

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

BRUNO PACE

RODOLFO FERRONATTO DE SOUZA

**Sistema de Controle de Posicionamento de
Câmera Fotográfica para
Animação Stop-Motion**

SÃO PAULO

2007

Bruno Pace
Rodolfo Ferronato de Souza

**Desenvolvimento de Sistema de Controle de Posicionamento de uma
Câmera Fotográfica para Animação Stop-Motion**

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica com
Ênfase em Automação e Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Fernando Scavone

São Paulo

2007

“Ao término de um período de decadência sobrevém o ponto de mutação. A luz poderosa que fora banida ressurgue. Há movimento, mas este não é gerado pela força... O movimento é natural, surge espontaneamente. Por essa razão, a transformação do antigo torna-se fácil. O velho é descartado, e o novo é introduzido. Ambas as medidas se harmonizam com o tempo, não resultando daí, portanto, nenhum dano”

I Ching

Dedicamos esse trabalho aos nossos pais, por todo apoio. Um agradecimento especial para: professor Julio Cezar Adamowski, Eleandro Ferronato e Adilson Félix pela enorme ajuda para realização desse projeto.

SUMÁRIO

Resumo

Abstract

1	<i>Introdução</i>	1
2	<i>Objetivo</i>	4
3	<i>Requisitos</i>	5
3.1	Técnicos	5
3.2	Operacionais	5
3.3	Parâmetros de projeto	6
4	<i>Análise de Soluções</i>	7
4.1	Estrutura	7
4.2	Transmissão	10
4.3	Motores	10
4.4	Controlador	11
4.5	Matriz de Decisão	11
5	<i>Design Preliminar</i>	14
6	<i>Espiral de projeto</i>	15
7	<i>Solução Final</i>	16
8	<i>Modelos</i>	20
8.1	Eixo principal da caixa de redução	20
8.2	Dimensionamento dos motores	23
8.3	Cálculo das Correias e Sistema de Transmissão	24

9	<i>Programação e Acionamento</i>	26
9.1	Arquitetura	26
9.2	Lógica	28
9.3	Calibração	28
10	<i>Discussão</i>	30
11	<i>Conclusão</i>	30
12	<i>Referências</i>	32
13	<i>Bibliografia</i>	33

Resumo

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema de posicionamento de precisão de uma câmera fotográfica para animação *Stop Motion*, uma técnica de animação com modelos reais, geralmente em massa de modelar. O efeito da animação é criado pela rápida passagem de uma sequência de fotos tiradas com os cenários e modelos, a uma taxa de 24 frames por segundo.

Para a criação do efeito de movimento de câmera na animação (*travelling*), deve-se movimentar pouco a pouco a câmera, de um frame a outro. Entretanto, as dificuldades de se obter um efeito de movimento de câmera preciso com posicionamento manual tornam o trabalho de animação muito lento, chegando a levar um dia inteiro para conclusão de 10 segundos de animação.

O requisito mais importante para a obtenção de um travelling bem feito é o de repetir as posições da câmera em cada ponto. Dessa forma, a garantia de precisão (repetibilidade) foi o foco principal do projeto.

O sistema criado utiliza um microcontrolador e três drivers para acionar motores de passo, com controle em malha aberta. Um painel de controle posiciona a câmera na posição desejada e permite ao usuário armazenar os pontos desejados, de forma que ele possa voltar exatamente aos pontos onde foi tirada a primeira sequência de fotos.

Cada um dos três motores controla um grau de liberdade, sendo um para deslocamento linear de 2,5m e os outros dois em rotação: uma em torno de um eixo vertical (pan) e outro em um eixo horizontal (tilt).

Abstract

This work consists of the development of a precision positioning system for a photographic camera for Stop Motion animation, a technique which makes a physically manipulated object appear to move. The object is moved by very small amounts between individually photographed frames, creating the illusion of movement when the series of frames is played as a continuous sequence, generally at a rate of 24 frames per second. Clay figures are often used in stop motion animations. To create the effect of camera motion (travelling), the camera should be slightly changed in position from one frame to another. However, it can be highly difficult to obtain a precise effect by manually positioning the camera. Professionals involved with animation spend a whole day to create about 10 seconds of animation. The most important task to be achieved to obtain a good travelling is the repeatability of the points of each sequence (the camera position and angles). Thus, the requirement of precision was the aim of this work. The system developed has a microcontroller and three drivers with stepper motor with open-loop control. A control terminal drives the camera to the desired position and allows the user to store the points where the camera stopped, in a way that one can bring the camera exactly to the points of the sequence. Each of the motors controls one degree of freedom, being one for linear motion with a range of approximately 2,5m and the other two for rotations: one about a vertical axis (pan) and the other about a horizontal axis (tilt).

1 Introdução

Este trabalho teve como objetivo o projeto e fabricação de uma máquina de controle de movimento de câmera fotográfica para animação, *Stop motion*, uma modalidade de animação que utiliza modelos reais em diversos materiais, dentre os mais comuns a massa de modelar. Em trabalhos profissionais, para o cinema, por exemplo, tendo em vista a necessidade de durabilidade, os materiais são especiais, muito resistentes e de alta maleabilidade.

Neste sistema, os modelos são movimentados e fotografados quadro a quadro, os quais são posteriormente combinados de maneira a criar a impressão de movimento, que ocorre em razão de um fenômeno oftálmico chamado de Persistência Retiniana. A frequência de frames pode variar com a técnica empregada, entretanto a taxa mais comum é de 24 frames por segundo.

Geralmente são acrescentados também efeitos sonoros como falas ou música. Exemplos de filmes feitos com a técnica são: “O Estranho Mundo de Jack [1]”, “A Fuga das Galinhas [2]”, “A Noiva Cadáver [3] e “Wallace e Gromit [4]”.

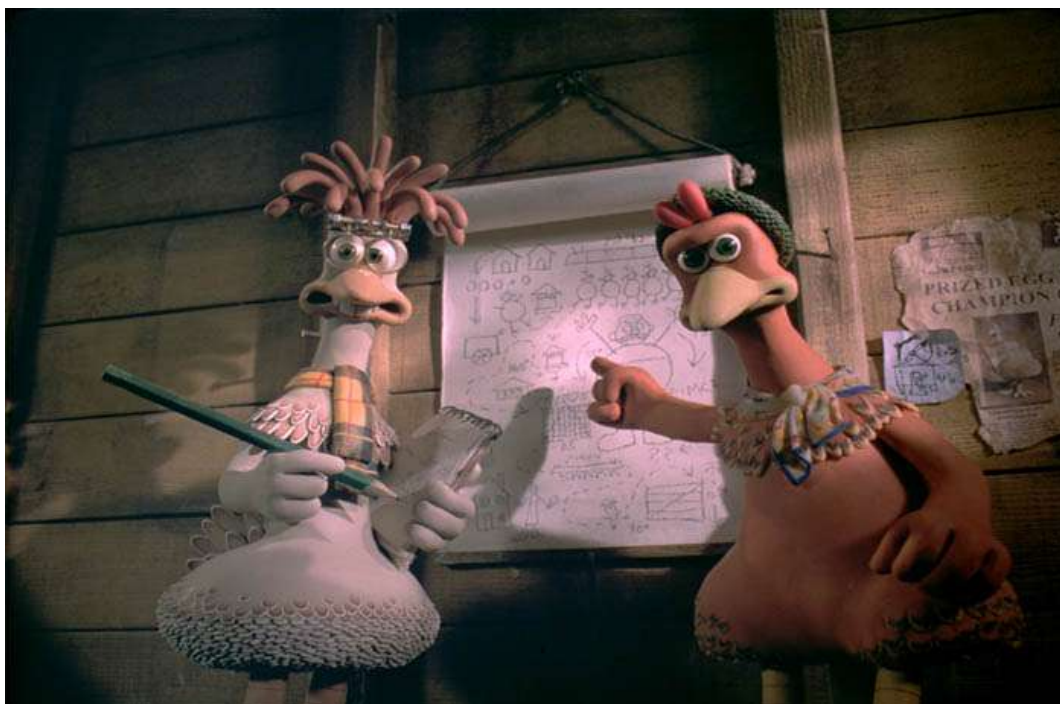


Figura 1 - A fuga das galinhas

Nesse processo de animação, a câmera pode ficar parada ou mudar de posição de um *frame* para outro. Nesse último, gera-se a impressão de

movimento de câmera, chamado *travelling*. Para criar esse movimento, são utilizadas geralmente guias lineares de movimentação manual por manivelas, em conjunto com uma régua para o posicionamento. Depois de concluídas as fotos de uma seqüência, é preciso criar uma nova seqüência de fotos nas mesmas posições somente com o cenário; isso porque são usados sustentadores acoplados aos bonecos para mantê-los na posição desejada. Através da superposição das fotos correspondentes de cada uma das seqüências, consegue-se apagar esses objetos, que não devem aparecer na imagem.



Figura 2 - Detalhe do sustentador

Com o posicionamento manual, a precisão alcançada deixa a desejar, sendo necessária uma correção em Photoshop quadro a quadro para ajustar a imagem, o que despense um tempo grande. Surge então a necessidade de repetir com precisão a posição da câmera.



Figura 3 - Detalhe do sustentador

Para suprir essa necessidade, já foram criadas algumas soluções disponíveis no mercado atualmente. Elas consistem em dispositivos eletromecânicos que, através de processadores e atuadores, controlam o posicionamento com a precisão requerida. Entretanto, os equipamentos encontrados são extremamente caros e, conseqüentemente, pouco difundidos. A idéia desse trabalho foi implementar um *motion control* de baixo custo.

2 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho foi atingir a precisão desejada, ou seja, após a sequência de pontos ter sido armazenada, permitir ao usuário repetir as posições de maneira a não haver nenhuma diferença perceptível ao olho humano entre as duas fotografias correspondentes de cada ponto (uma só com o cenário e a outra com o cenário e os modelos). Para tanto, a rigidez estática foi um dos objetivos secundários, assim como a completa eliminação de folgas.

O projeto mecânico e eletrônico correram em paralelo durante todo o desenvolvimento, apesar de estarem amarrados entre si. Para a seleção dos motores, foi necessário estimar tanto os momentos de inércia dos sistemas acionados quanto a corrente fornecida pelo driver.

3 Requisitos

3.1 Técnicos

O levantamento dos requisitos foi feito com a colaboração do estúdio de animação Coala Filmes, co-realizadora desse projeto. Essa etapa consistiu basicamente de várias reuniões com os cineastas da produtora.

Foi destacado que em grande parte das aplicações - seja em filmes comerciais, curtas ou longas-metragens - o controle do movimento de translação horizontal e de duas rotações, conhecidas como tilt e pan, seriam suficientes. Decidiu-se então desenvolver uma máquina que controlasse apenas esses três graus de liberdade de modo a simplificar e baratear o sistema, assim como reduzir as suas dimensões e complicações na obtenção da rigidez necessária.

Desde o começo do projeto tem-se em mente o possível aluguel deste equipamento, e um dos problemas levantados pela Coala Filmes foi a dificuldade de transporte de certos equipamentos demasiadamente grandes e pesados. Surgiu então a necessidade de uma máquina leve e compacta restringindo, desta forma, a escolha das possíveis soluções.

Dentre os requisitos, aquele de maior importância é o que limita o custo final do protótipo - visto que são encontradas no mercado soluções para essa aplicação, ainda que caras. Os preços desses equipamentos chegam inclusive a inviabilizar o aluguel ou compra pela maioria dos estúdios.

3.2 Operacionais

Os usuários serão pessoas que trabalham com comunicação, pessoas que, de uma forma geral, não têm familiaridade com programação. Por isso, o equipamento como um todo precisa ser de fácil uso, sendo isso decisivo no sucesso comercial do produto. Inicialmente, a comunicação com a máquina seria via computador (com interface e comunicação através da porta serial). Entretanto, para facilitar o uso, decidiu-se desenvolver um painel de controle com botões bastante *user friendly*.

3.3 Parâmetros de projeto

Baseado nos requisitos técnicos e operacionais acima descritos e utilizando-se da experiência dos cineastas da Coala Filmes, alguns parâmetros de projeto foram quantificados:

Graus de liberdade: 3 (duas rotações e uma translação)

Dimensões máximas do equipamento: 3 x 0,4 x 0,5 m

Peso máximo da máquina: 60kg

Resolução de posicionamento: 0,1mm linear e 1/8° angular

Precisão mínima de posicionamento: 0,01mm

Peso máximo do conjunto da máquina fotográfica: 1,5kg

Peso da “cabeça”: 6,5kg

Velocidade mínima de operação: 0,05m/s

Custo máximo: R\$4.000,00

4 Análise de Soluções

4.1 Estrutura

Tradicionalmente para movimento de translação com precisão utilizam-se guias lineares. Optou-se pelo uso de uma guia linear com um patim de deslizamento. A Coala Filmes disponibilizou uma “cabeça” para acoplamento da câmera com dois eixos de rotação (tilt e pan) na qual já existem entradas para o eixo dos motores com rasgo de chaveta.



Figura 4 - cabeça para suporte de câmera



Figura 5 - detalhe do rasgo de chaveta

Essa “cabeça” deveria ir sobre o patim na guia linear. O esboço abaixo ilustra essa solução:

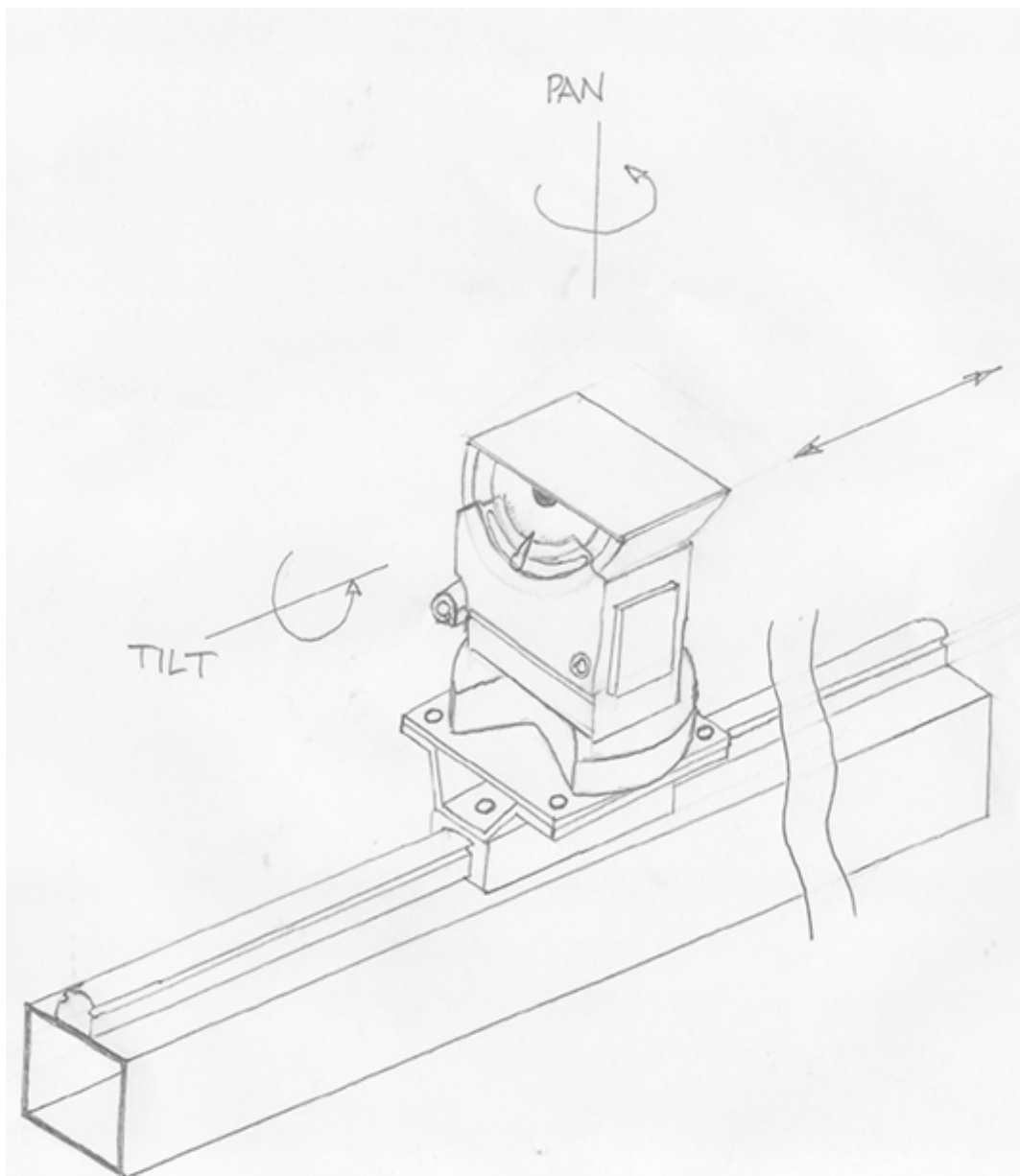


Figura 6 - Estrutura básica

Ao longo do desenvolvimento do projeto, alguns fatores levaram a um re-projeto da cabeça. A cabeça que havia sido disponibilizada não pôde mais ser utilizada e foi necessário projetar um mecanismo de dois graus de liberdade em rotação. Para atender à resolução que deveríamos atingir, cada grau de liberdade consiste em um conjunto de polias sincronizadoras com uma relação de transmissão de 8,4 vezes. Essa redução também gerou, além de uma resolução mais fina, um aumento do torque disponível e uma queda na

velocidade angular – que não interfere de maneira grave no desempenho do sistema, dado que é um sistema de posicionamento.

Para a movimentação do conjunto patim - “cabeça” foi utilizado um sistema de transmissão acionado por motor e um driver de potência.

4.2 Transmissão

Como citado anteriormente, para guias com acionamento manual, o uso de fuso com castanha de esferas recirculantes é a solução normalmente adotada (inclusive pela Coala) para a execução do *travelling*.



Figura 7 - fuso com castanha de esferas

Contudo, durante o processo de cotação de preços, notamos que o uso do fuso aumentaria consideravelmente o custo do projeto. Outras soluções possíveis são o uso de polias com correias sincronizadoras ou fio metálico para a transmissão.

4.3 Motores

Dentre as possibilidades de atuadores estavam o motor de passo ou o motor de corrente contínua. O primeiro tem a vantagem da malha aberta, mais

simples de implementar e sem a necessidade de utilização de encoder e/ou tacogerador para realização do controle. Com esse tipo de motor, consegue-se facilmente obter precisão de posicionamento. Uma outra vantagem do motor de passo é a facilidade de interação com o processador. Por outro lado a vantagem em se trabalhar em malha fechada é a garantia de correto posicionamento. Caso haja, por exemplo, um pico de torque na carga, o motor de passo pode perder passos, o que não será detectado pelo sistema.

4.4 Controlador

Finalmente, para o controlador duas soluções possíveis seriam do tipo 8051 ou da linha Rabbit. A vantagem de uma arquitetura baseada no controlador 8051 é o baixo custo. Em compensação, o uso de uma placa de desenvolvimento da linha Rabbit reduziria a complexidade do projeto. A programação do controlador deverá ser feita em C, utilizando-se de um compilador caso necessário. Todo o controle feito pelo usuário é feito através de um painel com botões que permitem acesso a todo tipo de recurso que o equipamento pode oferecer para obter os resultados finais desejados na animação: o sistema é totalmente independente do computador.

4.5 Matriz de Decisão

Dessa forma, através da combinação desses possíveis subsistemas obtivemos cinco boas soluções a testar em uma matriz de decisão.

Estas são apresentadas na tabela a seguir:

	Solução A	Solução B	Solução C	Solução D	Solução E
Transmissão	Fuso de Esferas Recirculantes	Correias Sincronizadoras	Correias Sincronizadoras	Fuso de Esferas Recirculantes	Fio Metálico

Atuadores	Motores CC	Motores CC	Motores de Passo	Motores de Passo	Motores de Passo
Controlador	8051	Rabbit	Rabbit	Rabbit	8051

Com estas soluções, montamos uma matriz de decisão:

		Solução A	Solução B	Solução C	Solução D	Solução E
Critérios	Peso	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota
Custo	10	4	6	7	3	7
Precisão	10	10	10	10	10	10
Complexidade do Projeto	5	3	5	7	7	5
Peso	6	4	5	5	4	5
Tamanho	6	6	8	8	6	8
Média		5,8	7,1	7,6	6,1	7,4

Foi escolhida a solução C. Segue então as características gerais da máquina:

- Transmissão por correias sincronizadoras
- Acionamento por motores de passo
- Controle de três graus de liberdade no posicionamento

- Placa de desenvolvimento da linha Rabbit

Para acionamento dos motores de passo foi utilizado o CI L297 e a arquitetura, ilustrada na figura abaixo, como sugerida em seu datasheet.

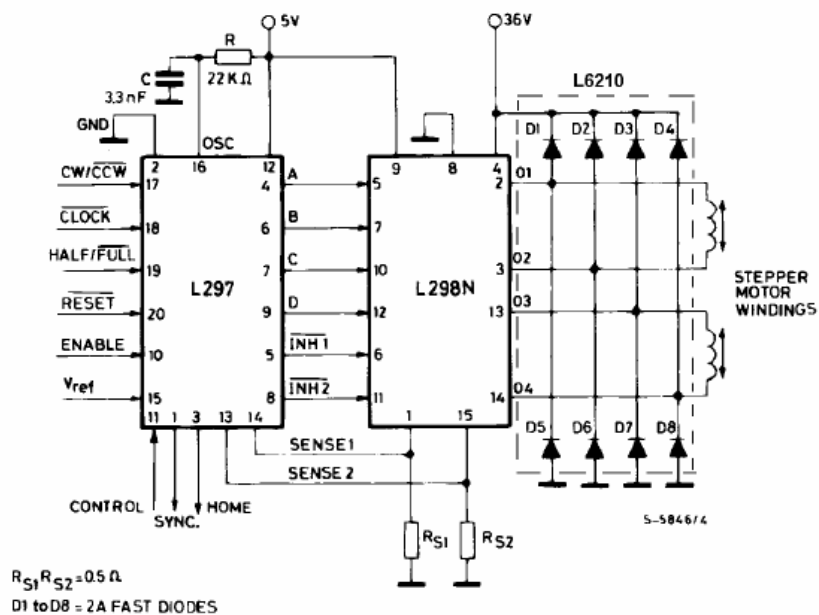


Figura 8 - Esquema lógico do driver

5 Design Preliminar

De acordo com as soluções previamente obtidas, foi feito um esboço preliminar do protótipo a ser construído:

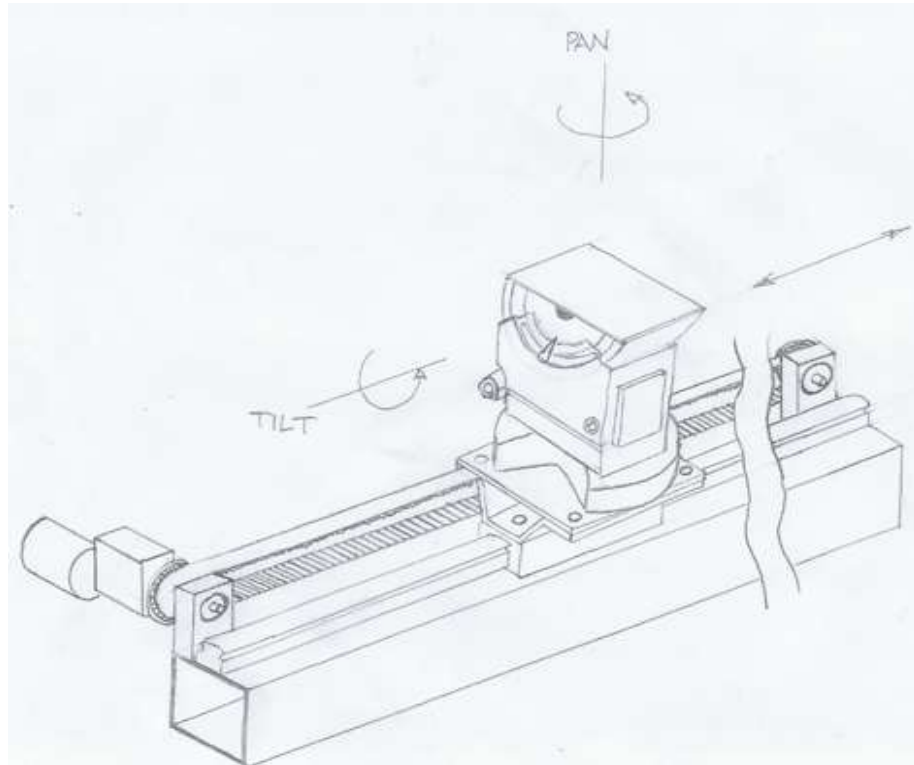


Figura 9 - Esboço da solução

6 Espiral de projeto

Ao longo do desenvolvimento do protótipo, várias etapas de re-projeto aconteceram. A cada nova iteração, alguns novos cálculos eram feitos, outras soluções eram continuamente discutidas até que uma solução “ótima” fosse obtida. Esse processo levou o protótipo final a um conjunto de soluções um pouco diferentes das iniciais.

A caixa de redução idealizada no projeto inicial (figura acima) foi substituída por uma redução com correias sincronizadoras em dois estágios: um de quatro e outro de cinco vezes, totalizando vinte vezes de redução. Essa decisão se baseou primordialmente nas folgas presentes em caixas de redução por engrenagens. Essas folgas inviabilizariam a obtenção da precisão desejada. Outras soluções disponíveis sem folga no mercado – como redutor harmônico – são de custo elevado.

Outra parte do protótipo que passou por diversas etapas de re-projeto foi a cabeça. Depois de decidido por não utilizar a cabeça da Coala Filmes, foi comprada uma cabeça de tripé de máquina fotográfica para adaptar as entradas dos dois motores. Entretanto, a necessidade de pelo menos 8 vezes de redução em cada um dos eixos de rotação nos levou a um projeto de caixas de redução pequenas para acoplar na cabeça adquirida. Esse projeto começou a se tornar absurdo e foi rejeitada a solução da cabeça adquirida.

Finalmente a solução de utilizar uma redução de um estágio para cada eixo foi obtida. Essa solução também passou por diversas etapas de re-projeto até que se chegasse à versão final de todas as peças.

7 Solução Final

A caixa de redução em dois estágios foi fixada na lateral de um tubo de alumínio de perfil de 4"x2" com espessura de 3,17mm de parede e 3m de comprimento. Sobre o tubo foi aparafusada uma guia linear de 2,8m com um patim sobre o qual se sustenta a cabeça. Fixada na lateral do tubo está a caixa de redução com dimensões 390x235x96mm. O motor que move o patim sobre a guia está fixado à parede da caixa de redução, e o eixo de saída da caixa aciona uma polia de sincronizadora de 20 dentes de perfil AT10, sobre a qual está instalada uma correia de aproximadamente 6m de comprimento. Todas as polias e correias que constituem a caixa de redução também têm esse perfil.

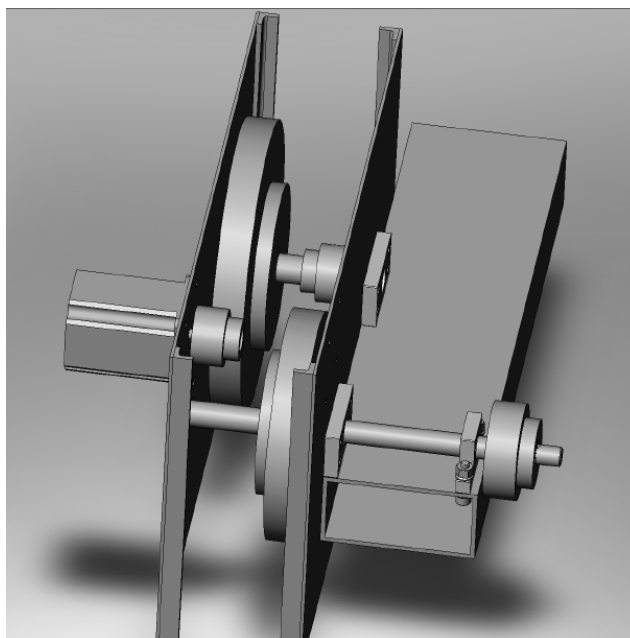


Figura 10 – Desenho em CAD caixa de redução

Segue abaixo uma foto mostrando a extremidade do tubo com a polia e a caixa de redução, assim como o motor responsável pelo movimento linear:

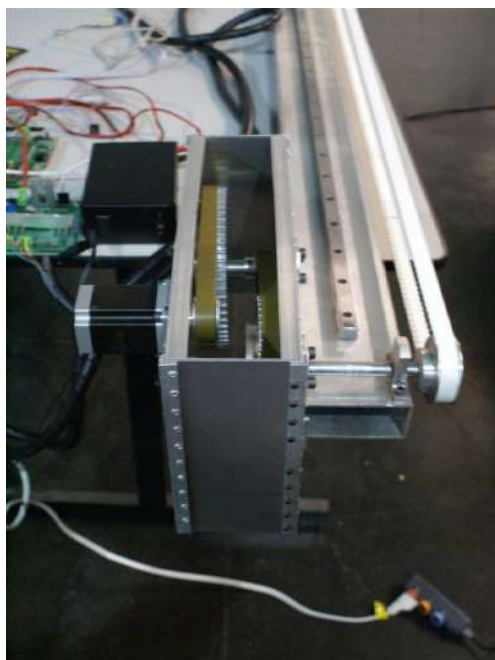


Figura 11 – Foto caixa de redução

A cabeça, depois de todas as modificações, consiste em um mancal cilíndrico maciço em alumínio dentro do qual estão alojados dois rolamentos radiais de esferas. Esse mancal está aparafusado ao patim. O eixo de aço, vertical, está assentado com um rebaixo sobre a pista interna do rolamento inferior e sobre ele, mais acima, está assentada uma polia de perfil 3M de 84 dentes. Entre o mancal e o patim, uma placa duas vezes dobrada foi usada para prensar a correia contra outra chapa, aparafusadas com parafusos M6.

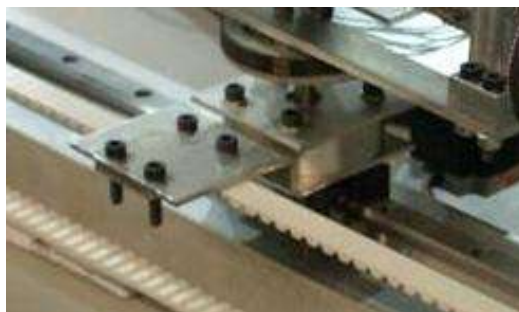


Figura 12 – Detalhe fixação correia

Sobre o mancal cilíndrico está uma chapa para fixação do motor ao conjunto e do eixo do motor ao eixo de uma polia 3M de 10 dentes existe uma luva com

um prisioneiro para transmitir o torque do motor ao sistema de rotação – pan – da cabeça (reduzida de 8,4 vezes). Segue uma imagem em detalhe:



Figura 13 – Detalhe cabeça

Sobre a polia maior, uma chapa de alumínio de 5mm consiste na estrutura de sustentação do segundo sistema rotativo – tilt. Sobre essa chapa, um mancal com dois rolamentos sustenta um eixo horizontal de aço em cuja extremidade uma pinça sustenta uma chapa de alumínio de espessura de 4mm para fixação da câmera. Na outra extremidade outra polia de 84 dentes transmite o movimento de outro motor com a mesma redução.

Seguem mais duas figuras da cabeça em detalhe:

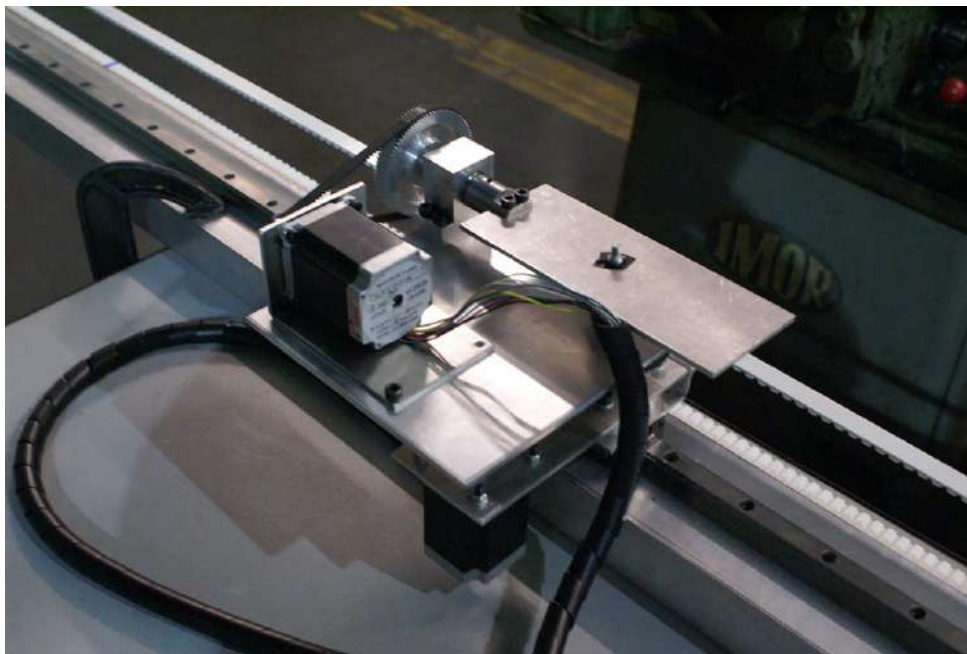


Figura 14 – Foto detalhe cabeça

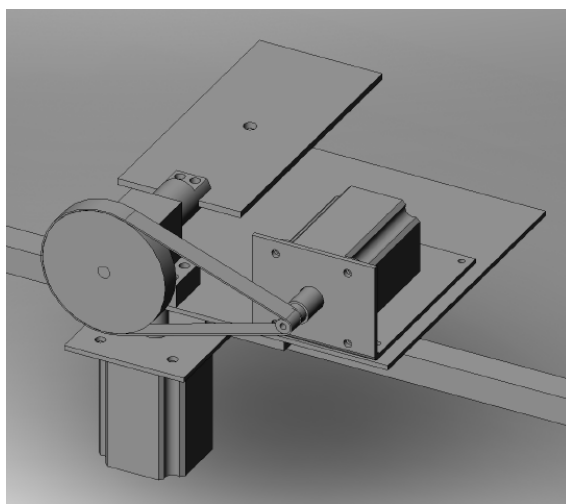


Figura 15 – Desenho em CAD cabeça

8 Modelos

8.1 Eixo principal da caixa de redução

Com o número de vínculos desse eixo, cujo material é o aço ABNT 1020, foi traçado um diagrama de momentos fletores através de um método de solução de problemas estaticamente indeterminados (equação de Fontviolant, com grau de hiperstaticidade igual a um). Foram desprezados quaisquer esforços na direção axial, dadas as diferenças de magnitude com os esforços na direção de pretensão. Foi desprezado também o efeito gravitacional pelo mesmo motivo.

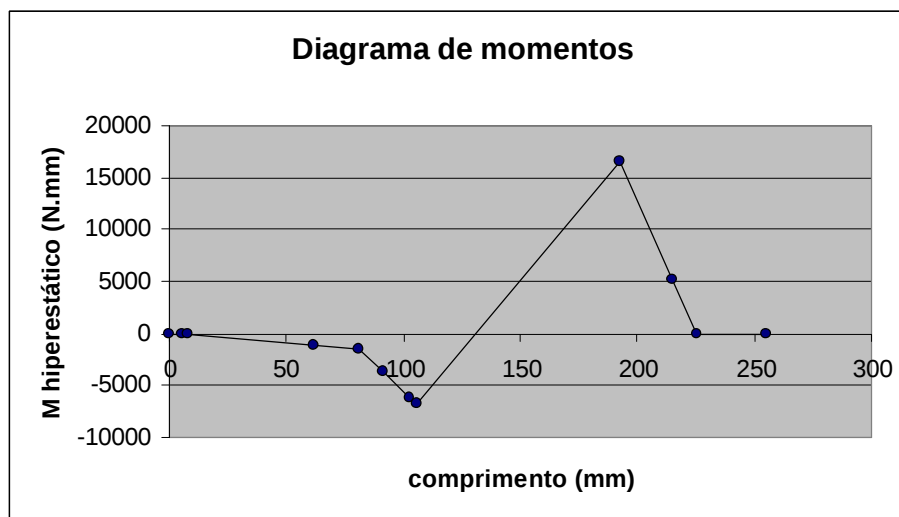


Figura 16 – Gráfico momento hiperestático

Depois de calculadas todas as tensões normais e de cisalhamento nos pontos do eixo, com os concentradores de tensão aplicados, com o cálculo da tensão de von Mises e com todos os fatores pertinentes (confiabilidade, acabamento superficial e tamanho) foi dimensionado o eixo para vida infinita em fadiga de acordo com as dimensões no desenho:

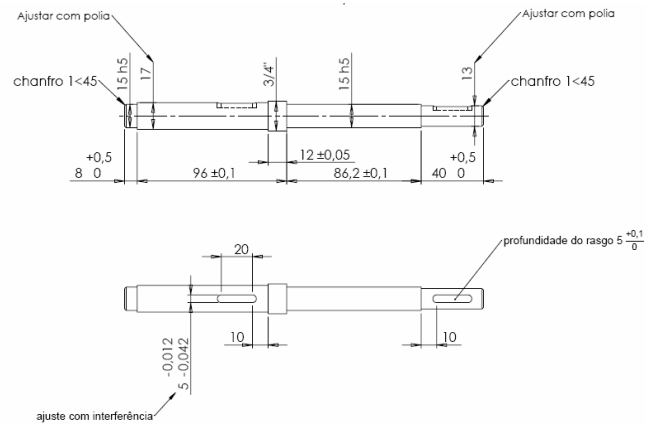


Figura 17 – Eixo principal

Cabe ressaltar que esse processo foi iterativo. O fator de segurança na seção mais crítica ficou igual a 2,09.

Seguem abaixo os valores calculados em forma de tabela para o problema hiperestático e fadiga de acordo com o critério de Goodman:

trecho/ponto	compr.	diam.	EI	I		Mo	Carga unit	m1	integral 11	integral 01	M hiperest
A	5,6	15	514405117,4	2485,05							
1				RA	208,14	0	0,465	0			0
B	2,5	15	514405117,4	2485,05					2,188E-09	-9,798E-07	
2						520,35		-1,162			-47,69
C	53,4	20	1625774198	7853,98					7,740E-06	-0,003465	
3						11635,10		-25,989			-1066,46
D	19,5	20	1625774198	7853,98					1,126E-05	-0,005039	
4						15693,86		-35,055			-1438,48
E	0	20	1625774198	7853,98					0	0	
5				Pret. 48	200	15693,86		-35,055			-1438,48
F	10,5	20	1625774198	7853,98					9,093E-06	-0,003811	
6						15779,35		-39,936			-3738,79
G	11,5	22	2380296004	11499,0					8,78319E-06	-0,003258	
7						15872,97		-45,283			-6258,19
H	2,5	15	514405117,4	2485,05					1,022E-05	-0,003540	
8				RB	0	15893,33	1	-46,445			-6805,88
I	86,8	15	514405117,4	2485,05					0,0001213	-0,06320	
9				RC	508,14	16600	0,535	0			16600
J	22,7	15	514405117,4	2485,05							
10						5250		0			5250
K	10,5	13	290210855,5	1401,98							
11				Pret. 20	500	0		0			0
L	29,5	13	290210855,5	1401,98							
								F11	0,00016843		
									d10	-0,08232	
									Fontviolant	488,73	
E	• ut	• y	Se'	torque eixo	q	qcisalh				RB!	
207000	380	210	190	38	0,65	0,86					
		RA EIF		208,14		RA unit	0,465				
		RC EIF		508,14		RC unit	0,535				
			dCA	186,7							

Tabela 1 – Dimensionamento hiperestático

trecho/ponto	• vm alt.	• cont.	• vm med.	ksup	Ktam	kconf	kt	Kf	• a	• m	Se	f.s.
A					0,6579							
1	0	0	0	0,934		0,897			0	0	104,77	#DIV/0!
B					0,6579							
2	-0,144	0	0	0,934		0,897	1,85	1,55	0,223	0	101,59	454,60
C					0,6379							
3	-1,358	0	0	0,934		0,897	2,14	1,74	2,364	0	101,59	42,97
D					0,6379							
4	-1,832	0	0	0,934		0,897	2,14	1,74	3,189	0	101,59	31,86
E					0,6379							
5	-1,832	0,0242	0,0419	0,934		0,897			1,832	0,0419	101,59	55,13
F					0,6379							
6	-4,760	0,0242	0,0419	0,934		0,897	1,9	1,59	7,545	0,0664	100,56	13,30
G					0,6315							
7	18,888	0,0573	0,0993	0,934		0,897	2,1	1,72	32,392	0,1703	100,56	3,10
H					0,6579							
8	20,540	0,0573	0,0993	0,934		0,897			20,540	0,0993	104,77	5,09
I					0,6579							
9	50,100	0,0573	0,0993	0,934		0,897			50,100	0,0993	104,77	2,09
J					0,6579							
10	24,340	0,0881	0,1526	0,934		0,897	1,7	1,46	35,415	0,2594	104,77	2,95
K					0,6680							
11	0	0,0881	0,1526	0,934		0,897			0	0,1526	106,38	2490,57
L					0,6680							

Tabela 2 – Dimensionamento Fadiga

As dimensões da tabela estão todas em mm, N, N.mm e MPa (N/mm²). Nota-se que, no ponto 1 (rolamento da esquerda), como a tensão de von Mises é nula, o fator de segurança é infinito.

8.2 Dimensionamento dos motores

Para dimensionamento dos motores, foi calculado aproximadamente o momento de inércia total dos três sistemas. Para cada um deles determinou-se, com um dado experimental, o momento de inércia mínimo de cada motor de passo como sendo no máximo 5 vezes menor que o momento de inércia do seu respectivo sistema visto pelo motor (passando pelas reduções). Isso garante que o motor não perderá passo para o controle em malha aberta. Em caso de perda de passo, o sistema eletrônico perde a referência da posição. Com a frequência de pulsos determinada nos cálculos, determina-se o torque necessário para aceleração em *pull-in* no motor.

Seguem abaixo os cálculos para o motor do movimento linear, com as polias e as suas inércias, em dois estágios de redução:

m (massa cabeça) Kg	mp (polia) Kg	r (raio da polia) m	Jm (massa) Kg*m ²	Jp (polias) Kg*m ²	n (redução)
7,000	0,15	0,03183	0,007092042	0,000151972	20
v (velocidade linear) m/s	F (frequência) pps	passos por revolução	wm (motor) rad/s	wp (polia) rad/s	Jsist (sem rotor) Kg*m ²
0,019999379	800	400	12,56637061	0,628318531	0,000103313
tempo (cruzamento) s	tempo de passo	aceleração lin.	aceleração ang.	aceler. ang. Motor	Jmin rot g*cm ²
150,0046589	0,00125	15,99950307	502,6548246	10053,09649	206,6264931
2,500077648					Jrotor g*cm ²
					480
(minutos)				torque total motor N.m	Jsist.+J.rotor
				1,521166668	0,000151313
	1° estágio	2° estágio			
diâmetro 1	38,2	38,2			
no.dentes 1	12	12			
diâmetro 2	190,98	152,78			
no.dentes 2	60	48			
Redução	5	4			
	M1 Kg	0,04			
	M2	0,41			
	M3	0,04			
	M4	0,39			
	R1	0,0191			
	R2	0,09549			
	R3	0,0191			
	R4	0,07639			
	J1	7,2962E-06			
	J2	0,00186926			
	J3	7,2962E-06			
	J4	0,001137909			
	W interm. rad/s	2,513274123			

Tabela 3 – Dimensionamento motor linear

Os cálculos dos outros motores são análogos. O torque estático dos três motores selecionados é de 1,9N.m e um momento de inércia do rotor de 480g.cm².

8.3 Cálculo das Correias e Sistema de Transmissão

As correias foram selecionadas dentre as opções disponíveis para ter a maior rigidez possível. O perfil AT10 com cordonéis de aço foi selecionada para o posicionamento linear. O cálculo da largura da correia foi executado segundo

dados de um fabricante de todas as constantes necessárias para pré-tensão e frequência natural. Esse cálculo de pré-tensão foi utilizado com um fator de segurança no dimensionamento a fadiga exposto anteriormente. A frequência natural calculada ficou acima do esperado, não oferecendo riscos de ressonância.

A largura obtida para as correias AT10 foi de 16mm. Segue abaixo a planilha com o dimensionamento da correia do movimento linear (crítica, pois está sujeita à maior pré-tensão):

passo AT-10 (mm) t	10		
comprimento de trabalho Sv (mm)	2500		
velocidade v (cte) i=1 (m/s)	0,022685185		
aceleração (m/s^2)	22,68518519	estimativa da massa c corr	
massa do slide (Kg)	6	4,490408767	
Fr força de atrito (N)	0,294		
comprimento patim (mm)	77,4		Fper
d0 (mm)	60		2500
Fa aceleração (N)	136,1111111		b correia mm
Fu força (N)	136,4051111		16
c2	1,1		cspec
c3 i=1	0		0,64
Fu max	150,0456222		lk clamping lenght
c1	4		50
F'u req	37,51140556		
n RPM (baseado em d0 e v)	7,221450617		
F'u gráfico	185		
z número de dentes	18,84955592	=>	20
densidade material (Kg/dm^3)	2,7		n RPM =
d0 (mm) novo bas n° dentes selec	63,66197724	=>	6,806056862
mz massa polia (Kg)	0,222358509	dk mm (outside diameter)	d mm
		62,41197724	20
mzred (Kg)	0,122596146		b polia mm
l comprimento da correia (mm)	5732,123954	comprimento sob tensão	30
m'r correia (Kg/m) calculation sheet	0,103	5632,123954	
mr massa correia (Kg)	0,590408767		
Fa max incluindo mr e mzred	155,0668759		
Fu	155,3608759		
Fu max (Fu*c2)	170,8969635		
F'u req (Fumax/c1)	42,72424087		
Sdente (F'u/F'ureq) >1	4,330094491		
Fv pré-tensão (1,5*Fumax)	256,3454452		
Fb seleção largura correia	427,2424087		
Stm (Fper/Fb) >1	5,851479042		
delta e	1,147971771		
	mínimo	Maximo	
l1	2645,530989	145,5309886	
l2	2986,592966	5486,592966	

C (rigidez) N/mm	456,2084104	4514,336791	
delta s (Fr/c) mm	0,000644442	6,51258E-05	
fe frequência natural sist Hz	43,8860153	sem perigo de ressonância	
f0 frequência excitação (n/60)	0,12035751		
RESULTADOS			
correia sincronizadora de largura =	16	AT	10
nº de dentes da polia =	20	de comprimento =	5732,123954
deslocamento para pré-tensão =	1,147971771		
rotação RPM =	6,806056862		
delta S máximo mm =	0,000644442		

Tabela 4 – Dimensionamento correia

As correias da cabeça estão sujeitas a baixa tensão, tendo sido escolhido o perfil Omega 3M, de alta rigidez, de largura 9mm.

9 Programação e Acionamento

9.1 Arquitetura

Das placas utilizadas, o microcontrolador (Jackrabbitt) deve ser alimentado com 5V e os drivers com 12V. Foi utilizada uma fonte de 12V e um 7805 faz a conversão necessária para alimentar o controlador. Os terras são curto-circuitados e 9 fios de sinal saem do microcontrolador, sendo 3 para cada driver: um sinal de clock, um de sentido e um de habilitação. Os motores de passo foram ligados com as bobinas em série, de maneira a fornecer mais torque e menos velocidade. A amperagem dessa ligação para o motor usado é de 2,1 A por fase, corrente essa suportada pelo driver.

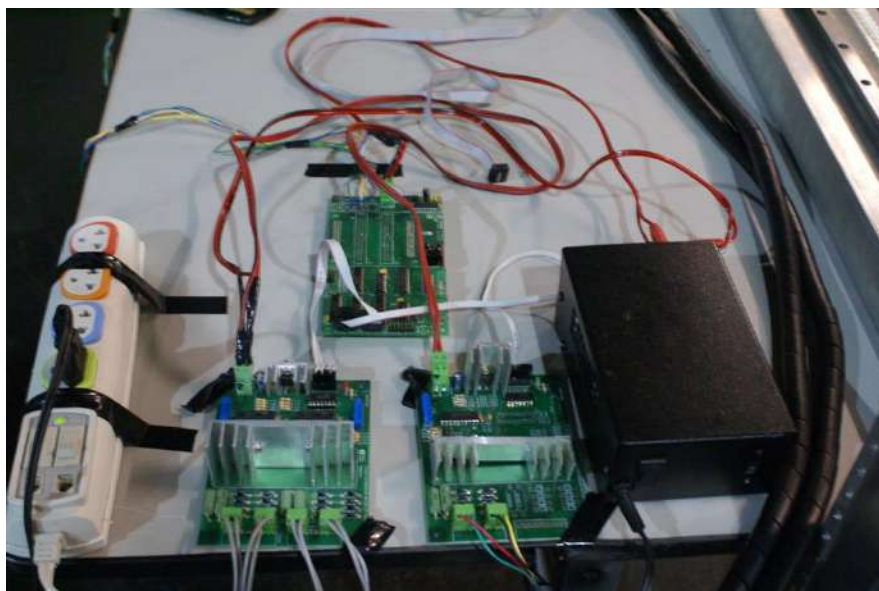


Figura 18 – Sub-sistema eletrônico

O controlador foi ligado pela porta serial do computador para programação em memória RAM, e depois de concluído, o programa foi gravado na memória Flash, tornando o sistema independente.

Segue abaixo um esquema da arquitetura do sistema:

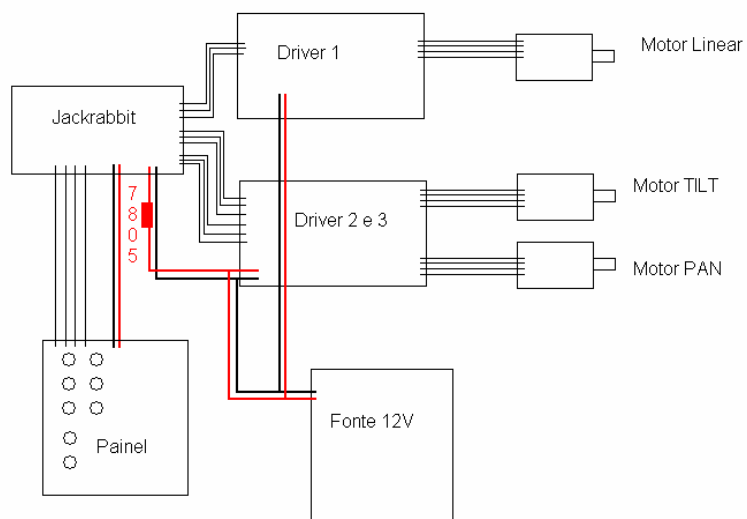


Figura 19 – Esquema elétrico

Para o painel de controle, foi utilizado um codificador de 10 para 4 bits, que faz uma combinação com as entradas dos botões e converte-as em um código binário de 4 bits. Essa escolha permitiu com apenas quatro entradas de botão utilizar um total de oito botões. O painel também tem seu terra curto-circuitado com o resto do sistema eletrônico e uma alimentação de 5V.

9.2 Lógica

O programa principal está preso em um loop que verifica continuamente os botões do painel de controle. Caso um botão de movimentação seja apertado, o motor é acionado por uma função *movemotor* que recebe os parâmetros do sentido e do motor que deve ser acionado, provocando o respectivo deslocamento.

Um botão armazena em matriz o número de passos entre posições consecutivas armazenadas e outro botão muda de modo. Quando se finaliza a etapa de gravação de pontos, deve-se pressionar esse botão para mudar para um modo de navegação, onde dois botões permitem que se percorra entre os pontos já armazenados de uma sequência.

Um mecanismo de espera dentro de outra espera elimina o efeito de *bouncing* que pode afetar o devido entendimento dos sinais de entrada. A vibração de um botão ao ser apertado ou ser solto pode enviar alternadamente zeros e uns a uma alta frequência por um período curto de tempo, mandando vários comandos ao invés de um só, como desejado. A correta calibração faz com que apenas um sinal seja enviado.

9.3 Calibração

Durante a montagem, foram necessários vários ajustes, especialmente os de pré-tensão e de alinhamento dos eixos. Algumas peças precisaram ser re-fabricadas durante o processo para obter a rigidez desejada e eliminar folgas resultantes da fabricação.

Depois de montado e ajustado o sistema mecânico, uma etapa de calibração foi necessária para ajustes de velocidades dos motores. As velocidades deveriam ser suficientemente baixas para um ajuste fino de posicionamento. As

esperas correspondentes no software entre um pulso e outro tiveram que ser ajustadas.

Outro fator foi o de ajustar a velocidade de maneira a não entrar em ressonância com o sistema. Para algumas frequências de pulso do motor, a caixa vibrava consideravelmente.

10 Discussão

O resultado final foi excelente e cumpriu com todas as expectativas. A resolução do sistema é suficiente para a aplicação. O projeto mecânico é bastante robusto. O sistema eletrônico apesar de simples oferece todas as funcionalidades necessárias requeridas.

O trabalho tendo sido relacionado a comunicação e artes foi bastante estimulante. Foi necessário um intenso estudo de fotografia e Stop-Motion em paralelo com o projeto da máquina para a real compreensão dos requisitos operacionais. Diversos encontros com os animadores aos poucos nos levaram à verdadeira compreensão do problema a ser solucionado.

A realização do *motion control* é bastante interessante e deve ser usada em conjunto com outras técnicas para ajuste do foco, abertura de diafragma e velocidade do obturador. Estava dentro das idéias iniciais o controle desses parâmetros de fotografia, entretanto alguns softwares estão disponíveis no mercado que já controlam e armazenam esses parâmetros e são, inclusive, utilizados pela Coala Filmes.

Dessa forma, o trabalho consistiu exclusivamente na obtenção de um sistema de alta repetibilidade, o que já requer diversos esforços simultâneos para atingir esse objetivo. O conjunto todo deve ser robusto, folgas devem ser eliminadas e o atrito estático compensado através de pré-tensões.

A criatividade no projeto foi um requisito essencial. Alguns problemas pareciam bastante difíceis de ser solucionados, tendo sido o projeto mecânico o maior desafio.

11 Conclusão

A maneira como o sistema foi concebido foi bastante adequada para a aplicação de *motion control*. O fato de ter sido usado motor de passo simplificou consideravelmente o problema sem perdas na eficiência em cumprir com o requisito de posicionamento, dada a precisão intrínseca de posicionamento de motores de passo. Para aumentar a resolução e diminuir o

torque a ser fornecido pelo motor (e conseqüentemente o custo), foram aplicadas reduções nos graus de liberdade.

A resolução atingida pela máquina (0,025 mm) está quatro vezes mais refinada que a resolução levantada nos requisitos, e a resolução angular (0,107°) 20% melhor que o esperado. As dimensões físicas, assim como o peso ficaram dentro das especificações e o custo foi muito próximo ao levantado como estimativa no início. O único parâmetro que ficou abaixo do esperado foi o da velocidade, que tinha sido levantada como mínima de 50mm/s e atingiu apenas 20mm/s. Entretanto isso não é um fator crítico, dado o caráter de posicionamento da máquina.

Para o posterior aluguel da máquina, algumas alterações ainda devem ser feitas para transformar o protótipo em produto, e uma etapa de testes deve se iniciar em conjunto com a Coala Filmes.

A interdisciplinaridade desse trabalho foi, além de um motivador excelente, um estímulo acadêmico de filiação com outras unidades dentro da USP (no caso, a ECA) bastante interessante. A aplicação de tecnologia – especialmente na área de automação e sistemas – crescente nas últimas décadas abre cada vez mais uma série de novos caminhos de exploração interdisciplinar. Novas áreas vêm sendo criadas a partir da interface entre áreas do conhecimento. A engenharia se mostra uma catalisadora desses processos unificadores que têm conseqüências sociais que ainda desconhecemos.

12 Referências

- [1] O ESTRANHO mundo de Jack. Direção: Henry Selick. Distribuição: Walt Disney. Estados Unidos: 1993. 1 DVD (76 min), son., color.
- [2] A FUGA das galinhas. Direção: Nick Park, Peter Lord. Distribuição: Paramount. Estados Unidos e Inglaterra: 2000. 1 DVD (84min), son., color.
- [3] A NOIVA Cadáver. Direção: Tim Burton, Mike Johnson. Distribuição: Warner Home Vídeo. Estados Unidos e Inglaterra: 2005. 1 DVD (75min.), son., color.
- [4] WALLACE e Gromit – A Batalha dos Vegetais. Direção: Nick Park, Steve Box. Distribuição: Paramount: 2005. 1 DVD (84min.), son., color.

13 Bibliografia

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M., Fundamentals of Machine Component Design, [S.I.]: John Wiley & Sons, 1991

NAKAZAWA, H., Principles of Precision Engineering, Oxford: Oxford University Press, 1994

SLOCUM, A. H., Precision Machine Design, [S.I.]: SME (Society of Manufacturing Engineering), 1992

SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R., BUDYNAS, R. G., Projeto de Engenharia Mecânica, [S.I.]: Bookman, 2005

Site da produtora Coala Filmes. Disponível em: www.coalafilmes.com.br. Acesso em: 15/06/2007

Site de links relacionados a animação Stop-Motion. Disponível em: <http://www.stopmotionanimation.com/>. Acesso em: 20/08/07

Site das Correias Schneider. Disponível em: www.correias.com.br. Acesso em: 23/05/2007

Site “Adorocinema”. Disponível em: <http://adorocinema.cidadeinternet.com.br/filmes/fuga-das-galinhas/fuga-das-galinhas.asp>. Acesso em: 20/06/2007

Apêndice 1

Segue em anexo alguns dos desenhos, esquemas e dados importantes do projeto:

Código-fonte em Linguagem C – Dynamic C for Rabbit Processor

```
#define AINBUFSIZE 255    // 2^15-1=32767 tamanho maximo
#define AOUTBUFSIZE 255
//#define tamanhovetor 100

long int c1, c2, c3, cabs1, cabs2, cabs3, a[3][100];
int flag, j;

void temporizador()
{
    int i;
    for (i=0;i<500;i++);
}

void zeravetor()
{
    int i, x;
    for (i=0;i<3;i++)
    {
        for (x=0;x<100;x++) a[i][x]=0 ;
    }
}

void movemotor(int sent, int motor, long int num_passos)
{
    int i, k, porta_sent, porta_clock, flipflop;

    flipflop=0x80;

    BitWrPortI(PADR,&PADRShadow,1,5);    //habilita motor 2

    if(motor==1)
    {
        porta_sent=0;
        porta_clock=1;
    }

    if(motor==2)
    {
        porta_sent=3;
        porta_clock=4;
    }

    if(motor==3)
    {
        porta_sent=5;
        porta_clock=6;
        flipflop=0x88;
    }
}
```

```

    BitWrPortI(PADR,&PADRShadow,sent,porta_sent);          //sentido
    WrPortI(PDDR, &PDDRShadow, flipflop);                  //flip-flop U8
    WrPortI(PDDR, &PDDRShadow, 0x00);

    for(k=0;k<num_passos;k++)
    {
        BitWrPortI(PADR,&PADRShadow,1,porta_clock);        //clock em 1 motor
        WrPortI(PDDR, &PDDRShadow, flipflop);              //flip-flop U8
        WrPortI(PDDR, &PDDRShadow, 0x00);

        if(motor==1)
            for(i=0;i<80;i++); //15000 e 80

        if(motor==2)
            for(i=0;i<15000;i++); //15000 e 80

        if(motor==3)
            for(i=0;i<80;i++); //15000 e 80

        BitWrPortI(PADR,&PADRShadow,0,porta_clock);        //clock em 0 motor
        WrPortI(PDDR, &PDDRShadow, flipflop);              //flip-flop U8
        WrPortI(PDDR, &PDDRShadow, 0x00);

        if(motor==1)
            for(i=0;i<80;i++);

        if(motor==2)
            for(i=0;i<15000;i++); //15000 e 80

        if(motor==3)
            for(i=0;i<80;i++); //15000 e 80
    }
}

void habilita_motor(int sim, int motor)
{
    int porta_hab, flipflop;
    flipflop=0x80;
    if(motor==1)
        porta_hab=2;

    if(motor==2)
        porta_hab=5;

    if(motor==3)
    {
        porta_hab=7;
        flipflop=0x88;
    }
    BitWrPortI(PADR,&PADRShadow,sim,porta_hab); //habilita/desabilita
motor y
    WrPortI(PDDR, &PDDRShadow, flipflop);          //flip-flop U8
    WrPortI(PDDR, &PDDRShadow, 0x00);
}

void bouncing()
{
    int i;
    for(i=0;i<50;i++);
}

```

```

}

void configuracoes()
{
// setup port D como saída
  WrPortI(PDDDR, &PDDDRShadow, (PDDDRShadow | 0xff));
//setup port A como saída
  WrPortI(SPCR, &SPCRShadow, 0x84);
}

void movimento(int a, int b, int c, int d, int motor, int sent)
{
  if (BitRdPortI(PBDR,2)==a && BitRdPortI(PBDR,3)==b &&
  BitRdPortI(PBDR,4)==c && BitRdPortI(PBDR,5)==d)
  {
// espera para eliminar bouncing ao apertar botão
    bouncing();
    while (BitRdPortI(PBDR,2)==a && BitRdPortI(PBDR,3)==b &&
    BitRdPortI(PBDR,4)==c && BitRdPortI(PBDR,5)==d)
    {
      movemotor(sent,motor,1);

      if(motor==1)
      {
        // se o sentido for 1 incrementa contador, se zero decrementa
        c1=c1+sent*2-1;
        cabs1=cabs1+sent*2-1;
      }

      if(motor==2)
      {
        c2=c2+sent*2-1;
        cabs2=cabs2+sent*2-1;
      }

      if(motor==3)
      {
        c3=c3+sent*2-1;
        cabs3=cabs3+sent*2-1;
      }
    }
    bouncing();
  }
}

void posicao_origem(long int cabs, int motor)
{
  int i, sent;

  if(cabs<0)
  {
    sent=1;
    cabs=cabs*(-1);
  }
  else
    sent=0;
// cabs coordenada absoluta da posicao em relacao ao primeiro frame
  movemotor(sent,motor,cabs);

  if(motor==1)
    cabs1=0;

```

```

    if(motor==2)
        cabs2=0;

    if(motor==3)
        cabs3=0;
}

void trocar_posicao()
{
    int i, sent;
    long int aux;
    for(i=0;i<3;i++)
    {
        if(a[i][j]>0)
        {
            sent=1;
            aux=a[i][j];
        }

        else
        {
            sent=0;
            aux=a[i][j]*(-1);
        }

        if(flag==1)
        {
            sent=(sent*(-1))+1;
        }
        movemotor(sent,i+1,aux);
        temporizador();
    }
}

void liberar_botao(int a, int b, int c)
{
    //soltar com confirmação esperar botão ser liberado, controle de
    bouncing implementado
    while(BitRdPortI(PBDR,2)==a && BitRdPortI(PBDR,3)==b &&
    BitRdPortI(PBDR,4)==c)
    {
        while(BitRdPortI(PBDR,2)==a && BitRdPortI(PBDR,3)==b &&
    BitRdPortI(PBDR,4)==c);
        bouncing();
    }
}

main()
{
    //declaração das variáveis
    int i, sent, jmax, flag2;
    c1=0; c2=0; c3=0; cabs1=0; cabs2=0; cabs3=0; j=0; sent=0; i=0; j=0;
    jmax=0; flag=0; flag2=0;

    //inicialização
    for(i=0;i<3;i++)
    {
        for(j=0;j<100;j++)

```

```

        a[i][j]=0;
    }
    i=0;
    j=0;

    configuracoes();                                     //configurações

    habilita_motor(1,1);
    habilita_motor(1,2);
    habilita_motor(1,3);

    while(1)
    {

        //movimento motor 1 direita caso tecla esteja pressionada
        movimento(0,1,1,0,1,1);
        //movimento motor 1 esquerda caso tecla esteja pressionada
        movimento(1,1,1,1,1,0);
        //movimento motor 2 direita caso tecla esteja pressionada
        movimento(0,0,0,0,2,1);
        //movimento motor 2 esquerda caso tecla esteja pressionada
        movimento(1,0,0,0,2,0);
        //movimento motor 3 direita caso tecla esteja pressionada
        movimento(1,1,0,0,3,1);
        //movimento motor 3 esquerda caso tecla esteja pressionada
        movimento(0,1,0,0,3,0);

        //se botão gravar posição for pressionado, a posição relativa é
        gravada
        if(BitRdPortI(PBDR,2)==0 && BitRdPortI(PBDR,3)==0 &&
        BitRdPortI(PBDR,4)==1 && (flag2==0 || (flag2==1 && (c1!=0 || c2!=0 ||
        c3!=0))))
        {
            bouncing();
            if(BitRdPortI(PBDR,2)==0 && BitRdPortI(PBDR,3)==0 &&
            BitRdPortI(PBDR,4)==1)
            {
                //primeira vez que uma posição é gravada ela é definida como
                origem
                if(flag2==0)
                {
                    c1=0;
                    c2=0;
                    c3=0;
                    cabs1=0;
                    cabs2=0;
                    cabs3=0;
                }
                a[0][j]=c1;    //contadores
                a[1][j]=c2;
                a[2][j]=c3;
                j++;
                c1=0;
                c2=0;
                c3=0;
                flag2=1;
            }

            liberar_botao(0,0,1);

```

```

    }

    if(BitRdPortI(PBDR,2)==1 && BitRdPortI(PBDR,3)==0 &&
    BitRdPortI(PBDR,4)==1)//(muda de modo)
    {
        bouncing();
        if(BitRdPortI(PBDR,2)==1 && BitRdPortI(PBDR,3)==0 &&
        BitRdPortI(PBDR,4)==1)
        {
            posicao_origem(cabs1, 1);
            posicao_origem(cabs2, 2);
            posicao_origem(cabs3, 3);
            liberar_botao(1,0,1);
            jmax=j-1;
            j=1;

            //looping confirmação
            while(BitRdPortI(PBDR,2)!=1 || BitRdPortI(PBDR,3)!=0 ||
            BitRdPortI(PBDR,4)!=1)
            {
                // enquanto esse botão não é pressionado novamente a
                máquina permanece no modo navegar pelas posições gravadas
                while(BitRdPortI(PBDR,2)!=1 || BitRdPortI(PBDR,3)!=0 ||
                BitRdPortI(PBDR,4)!=1)
                {
                    //navega direita
                    if(BitRdPortI(PBDR,2)==1 && BitRdPortI(PBDR,3)==1 &&
                    BitRdPortI(PBDR,4)==0 && j<=jmax)
                    {
                        bouncing();
                        if(BitRdPortI(PBDR,2)==1 && BitRdPortI(PBDR,3)==1 &&
                        BitRdPortI(PBDR,4)==0)
                        {
                            flag=0;
                            trocar_posicao();
                            j++;
                            liberar_botao(1,1,0);
                        }
                    }
                    //navega esquerda
                    if(BitRdPortI(PBDR,2)==0 && BitRdPortI(PBDR,3)==1 &&
                    BitRdPortI(PBDR,4)==0 && j>0)
                    {
                        bouncing();
                        if(BitRdPortI(PBDR,2)==0 && BitRdPortI(PBDR,3)==1 &&
                        BitRdPortI(PBDR,4)==0)
                        {
                            j--;
                            flag=1;
                            trocar_posicao();
                            flag=0;
                            liberar_botao(0,1,0);
                        }
                    }
                }
                bouncing();
            }
            liberar_botao(1,0,1);

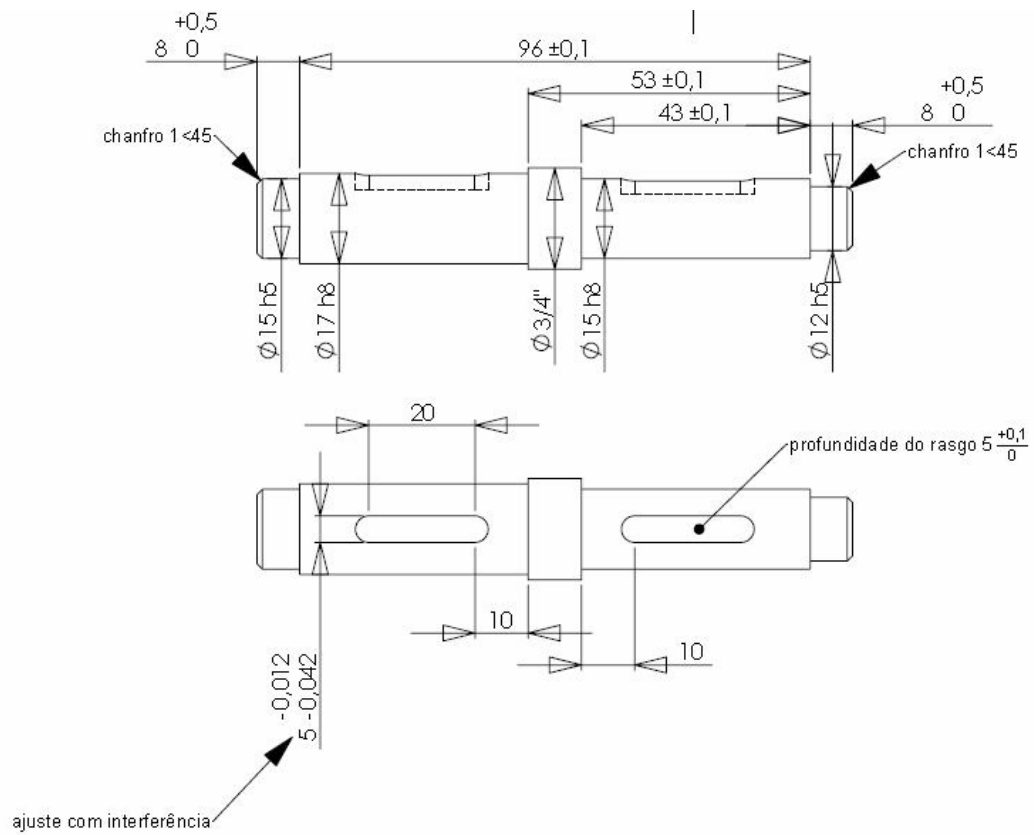
            j=0;

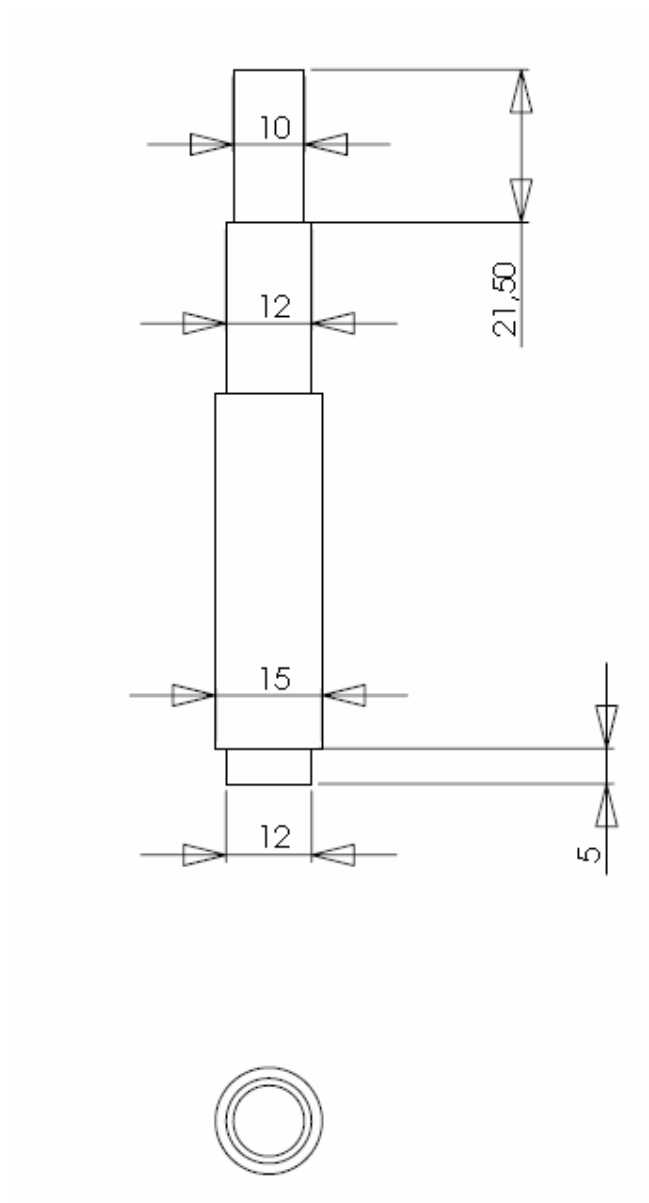
```

40

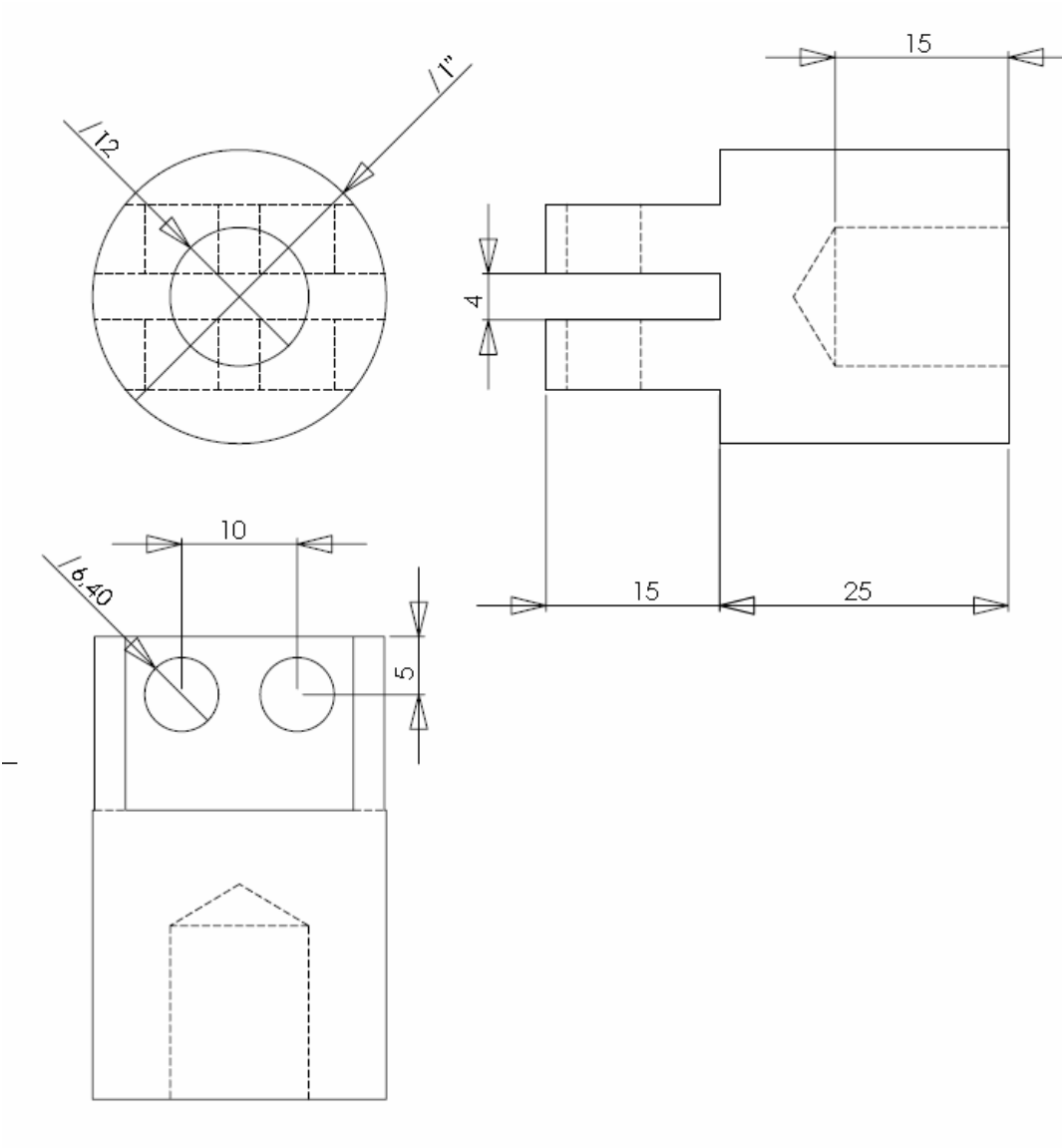
```
        zeravetor();  
        flag2=0;  
    }  
}  
}
```

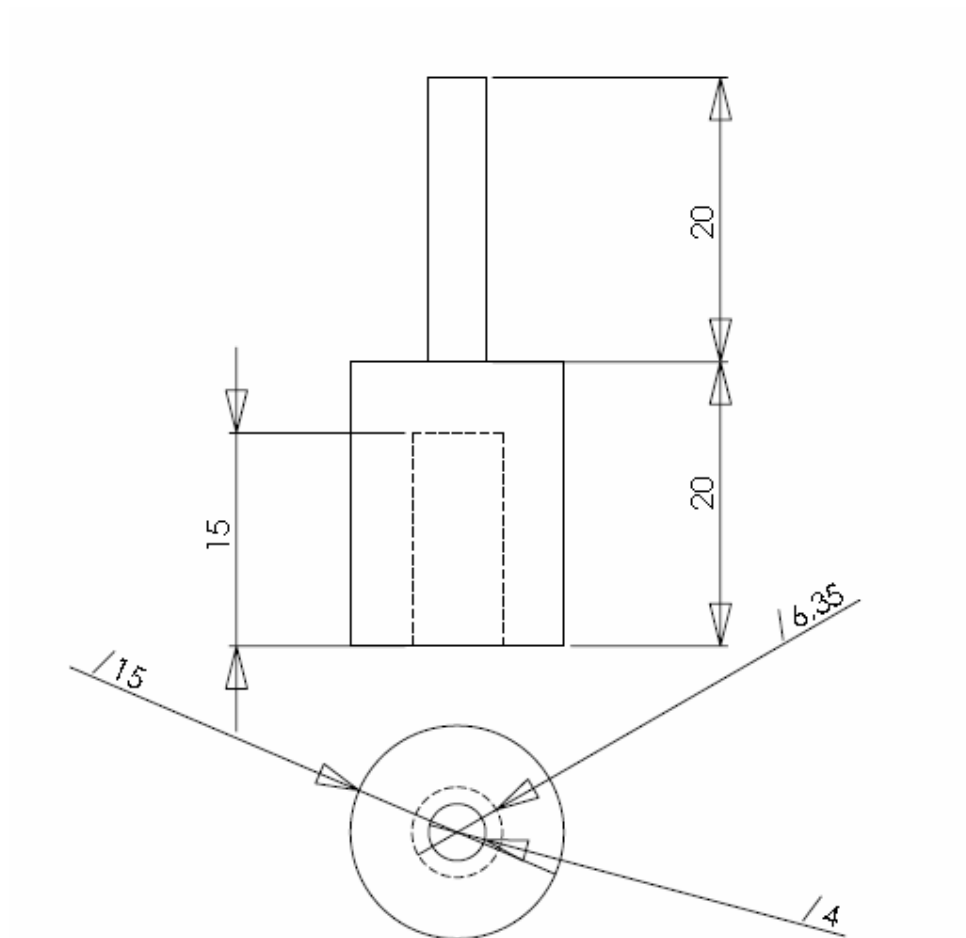
Eixo Intermediário Caixa de Redução

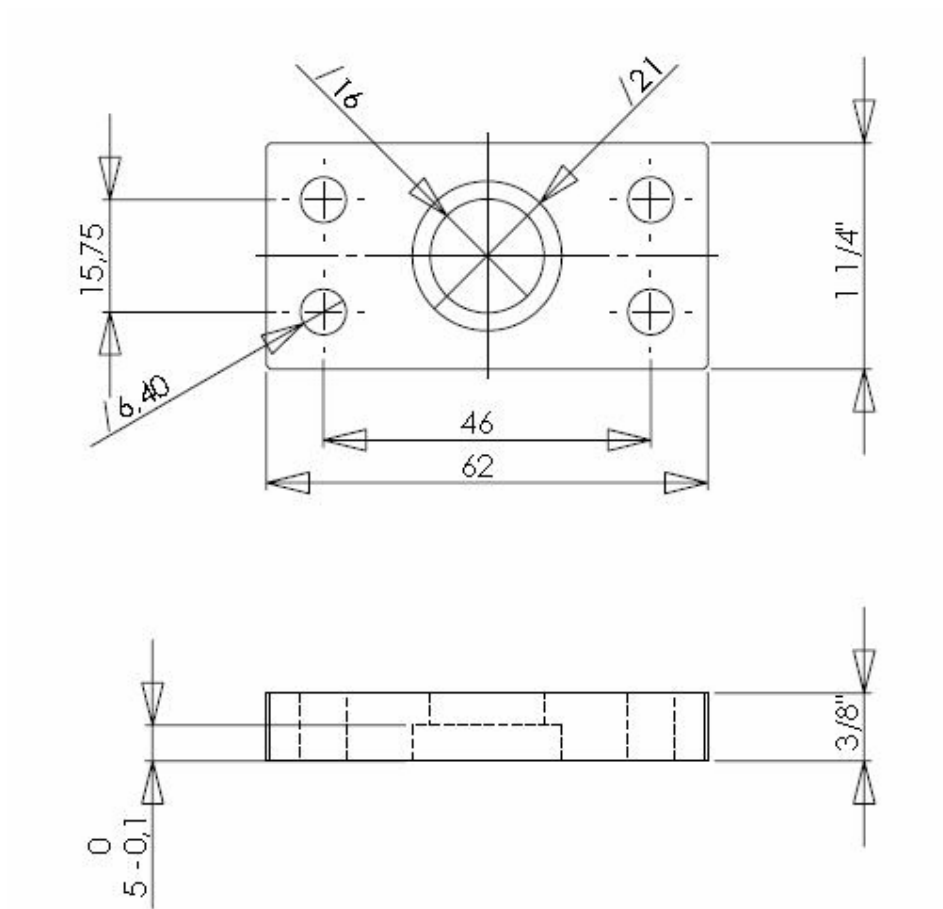


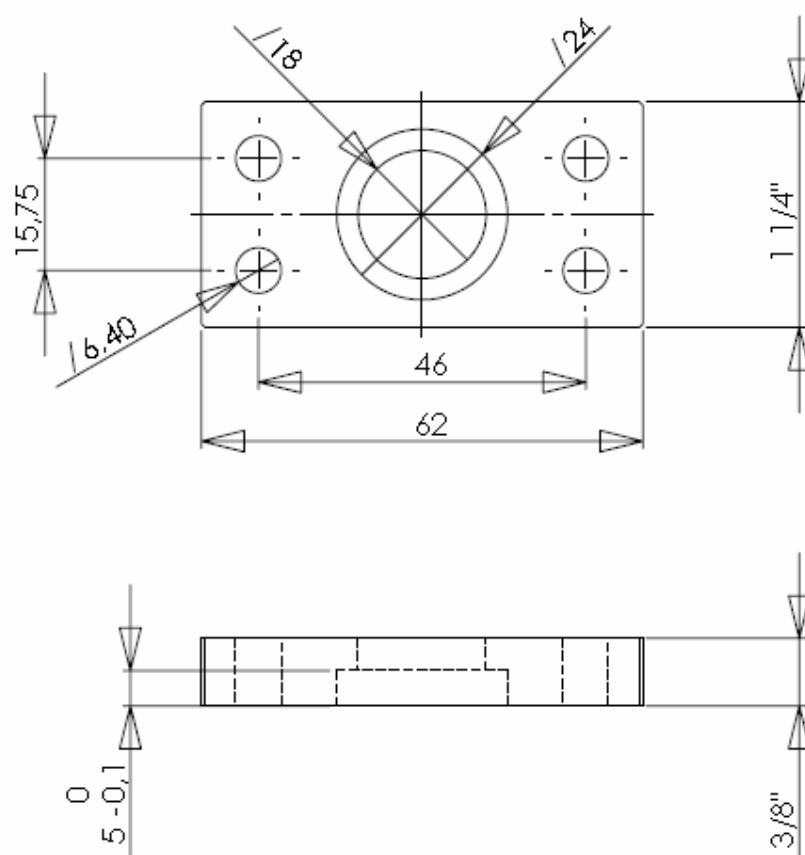
Eixo vertical – suporte câmera

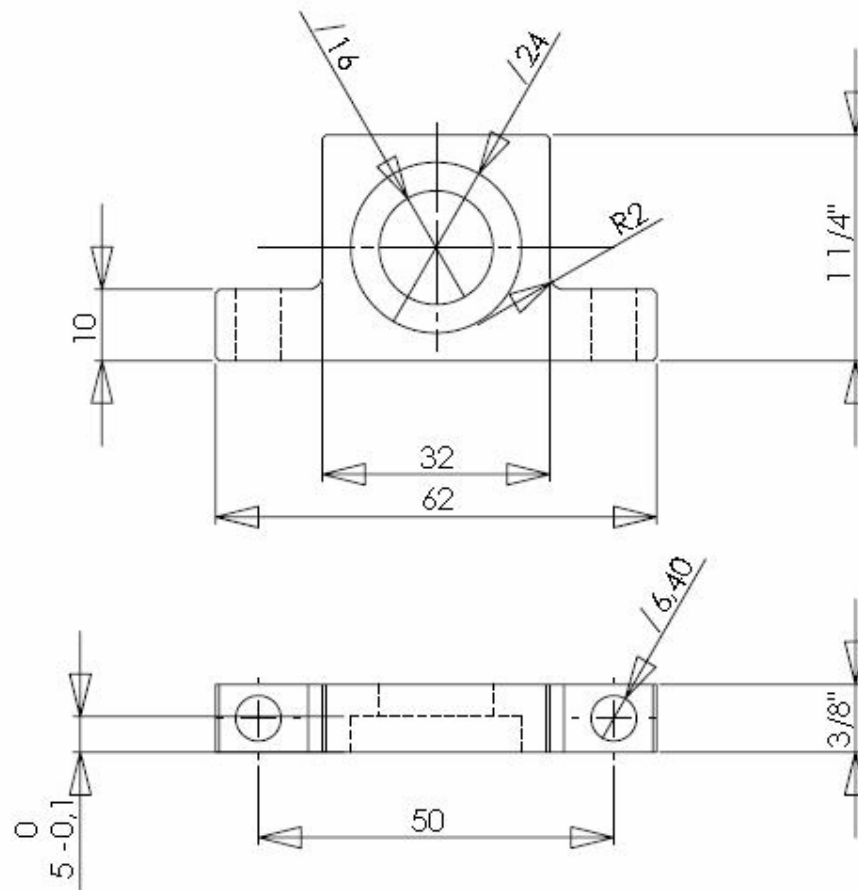
Manipulador – Suporte Câmera

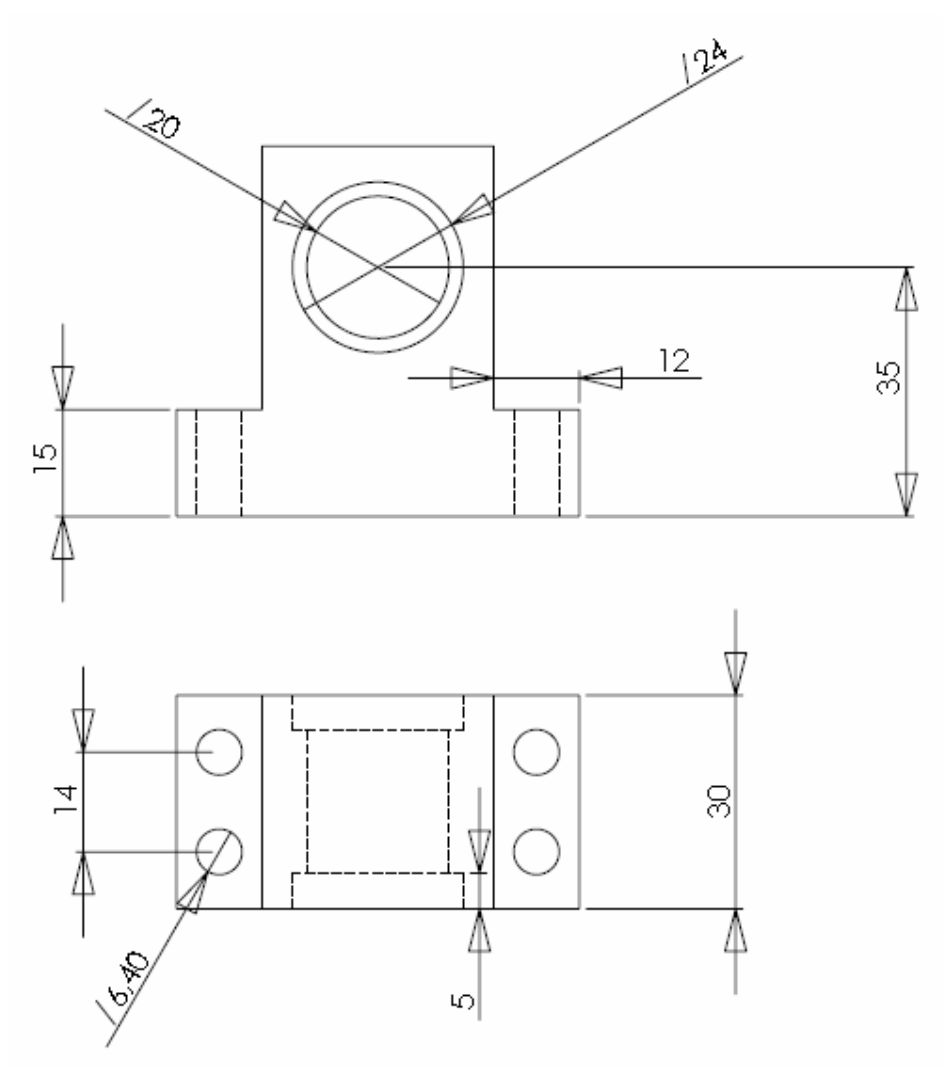


Luva de acoplamento com motor de passo

Mancal para rolamento 61801

Mancal para rolamento 61802

Mancal Y para rolamento 61802

Mancal eixo horizontal – suporte câmara

Mancal vertical – suporte câmara