawn	...	.003	.004	.005	.002	.003	.004	.005	.004-.014	.005	.005-.020	.004-.012
Wrought aluminum alloys—hardened	...	.002	.003	.004	.001	.002	.003	.004	.003-.012	.004	.005-.020	.004-.012
Magnesium alloys	...	.003	.004	.005	.003	.004	.005	.007	.005-.016	.006	.008-.020	.005-.012
Ferritic stainless steel	135-185	.001	.002	.003	.001	.002	.003	.003	.002-.006	.004	.004-.008	.002-.007
Austenitic stainless steel	135-185 185-275	.001 .001	.002 .002	.003 .003	.001 .001	.002 .002	.003 .002	.003 .002	.003-.007 .003-.006	.004 .003	.005-.008 .004-.006	.002-.007 .002-.007
Martensitic stainless steel	135-185 185-225 225-300	.001 .001 .0005	.002 .002 .002	.002 .002 .002	.001 .001 .0005	.002 .002 .001	.003 .002 .002	.003 .003 .002	.003-.006 .003-.006 .002-.005	.004 .004 .003	.004-.010 .003-.008 .002-.006	.002-.007 .002-.007 .002-.005
Monel	100-160	.001	.003	.004	.001	.002	.003	.004	.002-.006	.004	.002-.008	.002-.006

Tabela 3 – Fatores de ajuste de avanço, profundidade de corte e Lead angle

Face Milling Speed Adjustment Factors for Feed, Depth of Cut, and Lead Angle																		
Cutting Speed $V = V_{opt} \times F_f \times F_d \times F_{ar}$																		
Ratio of Chosen Feed to Optimum Feed	Ratio of the two cutting speeds (average/optimum) given in the tables								Depth of Cut, inch (mm), and Lead Angle									
	V_{avg}/V_{opt}								1 in (25.4 mm)					0.4 in (10.2 mm)				
	1.00 1.10 1.25 1.35 1.50 1.00 2.00								15° 45°					15° 45°				
	Feed Factor, F_f								Depth of Cut Factor, F_d					Radial Depth of Cut Factor, F_{ar}				
1.00	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.78	1.11	0.94	1.16	0.90	1.10	1.00	1.29	1.47	1.66
0.90	1.00	1.02	1.05	1.07	1.09	1.10	1.12	1.0	0.78	1.10	0.94	1.16	0.90	1.09	1.00	1.27	1.45	1.58
0.80	1.00	1.03	1.09	1.10	1.15	1.20	1.25	1.0	0.80	1.10	0.94	1.14	0.91	1.08	1.00	1.25	1.40	1.52
0.70	1.00	1.05	1.13	1.22	1.22	1.32	1.43	1.0	0.81	1.09	0.95	1.14	0.91	1.08	1.00	1.24	1.39	1.50
0.60	1.00	1.08	1.20	1.25	1.35	1.50	1.66	1.0	0.81	1.09	0.95	1.13	0.92	1.08	1.00	1.23	1.38	1.48
0.50	1.00	1.10	1.25	1.35	1.50	1.75	2.00	1.0	0.81	1.09	0.95	1.13	0.92	1.08	1.00	1.23	1.37	1.47
0.40	1.00	1.09	1.28	1.44	1.66	2.03	2.43	1.0	0.82	1.08	0.95	1.12	0.92	1.07	1.00	1.21	1.34	1.43
0.30	1.00	1.06	1.32	1.52	1.85	2.42	3.05	1.0	0.84	1.07	0.96	1.11	0.93	1.06	1.00	1.18	1.30	1.37
0.20	1.00	1.00	1.34	1.60	2.07	2.96	4.03	1.0	0.86	1.06	0.96	1.09	0.94	1.05	1.00	1.15	1.24	1.29
0.10	1.00	0.80	1.20	1.55	2.24	3.74	5.84	1.0	0.90	1.04	0.97	1.06	0.96	1.04	1.00	1.10	1.15	1.18

For HSS (high-speed steel) tool speeds in the first speed column, use Table 15a to determine appropriate feeds and depths of cut.

Tabular feeds and speeds data for face milling in Tables 11 through 14 are based on a 10-tooth, 8-inch diameter face mill, operating with a 15-degree lead angle, 3/64-inch cutter insert nose radius, axial depth of cut = 0.1 inch, and radial depth (width) of cut = 6 inches (i.e., width of cut to cutter diameter ratio = 3/4). For other depths of cut (radial or axial), lead angles, or feed, calculate the ratio of desired (new) feed to optimum feed (largest of the two feeds given in the speed table), and the ratio of the two cutting speeds (V_{avg}/V_{opt}). Use these ratios to find the feed factor F_f at the intersection of the feed ratio row and the speed ratio column in the left third of the table. The depth of cut factor F_d is found in the same row as the feed factor, in the center third of the table, in the column corresponding to the depth of cut and lead angle. The radial depth of cut factor F_{ar} is found in the same row as the feed factor, in the right third of the table, in the column corresponding to the radial depth of cut to cutter diameter ratio ar/D . The adjusted cutting speed can be calculated from $V = V_{opt} \times F_f \times F_d \times F_{ar}$, where V_{opt} is the smaller optimum of the two speeds from the speed table (from the left side of the column

containing the two feed/speed pairs).

The cutting speeds as calculated above are valid if the cutter axis is centered above or close to the center line of the workpiece (eccentricity is small). For larger eccentricity (i.e., the cutter axis is offset from the center line of the workpiece by about one-half the cutter diameter or more), use the adjustment factors from Tables 15b and 15c (end and side milling) instead of the factors from this table. Use Table 15c to adjust end and face milling speeds for increased tool life up to 180 minutes.

Slit and Slot Milling: Tabular speeds are valid for all tool diameters and widths. Adjustments to the given speeds for other feeds and depths of cut depend on the circumstances of the cut. **Case 1:** If the cutter is fed directly into the workpiece, i.e., the feed is perpendicular to the surface of the workpiece, as in cutting off, then this table (face milling) is used to adjust speeds for other feeds. The depth of cut factor is not used for slit milling ($F_d = 1.0$), so the adjusted cutting speed $V = V_{opt} \times F_f \times F_{ar}$. For determining the factor F_{ar} , the radial depth of cut ar is the length of cut created by the portion of the cutter engaged in the work. **Case 2:** If the cutter is fed parallel to the surface of the workpiece, as in slotting, then Tables 15b and 15c are used to adjust the given speeds for other feeds. See Fig. 5.

Tabela 4 - Valores de constante de potência

Power Constant, K_p , for High Temperature Alloys, Tool Steel, Stainless Steel, and Nonferrous Metals, Using Sharp Cutting Tools								
Material	Brinell Hardness Number	K_p Inch Units	K_p SI Metric Units	Material	Brinell Hardness Number	K_p Inch Units	K_p SI Metric Units	
High Temperature Alloys				Stainless Steel	150-175	.60	1.64	
A286	165	.82	2.14		175-200	.74	1.97	
A286	285	.93	2.54		200-250	.88	2.40	
Chromoloy	200	.78	2.12	Zinc Die Cast Alloys	...	.25	0.68	
Chromoloy	310	1.18	3.00	Copper (pure)	...	.91	2.48	
Inco 700	330	1.12	3.06	Brass				
Inco 702	230	1.10	3.00	Hard	...	.83	2.27	
Hastelloy-B	430	1.10	3.00	Medium	...	.50	1.36	
M-252	230	1.10	3.00	Soft	...	.25	0.68	
M-252	310	1.20	3.28	Leaded	...	.30	0.82	
Ti-150A	340	.65	1.77	Bronze				
U-500	375	1.10	3.00	Hard	...	.91	2.48	
Monel Metal	...	1.00	2.73	Medium	...	.50	1.36	
				Soft	...	.33	0.90	
Tool Steel	175-200	.75	2.05	Aluminum				
	200-250	.86	2.40	Cast	...	.25	0.68	
	250-300	.98	2.68	Roller (hard)	...	.33	0.90	
	300-350	1.20	3.28	Magnesium Alloys	...	.10	0.27	
	350-400	1.30	3.55					

Tabela 5 - Fator de avanço para constantes de potência, C

Feed Factor, C, for Power Constants							
Inch Units				SI Metric Units			
Feed in. ^a	C	Feed in. ^a	C	Feed mm [†]	C	Feed mm [†]	C
.001	1.60	.014	.97	0.02	1.70	0.35	.97
.002	1.40	.015	.96	0.05	1.40	0.38	.95
.003	1.30	.016	.94	0.07	1.30	0.40	.94
.004	1.25	.018	.92	0.10	1.25	0.45	.92
.005	1.19	.020	.90	0.12	1.10	0.50	.90
.006	1.15	.022	.88	0.15	1.15	0.55	.88
.007	1.11	.025	.86	0.18	1.11	0.60	.87
.008	1.08	.028	.84	0.20	1.08	0.70	.84
.009	1.06	.030	.83	0.22	1.06	0.75	.83
.010	1.04	.032	.82	0.25	1.04	0.80	.82
.011	1.02	.035	.80	0.28	1.02	0.90	.80
.012	1.00	.040	.78	0.30	1.00	1.00	.78
.013	.98	.060	.72	0.33	.98	1.50	.72

^a Turning-in./rev; Milling-in./tooth; Planing and Shaping-in./stroke; Broaching-in./tooth.

[†] Turning-mm/rev; Milling-mm/tooth; Planing and Shaping-mm/stroke; Broaching-mm/tooth.

Tabela 6 - Fator de desgaste da ferramenta para fresamento, W

Tool Wear Factors, W	
Type of Operation	W
For all operations with sharp cutting tools	1.00
Turning: Finish turning (lightcuts)	1.10
Normal rough and semi-finish turning	1.30
Extra-heavy duty rough turning	1.60-2.00
Milling: Slab milling	1.10
End milling	1.10
Light and medium face milling	1.10-1.25
Extra-heavy duty face milling	1.30-1.60
Drilling: Normal drilling	1.30
Drilling hard-to-machine materials and drilling with a very dull drill	1.50
Broaching: Normal broaching	1.05-1.10
Heavy duty surface broaching	1.20-1.30

For planing and shaping, use values given for turning.

Tabela 7 - Fatores de eficiência da máquina ferramenta, E

Machine Tool Efficiency Factors, E			
Type of Drive	E	Type of Drive	E
Direct Belt Drive	.90	Geared Head Drive	.70-.80
Back Gear Drive	.75	Oil-Hydraulic Drive	.60-.90

Tabela 8 – Fórmulas para o cálculo da taxa de remoção de metal, Q

Formulas for Calculating the Metal Removal Rate, Q		
Operation	Metal Removal Rate	
	For Inch Units Only $Q = \text{in.}^3/\text{min}$	For SI Metric Units Only $Q = \text{cm}^3/\text{s}$
Single Point Tools (Turning, Planing, and Shaping)	$12 V f d$	$\frac{V}{60} f d$
Milling	$f_m w d$	$\frac{f_m w d}{60,000}$
Surface Broaching	$12 V w n_r d_r$	$\frac{V}{60} w n_r d_r$

10.2 Interbus

Tradicionalmente, sensores e atuadores são conectados à uma máquina de forma paralela, tornando o sistema pouco flexível, mais caro e menos eficiente. A tecnologia de se interligar os componentes do sistemas através de uma rede serial construída em um nível de automação hierarquicamente mais baixo surge como uma alternativa de redução de custos. Interbus, da Phoenix Contact, é um sistema de barramento sensor/atuador que, devido a suas características técnicas, satisfaz aplicações no campo de sensores e atuadores industriais e dispõe de um sistema de rede consistente desde o nível de controle até a última chave de fim de curso, permitindo o desenvolvimento de soluções tecnológicas universais e versáteis.

Tipo de dados transmitidos

Dados de processamento (Dados de I/O)

Caracterizam-se por possuírem o caráter de informação cíclica que precisa ser periodicamente atualizada pela rede. Ademais, para que as tarefas de controle automático sejam realizadas, é necessário que haja intervalos constantes e calculáveis de varredura. Em outras palavras, os dados de processamento relacionam-se com a demanda de transmissão periódica de dados determinísticos.

Parâmetros

São utilizados para monitorar e programar dispositivos inteligentes. Ao contrário dos dados de processamento, os parâmetros têm caráter acíclico. Isto significa que a informação é transmitida somente mediante solicitação (chamada).

Ambos os tipos (processamento e parâmetro) podem ser usados em qualquer dispositivo sensor/atuador. Para os mais simples, normalmente bastam os dados de processamento; para os mais complexos, requer ambos os tipos (inicialização e parametrização é realizada via parâmetros e valores de rotação ou frequência que são tipicamente determinados por dados de processamento).

Interbus, o barramento sensor/atuador

Além de o perfil sensor/ atuador Interbus ser aceito universalmente, ele também satisfaz as demandas do cliente por soluções “user-friendly”, flexíveis e duradouras.

Com relação à topologia da rede Interbus, esta é na forma de sistema de anel, ou seja, todos os dispositivos são interligados por um caminho cujo início coincide com o fim. A partir do anel principal, subanéis podem ser formados para estruturar todo o sistema. Estas conexões são levadas a usar componentes especiais chamados módulos terminais do barramento (“bus terminal modules”). Um subsistema pode ser de caráter local, denominado barramento local, que é usado para criar cachos de I/O locais dentro de um gabinete de chaveamento. Por outro lado, o subsistema pode ter o papel de unir dispositivos remotos separados por grandes distâncias.

Uma característica exclusiva do sistema Interbus em comparação com os outros sistemas em anel é o fato de, ambas as linhas de transmissão e de recebimento de dados estão contidas em um mesmo cabo que liga cada dispositivo do sistema. Isto dá a nítida impressão de estarmos tratando de uma estrutura em árvore ou linear.

O Interbus permite uma comunicação entre dispositivos através de uma distância superior a 13 km e o número de dispositivos de uma estrutura deve limitar-se a 512.

Topologia Interbus

A estrutura ponto-a-ponto do sistema Interbus e sua divisão em anel principal e subanéis são ideais para implementação de tecnologias de transmissão físicas diversas e, em particular, de tecnologia de transmissão com fibra ótica. O sistema de barramento é equipado de maneira tal que se torna fácil converter um sistema que utiliza fios de cobre para transmissão em um que se vale de tecnologia de fibra ótica ou de transmissão de dados por infravermelho.

A estrutura em anel de Interbus, provê duas vantagens principais: em primeiro lugar, permite que dados sejam enviados e recebidos simultaneamente ("full duplex"); em segundo, a função de auto-diagnóstico é consideravelmente melhorada com a estrutura em anel.

Detecção de problemas

No caso de sistemas de barramento (linha tronco) com conexão entre dispositivos do tipo "multidrop", todos os dispositivos são quase passivamente ligados ao barramento. O caráter passivo dos dispositivos faz com que estes estejam livres apenas dos erros de operação e daqueles oriundos da desconexão dos mesmos. Se, por exemplo, a falha de um dispositivo causa um curto-circuito no barramento ou se a linha estiver curto-circuitada em um ponto fora do dispositivo, nenhum tipo de comunicação ocorre no sistema. Se um tipo de falha ocorre em um sistema de barramento, não é possível detectar a localidade em que ocorreu o erro com as funções de diagnósticos de que dispõem. Por outro lado, um sistema em anel conectado a dispositivos ativos, permite a segmentação de todo o complexo em subsistemas eletricamente independentes. Por conta disso, em caso de falha em um dispositivos (curto-circuito ou desconexão do barramento), a comunicação só é interrompida localmente.

O fato de os subânéis serem configurados na rede Interbus permite conectar ou desconectar dispositivos sem provocar interferência. Os elementos acopladores entre os segmentos do barramento podem ser controlados pelo barramento principal ou mestre e permite que subsistemas sejam habilitados ou desabilitados. Portanto, é possível manipular localmente um subsistema sem afetar o resto do sistema.

Vantagens do sistema em anel para o diagnóstico de problemas

Os dados não são alocados a determinados dispositivos através do endereçamento desses dispositivos no barramento como ocorre nos outros sistemas, mas através da posição física dos mesmos ao longo da estrutura em anel (os dispositivos são ativos). Isso contribui consideravelmente para facilitar a manutenção do sistema.

O protocolo Interbus

o protocolo Interbus é estruturado em três níveis. O primeiro nível é o físico, onde são determinadas as condições de tempo e o formato de codificação dos cabos. O segundo nível é

denominado 'Data Link' que tem como função garantir a integridade dos dados; deve suportar os dois tipos de dados utilizados na tecnologia sensor/atuador: os dados de processamento cíclicos e os parâmetros não cíclicos. Uma característica importante do Data Link do Interbus é seu caráter determinístico, ou seja, a garantia de tempo com a qual os dados são transportados de um dispositivo para outro que se relacionam remotamente.

Interbus baseia-se no procedimento de 'summation-frame' que significa que para cada slot é dado um tempo de processamento associado à sua função, o que torna simples de se calcular o tempo de transmissão através da soma dos tempos de cada slot envolvido.

O protocolo e a topologia do sistema Interbus asseguram pela primeira vez uma integração inovadora da demanda por transporte de dados cíclicos e transporte acíclico de mensagens em um único sistema e, ao mesmo tempo, levam em consideração as demandas de todo o campo por sensores/atuadores industriais.

O usuário do sistema Interbus é também de fundamental importância. Por conta disso, uma interface para aplicação Interbus foi desenvolvida dividida de modo a dividir-se de acordo com os dois tipos de dados. Uma rotina cíclica do barramento principal atualiza os dados e faz com que estes estejam disponíveis para o sistema de controle do usuário em forma de imagem de processos de I/O. Isto significa que os dados podem ser acessados com comandos e lógicas de sintaxe do PLC.

Quando do acesso aos dados, o usuário do sistema Interbus não irá notar diferença entre um sistema de cabeamento serial ou em paralelo. Os usuários não precisam estar familiarizados com as complexas estruturas de comunicação do sistema para que possam programar em protocolo Interbus.

Serviço do PMS (Peripherals Message Specification): permite, entre outras coisas, estabelecer e monitorar links de comunicação, escrita e leitura de parâmetros e iniciar programas.

Fundamentos de programação dos sistema Interbus

O software do driver acessa o Multi-Port-Memory (MPM) da placa controladora através de uma área de 4 kbytes mapeada na memória do PC, no range de 640 kB e 1MB. Para essa região, as seguintes funções são disponibilizadas:

- funções para abertura e fechamento de canais;

- funções para comando de escrita e leitura de mensagens (interface de mailbox, opera com sinais de handshaking e controle de interrupções);
- funções para leitura e escrita de dados de I/O (interface de dados, opera sem mensagens de handshaking);
- funções de diagnóstico para controle do estado de operação da placa controladora.

Controle do Interbus

O aplicativo controla a placa através de comandos tais como, “inicie o sistema de barramento”, “leia na configuração do bus”.

Após inicializar a placa controladora e iniciar a transmissão de dados, a placa controladora opera o barramento de modo independente e retorna as mensagens correspondentes.

Se um erro grave afeta o sistema (por exemplo, ‘cabo do barramento defeituoso’), todos os dispositivos conectados são automaticamente resetados e suas saídas são levadas a zero. Logo em seguida a placa controladora investiga o erro e descreve a sua causa e localização em detalhes.

Estrutura e funcionalidades da interface HLI

HLI (High Language Interface) é a interface com usuário responsável por proporcionar as funcionalidades das funções do Interbus. A HLI converte chamadas de funções do aplicativo em procedimentos complexos de comunicação com a placa controladora Interbus. É uma aplicação passiva, ou seja, apenas será ativada quando associada à chamada de uma função.

Se o aplicativo funciona em um PC, até 4 placas controladoras podem ser operadas ao mesmo tempo. Ademais, o HLI suporta modo de operação controlado por aplicativo. Este modo permite que dados sejam transmitidos em ciclos, sincronizados com o aplicativo.

Dentre as funcionalidades contempladas pela HLI têm-se:

- Inicialização da placa controladora e startup do Interbus;
- Gerenciamento dos dados do processo;
- Gerenciamento de erros e eventos;
- Controle do Interbus;
- Gerenciamento de serviços PCP (peripherals communication protocols);
- Serviços de informação.

Utilizando-se o HLI, pretende-se numa segunda etapa, desenvolver uma programa em Visual Basic de controle dos movimentos da plataforma de modo a funcionar como uma máquina fresadora.

10.3 Código Fonte

```
Attribute VB_Name = "Move_mesa"
Option Explicit

'Variáveis para trabalhar com banco de dados
Dim BancoDeDados As Database
Dim Pontos As Recordset

'Comprimento e largura da plataforma, respectivamente
Dim b As Double 'metade do comprimento
Dim a As Double 'metade da largura
Dim flag_calc_ok As Boolean 'verificação de calculo

'Usando um array para descrever a posição do centro de gravidade
'Em ordem: x, y, z, tetax, tetay
Dim gactual(4) As Double
Dim centrodefault(4) As Double
Dim gdesejado(4) As Double

'array de variável com o ponto a ser alcançado
Dim pontodesejado(2) As Double

'Usando arrays para descrever os pontos da mesa
'Em ordem x, y, z
Dim pontoA(2) As Double
Dim pontoB(2) As Double
Dim pontoC(2) As Double
Dim pontoD(2) As Double

'Pontos fixos padrões
'fisicamente seriam os sensores de fim de curso
Dim pontoEdefault(2) As Double
Dim pontoFdefault(2) As Double
Dim pontoHdefault(2) As Double
Dim pontoIdefault(2) As Double

'Pontos fixos
'fisicamente seriam os sensores de fim de curso
Dim pontoE(2) As Double
Dim pontoF(2) As Double
Dim pontoH(2) As Double
Dim pontoI(2) As Double

'projeções dos pontos A, B, C e D num plano de referencia
Dim pontoMA(2) As Double
Dim pontoMB(2) As Double
Dim pontoMC(2) As Double
Dim pontoMD(2) As Double

'Altura dos fusos
Dim ha As Double
Dim hb As Double
```

```
Dim hc As Double
Dim hd As Double

'valores temporarios da altura h (utilizados como auxiliares)
Dim hat As Double
Dim hbt As Double
Dim hct As Double
Dim hdt As Double

'Diferença de altura a ser movimentado
Dim dha As Double
Dim dhb As Double
Dim dhc As Double
Dim dhd As Double

'Altura máxima e mínima dos fusos
Dim hmax As Double
Dim hmin As Double

'Passo a ser escolhido pelo usuario
Dim ppasso As Double

'Comprimento das barras
Dim l1 As Double 'l1 é a barra mais comprida
Dim l2 As Double 'l2 são as outras 3 barras

'Avanço para usinagem
Dim avanço As Double

'Passo da rosca
Dim passorosca As Double

'relação entre o numero de pulsos e a rotação do fuso
Dim pv As Double

'procedimento para alterar as dimensoes da mesa
Public Sub dimensoes(compr As Double, larg As Double)
    b = compr / 2
    a = larg / 2
End Sub

'procedimento para alterar o comprimento das barras
Public Sub dimbarras(barral As Double, barra2 As Double)
    l1 = barral
    l2 = barra2
End Sub

'procedimento para alterar o centro de gravidade atual
Public Sub alterapg(x As Double, y As Double, z As Double)
    gatual(0) = x
    gatual(1) = y
    gatual(2) = z
End Sub

'procedimento para alterar o ponto E
Public Sub alterape(x As Double, y As Double, z As Double)
    pontoE(0) = x
    pontoE(1) = y
    pontoE(2) = z
End Sub

'procedimento para alterar o ponto f
Public Sub alterapf(x As Double, y As Double, z As Double)
    pontoF(0) = x
    pontoF(1) = y
```

```

pontoF(2) = z
End Sub
'procedimento para alterar o ponto h
Public Sub alteraph(x As Double, y As Double, z As Double)
pontoH(0) = x
pontoH(1) = y
pontoH(2) = z
End Sub
'procedimento para alterar o ponto i
Public Sub alterapi(x As Double, y As Double, z As Double)
pontoI(0) = x
pontoI(1) = y
pontoI(2) = z
End Sub
'procedimento de alteracao de avanço
Public Sub altera_avanco(avanco1 As Double)
avanco = avanco1
End Sub
'Procedimento de alteracao de pv
Public Sub altera_pv(pv1 As Double)
pv = pv1
End Sub
'Procedimento de alteracao do passo da rosca
Public Sub altera_passorosca(passoroscal As Double)
passorosca = passoroscal
End Sub

'Função que converte grau para radiano
Private Function muda(grau As Double) As Double
Const pi = 3.1416
Dim arco
arco = pi * grau / 180
muda = arco
End Function
'Função que calcula as coordenadas do ponto A, B, C e D
Public Sub pontosABCD()

'Cálculos
pontoA(0) = gatural(0) + b * Cos(gatural(4))
pontoA(1) = gatural(1)
pontoA(2) = gatural(2) - b * Sin(gatural(4))

pontoB(0) = gatural(0) + b * Cos(gatural(4))
pontoB(1) = gatural(1)
pontoB(2) = gatural(2) - b * Sin(gatural(4))

pontoC(0) = gatural(0) - b * Cos(gatural(4))
pontoC(1) = gatural(1) - a * Cos(gatural(3))
pontoC(2) = gatural(2) - a * Sin(gatural(3)) + b * Sin(gatural(4))

pontoD(0) = gatural(0) - b * Cos(gatural(4))
pontoD(1) = gatural(1) + a * Cos(gatural(3))
pontoD(2) = gatural(2) + a * Sin(gatural(3)) + b * Sin(gatural(4))

End Sub

Private Sub testa_h(hzinho As Double)
If hzinho > hmax Then
    flag_calc_ok = False
End If
If hzinho < hmin Then
    flag_calc_ok = False

```

```
End If
End Sub

'Procedimento que verifica se as juntas estão dentro
'dos limites de ângulos
Private Sub testa_junta()
Dim valor_absoluto As Double
valor_absoluto = Abs(ha - hc)

If valor_absoluto > 1000 Then
    flag_calc_ok = False
End If
End Sub

'Procedimento para calcular os valores das projeções
Private Sub calc_M()
'As projeções mantêm as posições de x e y, alterando apenas a altura

    pontoMA(0) = pontoA(0)
    pontoMA(1) = pontoA(1)
    pontoMA(2) = pontoE(2)

    pontoMB(0) = pontoB(0)
    pontoMB(1) = pontoB(1)
    pontoMB(2) = pontoF(2)

    pontoMC(0) = pontoC(0)
    pontoMC(1) = pontoC(1)
    pontoMC(2) = pontoI(2)

    pontoMD(0) = pontoD(0)
    pontoMD(1) = pontoD(1)
    pontoMD(2) = pontoH(2)

End Sub

'Função que calcula o módulo entre dois pontos
Public Function calc_modulo(ponto1() As Double, ponto2() As Double) As Double
Dim auxiliar As Double
Dim r1 As Double
Dim r2 As Double
Dim p1 As Double
Dim p2 As Double
Dim q1 As Double
Dim q2 As Double

p1 = ponto1(0)
p2 = ponto2(0)
q1 = ponto1(1)
q2 = ponto2(1)
r1 = ponto1(2)
r2 = ponto2(2)

auxiliar = Sqr((p1 - p2) ^ 2 + (q1 - q2) ^ 2 + (r1 - r2) ^ 2)
calc_modulo = auxiliar

End Function

Public Function calc_tempo(distancial As Double, avancol As Double) As Double
calc_tempo = distancial / avancol
End Function
```

```
Private Function calc_h(ponto1() As Double, ponto2() As Double, ponto3() As Double, barra As Double) As Double

Dim auxh As Double
'auxiliares para armazenar o valor dos módulos
Dim valor1 As Double
Dim valor2 As Double

valor1 = calc_modulo(ponto1, ponto2)
valor2 = calc_modulo(ponto2, ponto3)

If valor2 > barra Then
    'o valor2 representa a projeção da barra num plano de referencia
    'assim, não faz sentido se a projeção for maior que a própria barra
    flag_calc_ok = False
Else
    auxh = valor1 - Sqr(barra ^ 2 - valor2 ^ 2)
End If

calc_h = auxh

End Function

Public Sub simula1()
Dim valordeteste As Double
'Recebe os dados da mesa

'Mostrando o formulario2, formulario de configuração
formulario2.Show

'inserir as posições dos pontos E, F, H e I

'Inserir os comprimentos das barras

'Inserir as alturas máximas

'Usar os valores padrão

End Sub
'Procedimento de simulação
Public Sub simula2()
Dim indice As Integer
Dim xmax As Double
Dim xaux As Double
Dim aux22 As Double

indice = 0
Set BancoDeDados = OpenDatabase(App.Path & "\mesa1.mdb")
Set Pontos = BancoDeDados.OpenRecordset("Mesa1", dbOpenTable)

'Limpando o arquivo
Do While Pontos.EOF <> True
    Pontos.Delete
    Pontos.MoveNext
Loop 'while para limpar o arquivo

xmax = 0
'Inicializa com valores padrão
Call inicializa_default
```

```

iaux = gactual(0)

'simulação na direção positiva de x
Do While gactual(2) < hmax + 444.33
  'Begin (do while)
  Do
    'Begin (do until)
    flag_calc_ok = True

    gactual(0) = gactual(0) - 0.1
    Call pontosABCD

    'calcular ponto m
    Call calc_M

    'calcula as alturas nos fusos e verifica se estão dentro dos limites
    ha = calc_h(pontoA, pontoMA, pontoE, 11)
    Call testa_h(ha)
    hb = calc_h(pontoB, pontoMB, pontoF, 12)
    Call testa_h(hb)
    hc = calc_h(pontoC, pontoMC, pontoH, 12)
    Call testa_h(hc)
    hd = calc_h(pontoD, pontoMD, pontoI, 12)
    Call testa_h(hd)

    If xmax < gactual(0) Then
      xmax = gactual(0)
    End If

    If aux22 < hc Then
      aux22 = hc
    End If
    DoEvents 'End (Loop Until)
  Loop Until flag_calc_ok = False

  'Gravando no banco de dados
  Pontos.AddNew
  Pontos("Codigo") = indice
  Pontos("Ponto_x") = gactual(0)
  Pontos("Ponto_z") = gactual(2)
  Pontos.Update

  gactual(2) = gactual(2) + 0.1
  gactual(0) = iaux
  indice = indice + 1
Loop 'do while

indice = indice + 1

flag_calc_ok = True

'Fechando o banco de dados
Pontos.Close
BancoDeDados.Close

End Sub

Public Sub inicializa_default()

'Comprimento e largura da plataforma, respectivamente
b = 140
a = 120

```

```
flag_calc_ok = True
```

```
'Usando um array para descrever a posição do centro de gravidade
```

```
'Em ordem: x, y, z, tetax, tetay
```

```
centrodefault(0) = -2.91
```

```
centrodefault(1) = 0
```

```
centrodefault(2) = 444.33
```

```
centrodefault(3) = 0
```

```
centrodefault(4) = 0
```

```
gatural(0) = centrodefault(0)
```

```
gatural(1) = centrodefault(1)
```

```
gatural(2) = centrodefault(2)
```

```
gatural(3) = centrodefault(3)
```

```
gatural(4) = centrodefault(4)
```

```
'Pontos fixos
```

```
'fisicamente seriam os sensores de fim de curso
```

```
pontoEdefault(0) = 426
```

```
pontoEdefault(1) = 0
```

```
pontoEdefault(2) = 0
```

```
pontoFdefault(0) = 0
```

```
pontoFdefault(1) = 0
```

```
pontoFdefault(2) = 0
```

```
pontoHdefault(0) = -265
```

```
pontoHdefault(1) = 115
```

```
pontoHdefault(2) = 0
```

```
pontoIdefault(0) = -265
```

```
pontoIdefault(1) = -115
```

```
pontoIdefault(2) = 0
```

```
Call pontosABCD
```

```
Call calc_M
```

```
'Altura dos fusos
```

```
ha = 0
```

```
hb = 0
```

```
hc = 0
```

```
hd = 0
```

```
'Altura máxima e mínima dos fusos
```

```
hmax = 360
```

```
hmin = 0
```

```
'Comprimento das barras
```

```
l1 = 529.4 'original = 530
```

```
l2 = 461 'original = 465
```

```
'Passo padrão
```

```
ppasso = 1
```

```
End Sub
```

```
'Função que calcula o coeficiente angular da reta
```

```
Public Function coefang(x1, z1, x2, z2 As Double) As Double
```

```
Dim auxiliar As Double
```

```
    auxiliar = (z1 - z2) / (x1 - x2)
    coefang = auxiliar
End Function
'Procedimento para mostrar a posição atual da mesa
Public Sub Pos_atual()
Dim auxiliar1 As String
Dim auxiliar2 As String
Dim auxiliar3 As String

auxiliar1 = CStr(gatual(0))
auxiliar2 = CStr(gatual(2))
auxiliar3 = auxiliar1 + ", " + auxiliar2

MsgBox (auxiliar3)
End Sub
'Procedimento que calcula os valores das alturas dos fusos
Public Sub Calcula_h()
    Call pontosABCD
    ha = calc_h(pontoA, pontoMA, pontoE, 11)
    hb = calc_h(pontoB, pontoMB, pontoF, 12)
    hc = calc_h(pontoC, pontoMC, pontoH, 12)
    hd = calc_h(pontoD, pontoMD, pontoI, 12)
End Sub
'Procedimento para armazenar o valor temporario das alturas dos fusos
Private Sub guarda_htemp()
    hat = ha
    hbt = hb
    hct = hc
    hdt = hd
End Sub
'Procedimento que calcula a diferença da posição atual
'no fuso para uma posição seguinte
Private Sub dif_h()
    dha = ha - hat
    dhb = hb - hbt
    dhc = hc - hct
    dhd = hd - hdt
End Sub
'Procedimento de movimentação dos fusos
Public Sub movimenta_fusos(tempo1 As Double)
Dim rot_a As Double
Dim rot_b As Double
Dim rot_c As Double
Dim rot_d As Double

Dim speed_a As Double
Dim speed_b As Double
Dim speed_c As Double
Dim speed_d As Double

'Movimentar de acordo com dha, dhb, dhc, dhd

'Calcula o numero de pulsos
formulario3.Text2.Text = CStr(dha)
rot_a = dha * 2 * pi / passorosca
rot_b = dhb * 2 * pi / passorosca
rot_c = dhc * 2 * pi / passorosca
rot_d = dhd * 2 * pi / passorosca

pulsos_a = rot_a * pv
pulsos_b = rot_b * pv
```



```
pulsos_c = rot_c * pv
pulsos_d = rot_d * pv

'calcular velocidade
speed_a = pulsos_a / tempol
speed_b = pulsos_b / tempol
speed_c = pulsos_c / tempol
speed_d = pulsos_d / tempol

'Enviar velocidade

'Enviar pulsos

End Sub

'Altera o passo a ser adotado
Public Sub altera_passo(novopasso As Double)
    ppasso = novopasso
End Sub

'Procedimento para alterar o ângulo da mesa
Public Sub rotaciona(atx, aty As Double)

End Sub

'Procedimento que faz a movimentação, em linha reta
'dado um determinado passo
Public Sub movimenta(ax, az, atx, aty As Double)
    Dim auxx As Double
    Dim auxz As Double
    Dim coef As Double
    Dim passo As Double
    Dim hal As Double
    Dim hbl As Double
    Dim hcl As Double
    Dim hdl As Double
    Dim dist1 As Double
    Dim tempol As Double

    gdesejado(1) = gatural(1)

    gdesejado(0) = ax
    gdesejado(2) = az

    dist1 = calc_modulo(gatural, gdesejado)
    tempol = calc_tempo(dist1, avanco)

    'Caso xfinal = xinicial
    If gdesejado(0) = gatural(0) Then
        If gdesejado(2) > gatural(2) Then
            passo = ppasso
            tempol = tempol * passo / (gdesejado(2) - gatural(2))
            Do While gatural(2) < gdesejado(2)
                Call Calcula_h
                Call guarda_h temp
                gatural(2) = gatural(2) + passo
                Call Calcula_h
                Call dif_h
                Call movimenta_fusos(tempol)
            Loop
        Else
            passo = -ppasso
```

```

tempo1 = tempo1 * passo / (gdesejado(2) - gatural(2))
Do While gatural(2) > gdesejado(2)
  Call Calcula_h
  Call guarda_h temp
  gatural(2) = gatural(2) + passo
  Call Calcula_h
  Call dif_h
  Call movimenta_fusos(tempo1)
Loop
End If
Else 'Sendo os pontos x iniciais e finais diferentes
  'se os pontos z inicial e final forem iguais
  If gdesejado(2) = gatural(2) Then
    If gdesejado(0) > gatural(0) Then
      passo = ppasso
      tempo1 = tempo1 * passo / (gdesejado(0) - gatural(0))
      Do While gatural(0) < gdesejado(0)
        Call Calcula_h
        Call guarda_h temp
        gatural(0) = gatural(0) + passo
        Call Calcula_h
        Call dif_h
        Call movimenta_fusos(tempo1)
      Loop
    Else
      passo = -ppasso
      tempo1 = tempo1 * passo / (gdesejado(2) - gatural(2))
      Do While gatural(0) > gdesejado(0)
        Call Calcula_h
        Call guarda_h temp
        gatural(0) = gatural(0) + passo
        Call Calcula_h
        Call dif_h
        Call movimenta_fusos(tempo1)
      Loop
    End If
  Else 'caso os z sejam diferentes
    coef = coefang(gatural(0), gatural(2), gdesejado(0), gdesejado(2))
    If gatural(0) < gdesejado(0) Then
      passo = ppasso
      tempo1 = tempo1 * passo / (gdesejado(2) - gatural(2))
    Do While gatural(0) < gdesejado(0)
      Call Calcula_h
      Call guarda_h temp
      gatural(0) = gatural(0) + passo
      gatural(2) = gatural(2) + passo * coef
      Call Calcula_h
      Call dif_h
      Call movimenta_fusos(tempo1)
    DoEvents
  Loop
    Else
      passo = -ppasso
      tempo1 = tempo1 * passo / (gdesejado(2) - gatural(2))
      Do While gatural(0) > gdesejado(0)
        Call Calcula_h
        Call guarda_h temp
        gatural(0) = gatural(0) + passo
        gatural(2) = gatural(2) + passo * coef
        Call Calcula_h
        Call dif_h
        Call movimenta_fusos(tempo1)

```

```
        DoEvents
    Loop
End If
End If
End If
End Sub
```