

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROJETO DE FORMATURA

ESFERA BUSCADORA DE SOL

ORIENTADOR:

PROF. DR. MARCELO GODOY SIMÕES

MÁRCIO GIACCHETTA PAULILO	2921939
REINALDO FUGIO HINO	2918417

SÃO PAULO
PRIMAVERA DE 1997

**MÁRCIO GIACCHETTA PAULILO
REINALDO FUGIO HINO**

ESFERA BUSCADORA DE SOL

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO
PAULO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA.**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**ORIENTADOR:
PROF. DR. MARCELO GODOY SIMÕES**

**SÃO PAULO
1997**

FICHA CATALOGRÁFICA

HINO, Reinaldo F. & PAULILO, Márcio G. **Esfera Buscadora de Sol.** 51pp, 1997.

**ESTE TRABALHO É DEDICADO AO SYMBA E AO RISADA,
QUE MUITO CONTRIBUÍRAM PARA A REALIZAÇÃO DESTE TRABALHO.**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcelo Godoy Simões pelas diretrizes, sugestões, apoio e orientação neste trabalho.

Ao Prof. Nilson, pela colaboração teórica eventual.

Ao Fernando, pela ajuda constante e diferente de zero no laboratório em que se desenvolveu a maior parte do trabalho aqui apresentado.

Ao Cássio, colaborador indireto, assessor para assuntos para-curriculares, tais como retificações de matrícula, que permitiram a conclusão do curso no prazo inicialmente previsto.

Ao Sol por iluminar nossas mentes e células fotovoltaicas, permitindo o desenvolvimento do protótipo.

SUMÁRIO

1. Introdução e Objetivos (A).....	1
1.1. Introdução (A).....	1
1.2. Objetivo (A)	2
2. Revisão da Literatura (A)	3
2.1. Artigo “Solar Ball Robot” (A)	3
2.2. <i>Paper</i> de funcionamento da célula fotovoltaica (R).....	4
2.3. Manuais e Notas de Aplicação do Basic Stamp (R).....	6
2.4. Mecânica Geral e Analítica (M).....	7
3. Metodologia Aplicada (A)	8
4. Projeto (A).....	10
4.1. Sistema de Alteração do Centro de Massa (M).....	10
4.1.1. Solução adotada (M)	11
4.1.2. Dimensionamento de Motores e Redutores (M)	12
4.1.3. Partes Mecânicas Complementares (M).....	19
4.1.4. Chaveador de Motores (R)	32
4.2. Controle (M).....	32
4.2.1. Basic Stamp e A/D (R).....	34
5. Testes e Resultados (A).....	36
5.1. Célula Fotovoltaica (R)	36
5.2. Motores e Redutores (M)	36
5.3. Chaveamento de Motores (R)	37
5.4. Elevador de Tensão/Amostrador (R).....	37
5.5. Basic Stamp e A/D (A)	39
5.6. Conjunto (A)	39
6. Conclusões (A).....	43
7. Anexos (A).....	45
7.1. Anexo II – Programa de controle da esfera (A)	45
7.2. Anexo II – Programa de Teste do A/D (A)	48
7.3. Anexo III – Programa teste do chaveador de motores (A)	49
8. Referências Bibliográficas (A).....	50

OBSERVAÇÃO IMPORTANTE:

Este projeto foi inteiramente desenvolvido em conjunto. Para satisfazer a um requisito da disciplina, o qual prevê a divisão clara de tarefas entre os integrantes do grupo, as responsabilidades de alguns tópicos foram atribuídas a apenas um dos integrantes, mesmo quando houve trabalho em conjunto. Assim, os tópicos marcados com a letra “R” entre parênteses são de responsabilidade de Reinaldo Fugio Hino, enquanto que os marcados com a letra “M” são de responsabilidade de Márcio Giachetta Paulilo. Quando estiver marcada a letra “A”, trata-se de uma tarefa cuja responsabilidade não pode ser atribuída apenas a um dos integrantes, e sim ficou sob a responsabilidade de ambos.

RESUMO

Uma das mais visadas fontes alternativas de energia é a solar, devido à sua abundância e disponibilidade elevada em todo o planeta.

O objetivo deste texto é apresentar o estudo envolvido no desenvolvimento de um protótipo - a Esfera Buscadora de Sol - cuja função é posicionar-se de modo a indicar a direção principal de propagação das ondas de radiação solar, podendo ser empregado no direcionamento de painéis solares, fazendo-os operar em sua faixa ótima.

A Esfera Buscadora de Sol consiste em um dispositivo esférico, contendo em seu interior dois subsistemas, elétrico e mecânico. O subsistema mecânico tem como função alterar a posição do centro de massa do dispositivo, fazendo-o girar sobre uma superfície plana e horizontal. O subsistema elétrico-eletrônico assume as funções de absorção de energia solar, controle do subsistema mecânico para alteração do centro de massa e elevação de tensão para manutenção de tarefas básicas necessárias ao funcionamento do dispositivo. Uma célula fotovoltaica posicionada na parte superior do dispositivo é responsável pela alimentação dos componentes elétricos e fornecimento do parâmetro fundamental de controle, isto é, a potência elétrica absorvida.

A metodologia aplicada foi a divisão do projeto em blocos separados mas intercomunicantes, que pudessem ser projetados, implementados e testados separadamente, após o que o protótipo poderia ser testado por completo.

Dessa forma, foram desenvolvidos separadamente o dimensionamento de motores e redutores, o circuito de elevação de tensão e de chaveamento dos motores, o programa de controle de movimento e a confecção das partes do protótipo.

Os conceitos teóricos empregados, a descrição do protótipo bem como os resultados obtidos neste estudo também fazem parte do escopo deste trabalho.

Observou-se que um protótipo semelhante ao desenvolvido poderia ser empregado no direcionamento de painéis solares com alta eficiência e baixo custo.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS (A)

1.1. INTRODUÇÃO (A)

A energia solar tem sido amplamente estudada e utilizada em projetos experimentais como tecnologia alternativa para as fontes tradicionais de energia - a saber, hidrelétricas, termelétricas e usinas radioativas, que têm mostrado sinais acentuados de saturação. Por esta razão, a engenharia vem lançando mão de esforços intensos no sentido de desenvolver formas alternativas de obtenção de energia, tendo sempre em mente a viabilidade econômica.

Uma das alternativas mais visadas é a energia solar, devido à sua abundância e disponibilidade elevada em todo o planeta.

A *Esfera Buscadora de Sol* consiste em um dispositivo esférico, contendo em seu interior dois subsistemas, elétrico e mecânico, que interagem a fim de obter o melhor posicionamento da esfera em relação ao sol, além de uma célula fotovoltaica utilizada como sensor de intensidade luminosa.

O subsistema mecânico tem como função alterar a posição do centro de massa do dispositivo, fazendo o dispositivo girar sobre uma superfície plana e horizontal.

O subsistema elétrico-eletrônico assume as funções de absorção de energia solar, controle do subsistema mecânico para alteração do centro de massa e elevador de tensão da célula fotovoltaica para utilização na manutenção de tarefas básicas necessárias ao funcionamento do dispositivo.

Uma célula fotovoltaica posicionada na parte superior interna do dispositivo é responsável pela alimentação dos componentes elétricos e fornecimento do parâmetro fundamental de controle, isto é, a potência elétrica absorvida.

1.2. OBJETIVO (A)

O objetivo fundamental do projeto é desenvolver um protótipo que se posicione perpendicularmente à direção principal de propagação da radiação solar, indicando a posição ótima para obtenção de energia elétrica a partir da energia solar.

2. REVISÃO DA LITERATURA (A)

Alguns trabalhos desenvolvidos recentemente e utilizando células fotovoltaicas semelhantes à empregada no protótipo da Esfera Buscadora de Sol serviram de base teórica ou, senão, de guia para o desenvolvimento deste projeto. A seguir, apresentam-se as idéias principais de cada texto ou trabalho, observada sob a ótica específica de direcionamento do conhecimento para a aplicação em nosso projeto. Por isso mesmo, alguns dos textos ou trabalhos acabaram servindo apenas como referência ou sugestão, e não exatamente como fonte de pesquisa.

2.1. ARTIGO “SOLAR BALL ROBOT” (A)

Este artigo extraído da revista norte-americana Electronics Now - Janeiro 1997 - foi responsável pela idéia de se desenvolver um dispositivo mecânico controlado eletronicamente, de forma a apresentar-se como um projeto ideal na área da Mecatrônica. O projeto foi sugerido pelo Prof. Dr. Marcelo Godoy Simões, orientador deste trabalho.

Apesar do artigo ser o originador do estudo, pouco contribui no desenvolvimento efetivo da Esfera Buscadora de Sol, devido as várias diferenças existentes entre o projeto descrito no artigo e o projeto proposto pelo orientador.

O projeto pioneiro era uma esfera pequena, por volta de 12 centímetros de diâmetro, contendo apenas um motor, e, portanto, capaz de movimentar-se em torno de apenas um eixo horizontal. O motor era alimentado por duas pilhas pequenas e, ao invés de uma célula fotovoltaica, havia um LDR (resistência dependente de luz). Portanto, o comportamento da esfera original era deslocar-se aleatoriamente quando na presença de

luz suficientemente intensa para ativar o circuito.

A Esfera Buscadora de Sol apresenta intenções bem diferentes. No lugar do sensor LDR, existe uma célula fotovoltaica que além de identificar a existência de luz também é capaz de medir a intensidade da luz incidente. Para que a esfera pudesse se posicionar corretamente, era necessário acrescentar um segundo grau de liberdade, obtido através da composição do movimento de rotação de dois motores. Outra mudança: agora a esfera seria controlada através de um microcomputador de bordo, responsável pelo tratamento dos sinais obtidos pela célula fotovoltaica, determinando como e por quanto tempo os motores deveriam ser acionados para atingir o correto posicionamento da esfera. Não obstante estas diferenças, a intenção inicial era também que a Esfera Buscadora de Sol não utilizasse baterias, sendo totalmente autônoma em termos de energia. Este último aspecto não pode ser atingido, uma vez que a utilização de uma única célula fotovoltaica limitou a obtenção de energia a ponto de não ser possível alimentar todo o circuito elétrico, incluindo o microcomputador, e também os motores (ver item 5.4).

Pelo exposto, fica claro que o artigo serviu apenas como referência e não como fonte de estudo, tendo como principal importância o fato de ser o originador da idéia do projeto atual.

2.2. PAPER DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA (R)

Um sistema fotovoltaico constituído de células fotovoltaicas é caracterizado por um conjunto de curvas $V_x I$, os quais são ainda dependentes da intensidade de incidência luminosa (λ) na vertical e da temperatura da célula (T) na horizontal, tendendo à

operação em corrente constante ou em tensão constante.

A máxima potência da célula é obtida na intersecção dessas curvas com o lugar das hipérboles de potência, mudando de posição conforme os valores de λ e T (figura 2.1).

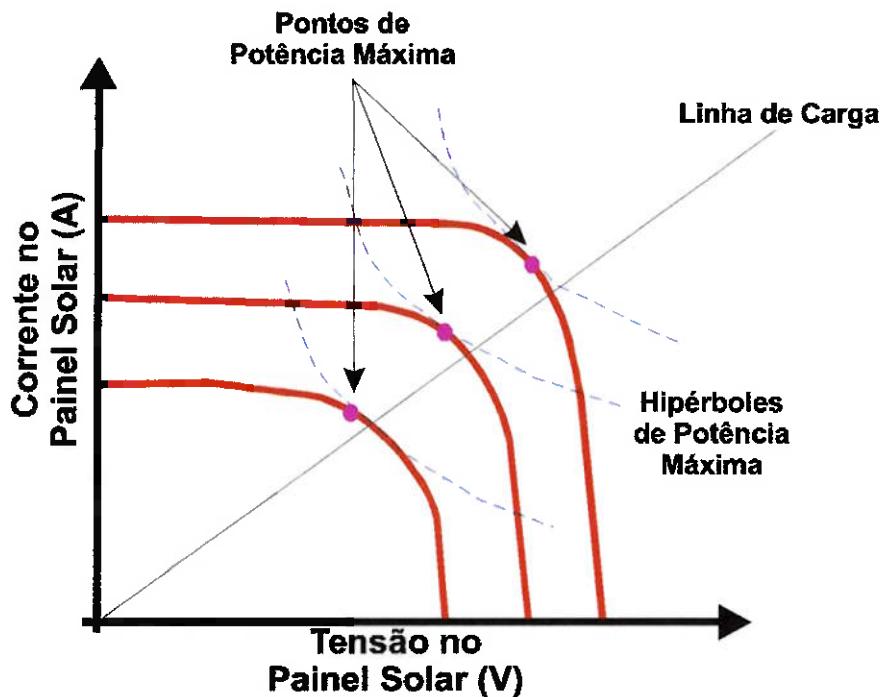


Figura 2.1. Curvas características típicas de uma célula fotovoltaica.

Para a obtenção do melhor rendimento da célula fotovoltaica, podem ser utilizados dois métodos:

- otimização da reta de carga: o circuito que transfere a energia da célula fotovoltaica para o circuito elevador de tensão (ver figura 2.2) deve possuir a capacidade de se adaptar (mudar a inclinação) para que o sistema sempre opere o mais próximo possível do ponto de máxima potência;
- aumento da incidência de luz: aumentando-se a incidência luminosa, a curva característica 'sobe' e assim, há aumento de potência na saída da célula.

O método de otimização da reta de carga requer um tratamento muito mais

complexo, necessitando de um sistema de controle para monitorar o comportamento da célula e corrigir rapidamente a inclinação da reta de carga. Na maioria das vezes, tal controlador é implementado com a utilização de microprocessadores ou microcontroladores, além de possuir sofisticados algoritmos capazes de manipulares as variáveis de entrada envolvidas, que podem sofrer variações momentâneas e interferem não linearmente na eficiência do sistema.

Um sistema típico de captação de energia solar pode ser visto na figura 2.2.

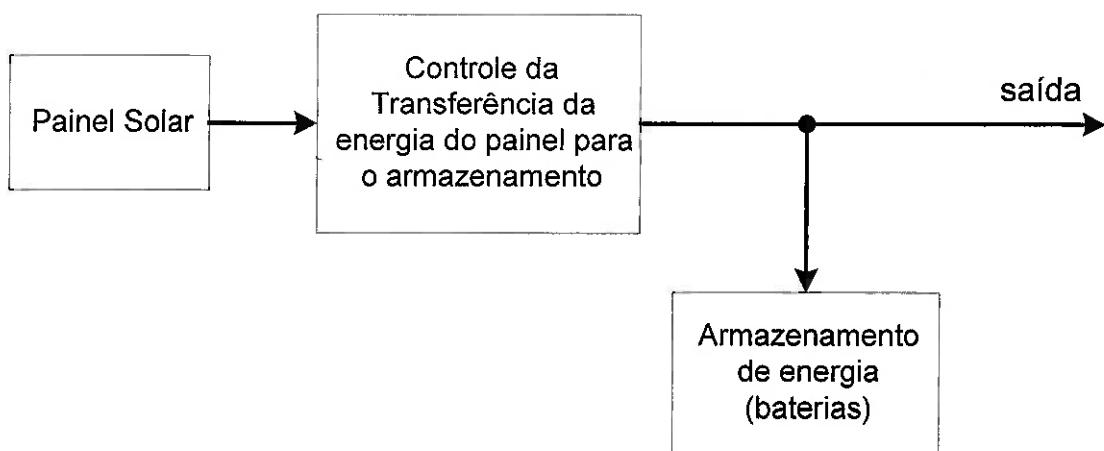


Figura 2.2. Sistema fotovoltaico típico.

A saída do sistema normalmente é conectada a conversores, tais como inversores e circuitos abaixadores e elevadores de tensão para posterior utilização.

No sistema em desenvolvimento, o método utilizado será o do aumento de incidência de luz, o qual será obtido através do movimento angular da célula em busca de um melhor posicionamento em relação à fonte de luz (solar ou não).

2.3. MANUAIS E NOTAS DE APLICAÇÃO DO BASIC STAMP (R)

Um dos candidatos a ser o microcomputador usado na Esfera Buscadora de Sol

foi o Basic Stamp devido às suas dimensões reduzidas, fácil programação, capacidade suficiente de processamento e memória, além de seu baixo custo.

As notas de aplicação do Basic Stamp foram utilizadas para desenvolvimento do interfaceamento do microcomputador e do conversor analógico-digital (duas entradas analógicas e saída serial de 12 bits).

2.4. MECÂNICA GERAL E ANALÍTICA (M)

Para avaliar fisicamente o comportamento da esfera foram consultados alguns livros de mecânica geral e analítica, buscando encontrar um modelo matemático bom para estudar o comportamento da Esfera como um todo. No entanto, observou-se que os modelos matemáticos pesquisados tornar-seiam complexos demais para serem utilizados na simulação do protótipo, devido ao fato de ainda não estarem bem definidos todos os seus componentes, e ainda assim existiria um erro muito grande, em função das assimetrias existentes nos componentes já previstos.

Assim, decidiu-se por utilizar modelos físico-matemáticos apenas no dimensionamento dos motores e redutores, uma vez que esta tarefa era essencial para o bom funcionamento do protótipo.

3. METODOLOGIA APLICADA (A)

Terminada a etapa de revisão da literatura disponível sobre o assunto do projeto, estabeleceu-se uma meta, com objetivos e cronograma definido, e para atingi-la desenvolveu-se um método para orientar o desenrolar das atividades ligadas ao projeto.

Inicialmente descrever-se-á a metodologia aplicada no desenvolvimento do projeto para posteriormente apresentarem-se as soluções e os resultados obtidos na implementação de cada etapa do projeto.

O dispositivo em projeto é suficientemente complexo para impossibilitar a identificação de um problema caso se optasse por desenvolvê-lo completamente e testá-lo apenas depois de montado. Assim, para evitar esse tipo de problema, o projeto foi dividido em blocos, sub-sistemas que poderiam ser testados independentemente até se ter certeza de que cada parte funcionava adequadamente. Cada bloco foi independentemente projetado, construído e testado, baseado nas entradas e saídas previstas na posterior integração do conjunto. Depois de verificada eficiência dos blocos montou-se o conjunto completo e testou-se seu funcionamento. Finalmente foram realizadas otimizações no controle para que a esfera se posicionasse devidamente. Em resumo, as etapas do projeto foram as seguintes:

- divisão em blocos, a saber:
 - célula fotovoltaica
 - circuito elevador de tensão e amostrador de sinal
 - sistema de alteração do centro de massa
 - controle
- projeto de circuitos e partes mecânicas

- montagem de circuitos impressos e construção de peças mecânicas
- testes de cada “caixa preta”
- análise dos resultados
- montagem do conjunto
- análise de desempenho do conjunto
- conclusões (indicação de otimizações)

4. PROJETO (A)

4.1. SISTEMA DE ALTERAÇÃO DO CENTRO DE MASSA (M)

As premissas básicas para definição do sistema de alteração do centro de massa da esfera são determinadas pelo comportamento que se espera do dispositivo como um todo.

A esfera deve-se deslocar sobre um plano e, para isso, é necessário que o sistema mecânico permita movimento em torno de dois eixos, garantindo que o posicionamento proporcione realmente absorção máxima de energia solar, independentemente da posição inicial da placa em relação aos raios solares.

Portanto, é necessário que o sistema componha duas rotações, permitindo o posicionamento da massa da extremidade do pêndulo em qualquer ponto de uma semi-superfície esférica centrada sobre o eixo de rotação do pêndulo. Em resposta a esta alteração do centro de massa a esfera irá se deslocar sobre o plano horizontal.

4.1.1. SOLUÇÃO ADOTADA (M)

Uma solução possível para o problema de alteração do centro de gravidade da esfera seria movimentar uma massa sobre um fuso disposto horizontalmente — primeiro grau de liberdade — e rodar esse fuso em torno de um eixo vertical — segundo grau de liberdade. Essa solução não convém, por razões construtivas. Suponhamos que a esfera seja totalmente simétrica em relação à vertical, exceto pelo fuso que é simétrico em relação a um plano vertical. Imagine-se que o fuso esteja disposto inicialmente na horizontal e, portanto, a massa esteja exatamente no centro do curso do fuso. Um pequeno deslocamento dx dessa esfera sobre o fuso provocaria uma rotação $d\theta$ do sistema. Depois de atingido o equilíbrio, um novo deslocamento dx acarretaria uma rotação $d\theta'$ menor que $d\theta$. Decorrem desse fato alguns problemas sérios: a) grande dificuldade de controle, uma vez que a taxa entre o deslocamento linear da massa sobre o fuso e a rotação do sistema não é constante; b) grande instabilidade e c) problemas com atritos entre a massa e o fuso, acrescentando um fator novo e não mensurável que pode prejudicar o controle. Abaixo da célula, um circuito elétrico dotado de um

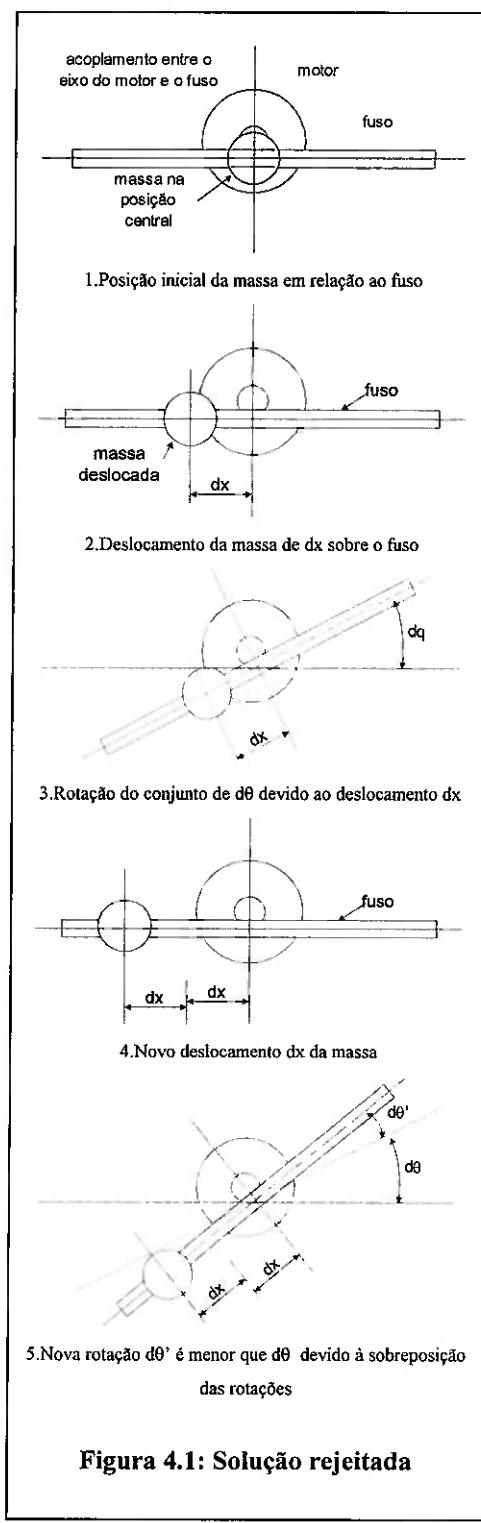
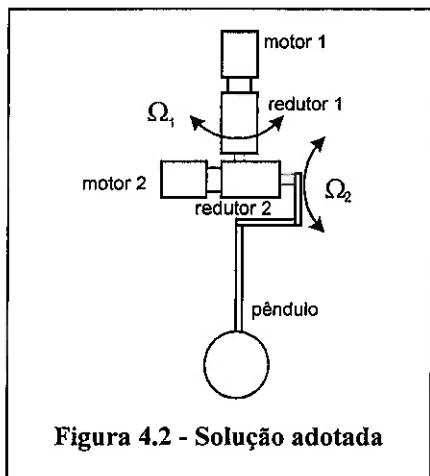


Figura 4.1: Solução rejeitada

microcontrolador BASIC Stamp e circuitos auxiliares tornam possível o controle do sistema.



Outra solução para o problema seria substituir o fuso por um segundo motor, que movimentaria um pêndulo. A composição dos movimentos de rotação em torno da vertical e rotação do pêndulo na horizontal deslocaria a massa numa trajetória cônica variável. Essa construção elimina diretamente os inconvenientes (a) e (b) anteriormente citados e, consequentemente, o inconveniente (c).

4.1.2. DIMENSIONAMENTO DE MOTORES E REDUTORES (M)

4.1.2.1. DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS E HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS PARA MODELAGEM (M)

Algumas hipóteses simplificadoras importantes foram adotadas para que se pudesse dimensionar os motores do dispositivo.

Supõe-se, logo de início, que a esfera deverá deslocar-se apenas sobre superfícies planas, horizontais e não lisas — isto é, as superfícies devem apresentar atrito suficiente para garantir o não escorregamento da esfera sobre a superfície horizontal.

Para que a esfera tenha estabilidade e não fizesse movimentos bruscos e indevidos, considera-se que as velocidades de rotação são muito baixas, da ordem de uma rotação por minuto, tornando desprezíveis os efeitos inerciais no que diz respeito ao dimensionamento do motor M2. Como as rotações dos motores elétricos de pequenas

dimensões são da ordem de milhares de rpm sabe-se de antemão que serão necessários redutores na saída dos motores para obter a rotação desejada.

Além disso, sabe-se que o motor vertical será mais solicitado, devido ao maior momento de inércia do conjunto rotativo, de forma que uma vez dimensionado o motor vertical, o outro motor pode ser adotado com mesmas especificações sem que se corra o risco de sub-dimensionamento. Isso não apenas simplifica o dimensionamento, como também reduz o custo total do dispositivo, caso o mesmo viesse a ser produzido em uma escala maior.

4.1.2.2. MODELO MATEMÁTICO (M)

A principal função do modelamento matemático é o dimensionamento e o posicionamento dos componentes dentro da esfera. O posicionamento teórico dos componentes já foi estabelecido a partir da solução adotada para alterar a posição do centro de massa da esfera e pode ser representado pelo esboço da figura 4.3.

Para dimensionar os motores e os redutores sob o ponto de vista mecânico devem-se considerar apenas o torque e a rotação necessárias para a movimentação da esfera. Assim, partindo de uma equação genérica e aplicando-se as hipóteses

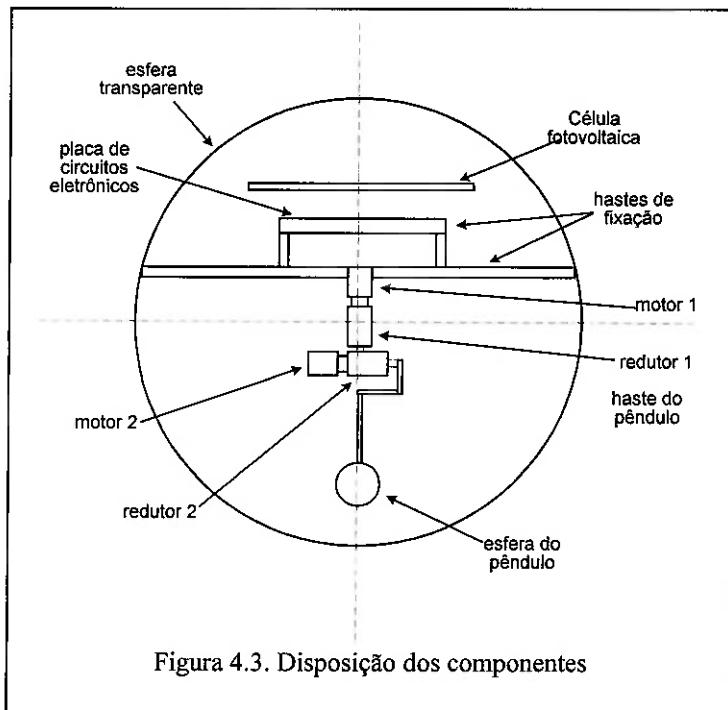


Figura 4.3. Disposição dos componentes

simplificadoras cabíveis chegar-se-á a uma equação que forneça o torque mínimo para os motores.

O motor M1 precisa de um torque T1 capaz de girar o conjunto composto pelo motor M2, o redutor R2 e o pêndulo. A situação crítica é quando o pêndulo está parado em relação ao motor M2, uma vez que o momento do conjunto anteriormente descrito será máximo nessa situação e, portanto, fornecerá o momento máximo, que deve ser inferior ao torque disponível no motor M1.

Como a velocidade de rotação dos motores é bastante pequena, pode-se afirmar que o torque necessário para o motor M1 é tão somente aquele necessário para equilibrar o momento gerado pela inclinação do pêndulo de um determinado ângulo, isto é, $T = M_2 g \operatorname{sen} \theta$. Certamente, o motor M1

deverá dispor de um torque maior que o motor M2. Assim, dimensionar-se-a apenas o motor M1 e utilizar-se-ão dois motores iguais, reduzindo o trabalho teórico de dimensionamento e reduzindo os custos de uma eventual produção em larga escala do dispositivo.

Considere-se para as considerações matemáticas a seguir a notação de eixos mostrada na figura 4.4.

De modo geral, sabe-se que

$$\sum \vec{M}_O = \frac{\delta \vec{h}_O}{\delta t} + \vec{\omega} \wedge \vec{h}_O$$

onde:

$\sum \vec{M}_O$ é a somatória dos momentos em relação ao ponto O, origem do sistema de coordenadas, aplicados no corpo rígido;

$\frac{\delta \vec{h}_O}{\delta t}$ é o índice de variação de \vec{h}_O em relação ao sistema fixo OXYZ e pode ser

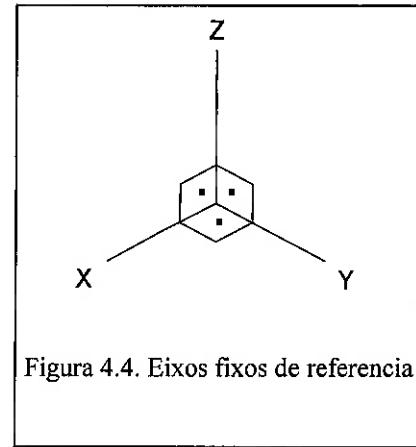


Figura 4.4. Eixos fixos de referencia

escrito em função de suas coordenadas como $\frac{\delta \vec{h}_O}{\delta t} = \frac{dh_x}{dt} \hat{i} + \frac{dh_y}{dt} \hat{j} + \frac{dh_z}{dt} \hat{k}$;

$\vec{\omega}$ é a velocidade angular do sistema rotativo e pode ser descrita em termos de suas componentes nas direções x, y e z como $\vec{\omega} = \omega_x \hat{i} + \omega_y \hat{j} + \omega_z \hat{k}$;

\vec{h}_O é a quantidade de movimento angular do corpo em relação a OXYZ.

A quantidade de movimento angular pode ser descrita em termos de suas componentes como $\vec{h}_O = h_x \hat{i} + h_y \hat{j} + h_z \hat{k}$, onde suas componentes são

$$h_x = I_x \omega_x - P_{xy} \omega_y - P_{xz} \omega_z;$$

$$h_y = -P_{yx} \omega_x + I_y \omega_y - P_{yz} \omega_z;$$

$$h_z = -P_{zx} \omega_x - P_{zy} \omega_y + I_z \omega_z.$$

Supondo rotação em torno do eixo z fixo, as componentes da rotação se resumem a $\omega_x = \omega_y = 0$ e $\omega_z = \omega = \Omega_1$. Logo, as componentes da quantidade de movimento angular ficam

$$h_x = -P_{xz} \omega \quad h_y = -P_{yz} \omega \quad h_z = I_z \omega.$$

Conseqüentemente, os momentos as somatórias dos momentos aplicados em relação ao ponto O passam a ser

$$\sum M_x = -P_{xz} \dot{\omega} + P_{yz} \omega^2$$

$$\sum M_y = -P_{yz} \dot{\omega} - P_{xz} \omega^2$$

$$\sum M_z = I_z \dot{\omega}$$

4.1.2.3. SELEÇÃO DOS MOTORES E REDUTORES (M)

O dimensionamento dos motores e dos redutores será realizado em três etapas.

Na primeira etapa, escolhem-se um motor e um redutor de modo intuitivo, tais que

pareçam se adequar às necessidades do dispositivo. Na segunda etapa, calculam-se os momentos de inércia do conjunto rotativo considerando os dados de catálogo dos componentes adotados inicialmente. Na terceira e última etapa, verifica-se se a escolha foi apropriada através da condição de que o torque necessário para movimentar o conjunto, partindo do repouso, seja suficientemente pequeno quando comparado ao torque disponível na saída do redutor.

1º passo: escolha intuitiva de motor e redutor

Para dimensionar o motor M1 só interessa a equação $\sum M_z = I_z \dot{\omega}$. A somatória dos momentos reduz-se ao torque T_1 do motor em torno de seu eixo de rotação (eixo z). Assim, precisam-se determinar o momento do conjunto rotativo, representado por I_z , e a aceleração angular $\dot{\omega}$.

Pode-se simplificar o cálculo dos momentos de inércia dos motores e redutores, sem perder o rigor científico para esta aplicação, considerando-os cilindros homogêneos com dimensões externas iguais às da carcaça e massa igual à massa do componente.

O momento de inércia de um cilindro homogêneo de massa M , raio R e comprimento L em torno de um eixo perpendicular à sua direção axial e passando pelo centro de massa é $I_G = \frac{1}{12} M(3R^2 + L^2)$. Se houver um eixo z, paralelo ao anterior, distante dele uma distância D , o novo momento de inércia pode ser calculado por $I_z = I_G + MD^2$ (Teorema dos eixos paralelos).

O dispositivo não pode consumir muita potência elétrica, uma vez que toda a energia de que dispõe é proveniente da célula fotovoltaica. Portanto, estima-se que cada motor não deva consumir mais que 0,25W de potência.

A partir de um catálogo de mini-motores da empresa suíça Faulhaer, escolheu-se, através da intuição, um motor de baixo consumo e um redutor de dimensões razoavelmente pequenas para iniciar o dimensionamento (Tabela 4.1). Calcularam-se, em seguida, os momentos de inércia desse motor e verificou-se se os mesmos satisfariam as condições mínimas necessárias de torque e rotação.

Tabela 4.1: Dados de catálogo de motor e redutor escolhidos para pré-dimensionamento.

Grandezas	Unidade	Motor: 1212-004G	Redutor: 12/3
Comprimento	mm	16	36,5
Diâmetro	mm	12	12
Massa	g	6,5	19
Rotação	rpm	20.100	-
Redução	-	-	30.492:1
Eficiência	%	-	54
Potência	W	0,32	-
Aceleração	rd/s ²	28.300	-
Comprimento do motor com o redutor	mm	48,7	-

2º passo: cálculo dos momentos de inércia

Acoplados, o motor e o redutor apresentam comprimento total de 48,7mm. Devem-se posicionar os dois componentes de modo que o centro gravitacional do conjunto caia sobre o eixo vertical z. A figura 4.5 apresenta um esboço com a disposição do motor e do redutor. As distâncias entre o centro de massa próprio dos componentes e o eixo vertical z está representada no desenho e são esses valores que corrigirão o momento de inércia dos componentes.

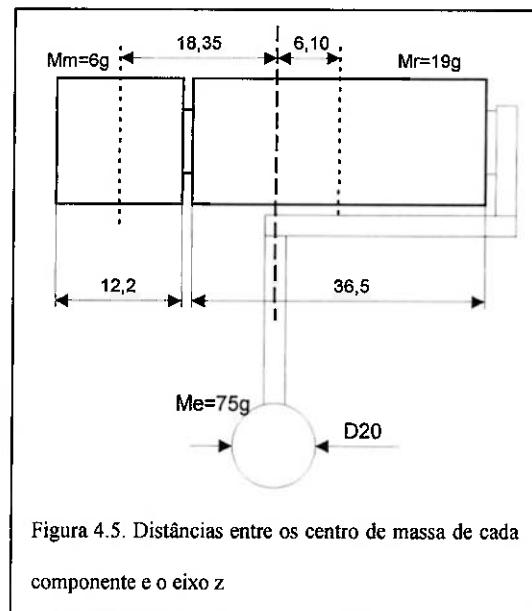


Figura 4.5. Distâncias entre os centro de massa de cada componente e o eixo z

Para o motor M2, obtém-se o seguinte momento de inércia em relação ao eixo z:

$$I_{MZ} = \frac{M}{12} (3R^2 + L^2) + MX^2 = \frac{6,5}{12} (3 \times 6^2 + 16^2) + 6,5 \times 18,35^2 = 2.385,86 \text{ gmm}^2$$

Para o redutor R2, obtém-se:

$$I_{RZ} = \frac{M}{12} (3R^2 + L^2) + MX^2 = \frac{19}{12} (3 \times 6^2 + 36,5^2) + 19 \times 6,1^2 = 2.987,38 \text{ gmm}^2$$

Para o pêndulo, composto por haste e esfera, devemos considerar os momentos de uma haste delgada e uma esfera em relação ao seu centro de gravidade e, então, transportá-los das distâncias mostradas na figura 4.5. Obtém-se o momento do pêndulo através de:

$$I_{PZ} = M_1 X_1^2 + \frac{1}{3} M_2 L_2^2 + \frac{2}{5} M_E R_E^2 = 1 \times 24,35^2 + \frac{1}{3} \times 1,9 \times 24,35^2 + \frac{2}{5} \times 10 \times 10^2 = 1.368,44 \text{ gmm}^2$$

A soma dos momentos de cada componente em relação eixo z fornecerá o momento de inércia do conjunto rotativo, isto é:

$$I_{CRZ} = I_{MZ} + I_{RZ} + I_{PZ} = 2.385,86 + 2.987,38 + 1.368,44 = 6.741,68 \text{ gmm}^2$$

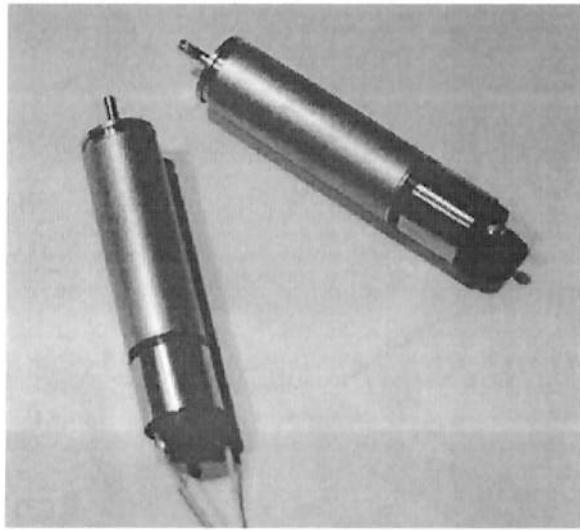


Figura 4.6. Motores e redutores selecionados

3º passo: verificação da condição de disponibilidade de torque

A aceleração do conjunto rotativo pode ser obtida através da correção da

aceleração do motor, fornecida em catálogo, levando-se em conta a redução proporcionada pelo redutor, resultando $\dot{\omega}_{CR} = \frac{\dot{\omega}_M}{30.492} = 0,93 \text{ rad/s}^2$. O momento do conjunto rotativo foi calculado no item anterior como sendo $I_{CRZ} = 6.741,68 \times 10^{-6} \text{ gm}^2$. Baseado na equação obtida nas considerações sobre o modelo matemático utilizado, pode-se calcular o torque necessário na saída do redutor e compará-lo com a disponibilidade do motor escolhido.

$$T_R = \frac{0,93 \times 6.741,68 \times 10^{-6}}{0,54} = 0,011 \text{ mNm} \ll 30.492 \times T_M = 30.492 \times 0,32 = 9.757,44 \text{ mNm}$$

A equação anterior mostra que a potência disponível é muitas vezes maior que a potência necessária, de onde se conclui que o motor e o redutor escolhidos são adequados e, portanto, não é necessária uma nova iteração para dimensioná-los. Os modelos apresentados na tabela 4.1 são, portanto, os modelos utilizados no desenvolvimento do protótipo.

Esse resultado já era esperado, uma vez que a relação de redução sendo muito grande acaba por gerar um torque extraordinariamente alto.

4.1.3. PARTES MECÂNICAS COMPLEMENTARES (M)

Anteriormente foi descrito de modo genérico como seria realizada a composição dos movimentos dos motores no interior da esfera de forma que o deslocamento do centro de massa possibilitasse a rotação da esfera (figura 4.3).

Foi visto que, ao rodar para uma nova posição sobre o plano, a célula fotovoltaica receberia uma intensidade diferente de luz solar, a qual seria convertida em uma tensão também diferente. No caso deste sinal ser maior que o sinal anterior, a rotina

programada no Basic Stamp encarregar-se-ia de movimentar novamente os motores no mesmo sentido que anteriormente feito. Caso o novo sinal fosse menor, o sentido de rotação deveria ser invertido.

No entanto, o que se viu anteriormente é muito genérico: indicam-se as rotações e o modo segundo o qual se posicionam os componentes, mas não se descrevem suas medidas, nem os materiais utilizados na fabricação e montagem do mesmo.

O objetivo desta seção é justamente descrever através de desenhos e textos como foram fabricados cada componente, bem como descrever a montagem do conjunto. Cumpre lembrar que não foram utilizados ferramentas e processos de fabricação industrial, e sim métodos manuais mais próximos do artesanato. Isso se deve ao fato de terem sido utilizados materiais de fácil usinagem, tais como alumínio, acrílico e polietileno, e também porque as operações necessárias eram extremamente simples (a saber, dobramento, cortes retos e furações), podendo ser executadas através de serras e furadeiras manuais, além de ferramentas básicas constantes de qualquer oficina doméstica (alicates, chaves de fenda etc).

4.1.3.1. PÊNDULO (M)

A. Descrição

A haste do pêndulo foi construída partindo uma chapa de alumínio de 0,8mm de espessura e a massa posicionada na extremidade do pêndulo é uma peça ovóide de chumbo, com aproximadamente 75mg. A figura 4.7 é a vista lateral da haste, em termos de projeto. A haste propriamente dita, presente no protótipo construído, pode ser vista na figura 4.8.

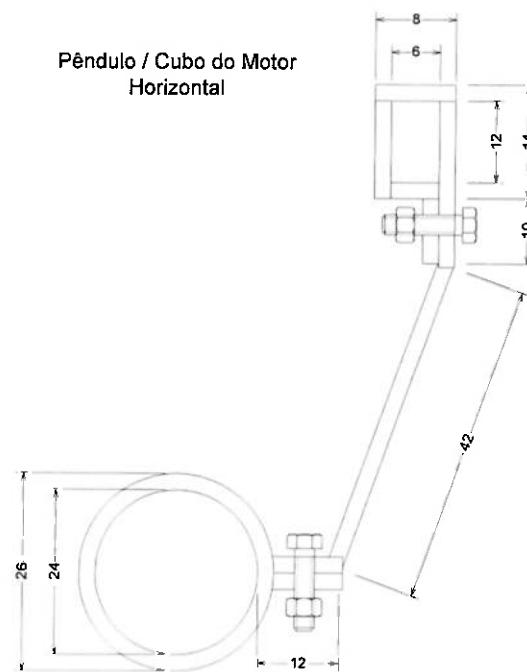


Figura 4.7. Pêndulo

B. Processo de Fabricação e Ferramental

Foi cortada uma tira de 10mm de largura, dobrada de forma a acoplar-se, numa das extremidades, ao cubo do motor horizontal e, na outra extremidade, a um ovóide de chumbo de 75mg. A tira de alumínio foi furada usando uma broca de 3mm para que fossem atravessados os parafusos de fixação da massa e do cubo do eixo do motor horizontal.

C. Custo e Fonte

A haste de alumínio pode ter seu custo estimado por sua área. Considerando-se que tem aproximadamente 180mm^2 de área e uma chapa de 1m^2 de alumínio custa R\$50,00, o custo de material da haste é de R\$ 0,01. O elipsóide de chumbo custa R\$0,75.

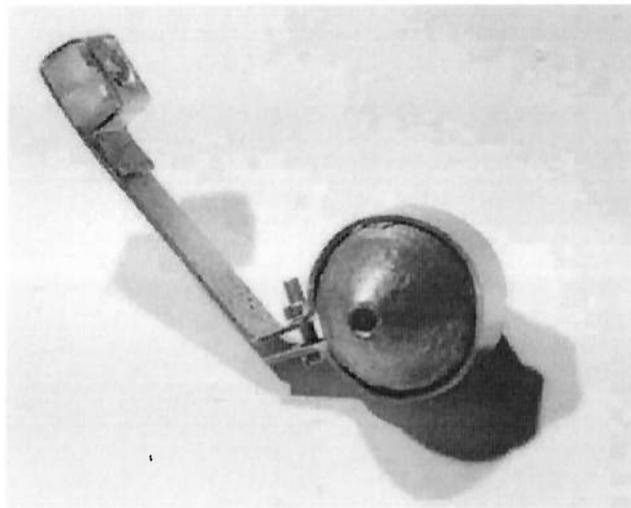
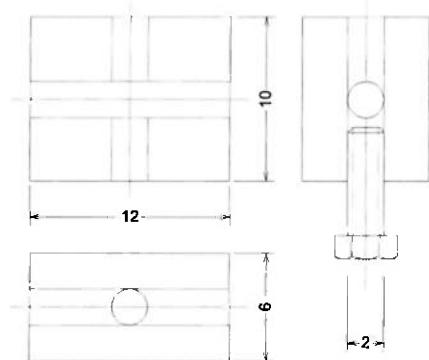


Figura 4.8. Fotografia do pêndulo do protótipo.

4.1.3.2. CUBO DO MOTOR HORIZONTAL/SUPORTE DO PÊNDULO (M)

A. Descrição

Trata-se de um cubo de acrílico de 12x10x6mm com dois furos passantes de 2mm de diâmetro, perpendiculares entre si e um parafuso de fixação do eixo do motor.



B. Processo de Fabricação e Ferramental

O cubo foi obtido a partir de uma placa de acrílico de 6mm de espessura, serrado usando-se um arco de serra. Os furos foram feitos com uma broca de aço rápido de 2mm. Um dos furos foi rosqueado utilizando-se o próprio parafuso que permite a fixação do eixo do motor.

Figura 4.9. Cubo de Acrílico

C. Custo e Fonte

A partir da área do cubo (10x12mm) pode-se calcular o custo do cubo. A placa

de acrílico de 100x 200mm foi obtida como retalho por R\$ 2,00. Conclui-se que o custo do cubo é inferior a 2 centavos de Real.

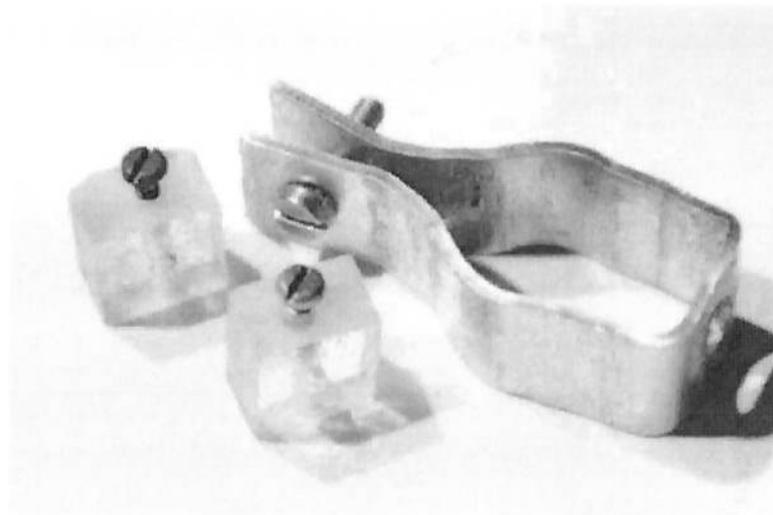


Figura 4.10. Cubos e suporte do motor horizontal.

4.1.3.3. CUBO DO MOTOR VERTICAL / SUPORTE DO MOTOR HORIZONTAL (M)

ESTE É IDÊNTICO AO ITEM ANTERIOR.

4.1.3.4. SUPORTE DO MOTOR VERTICAL (M)

A. Descrição

Também fabricado em polietileno branco opaco, consiste de uma placa semelhante ao suporte da célula acrescido de quatro furos na região central, também de 3mm de diâmetro, onde se fixará o Suporte do Motor Vertical.

B. Processo de Fabricação e Ferramental

Inicialmente cortaram-se dois retângulos de alumínio idênticos de 50x70mm. Então, fizeram-se em cada um dos retângulos dois cortes a uma distância de 12mm das laterais mais compridas, de forma a se obter chapas em forma de “U”. Depois, cada extremidade foi dobrada formando um ângulo de 90° com o plano principal da chapa. A região central foi conformada em formato semicircular no diâmetro do motor. Foram feitos furos para passar os parafusos de fixação das peças entre si e destas no suporte da célula e do suporte do motor vertical.

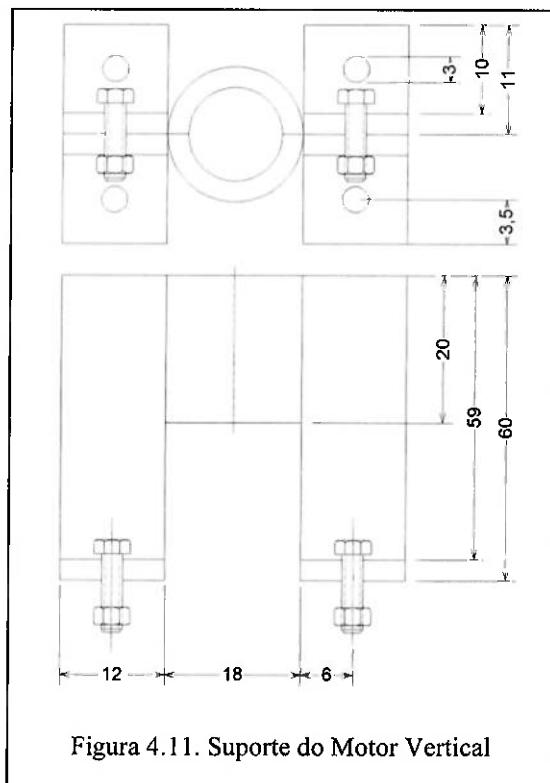


Figura 4.11. Suporte do Motor Vertical

C. Custo e Fonte

De modo análogo, calcula-se o custo desta peça baseado no custo da chapa de alumínio. Obtém-se, a partir da relação entre áreas, R\$ 0,10 para a peça.



Figura 4.12. Suporte do motor vertical do protótipo.

4.1.3.5. SUPORTE DO MOTOR HORIZONTAL / CUBO DO MOTOR VERTICAL (M)

A. Descrição

Esta peça se compõe de uma tira de alumínio dobrada de forma a envolver o cubo do motor vertical e o motor horizontal, fixados pelo aperto de um parafuso. O suporte do protótipo pode ser visto na figura 4.8.

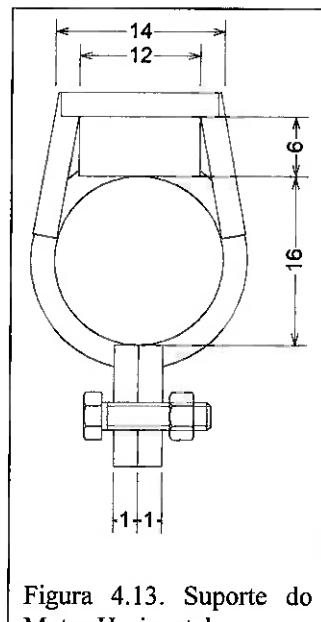


Figura 4.13. Suporte do Motor Horizontal

B. Processo de Fabricação e Ferramental

Cortou-se atira de alumínio, furando-a no centro (para passagem do eixo do motor vertical acoplado ao cubo) e nas extremidades (para passagem do parafuso de aperto).

C. Custo e Fonte

O custo aproximado é de R\$0,05.

4.1.3.6. SUPORTE DA CÉLULA FOTOVOLTAICA (M)

A. Descrição

Fabricado em polietileno branco opaco, consiste de uma placa de 120x120x2mm, com 4 furos de 3mm de diâmetro cada, posicionados aproximadamente a 5mm de distância das laterais da placa. A célula fotovoltaica, que possui dimensões 100x100mm, é posicionada exatamente no centro desta placa de plástico, sendo fixada através de uma fita adesiva.

B. Processo de Fabricação e Ferramental

Partindo de um grande retalho de polietileno, serrarrou-se uma placa de 120x120mm. Com uma broca de 3mm de diâmetro e uma furadeira de bancada vertical, fizeram-se os 4 furos periféricos de fixação do suporte. Usando uma lixa d'água, removeram-se as rebarbas originadas nos processos de serramento e furação.

C. Custo e Fonte

O retalho custou R\$0,10 e foi obtido numa loja de artigos plásticos.

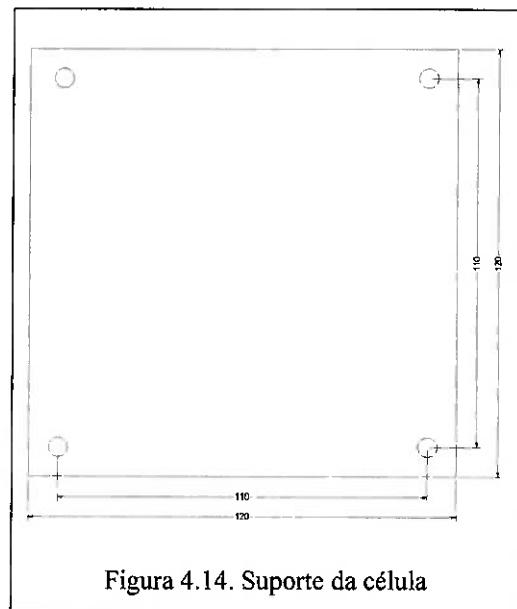


Figura 4.14. Suporte da célula

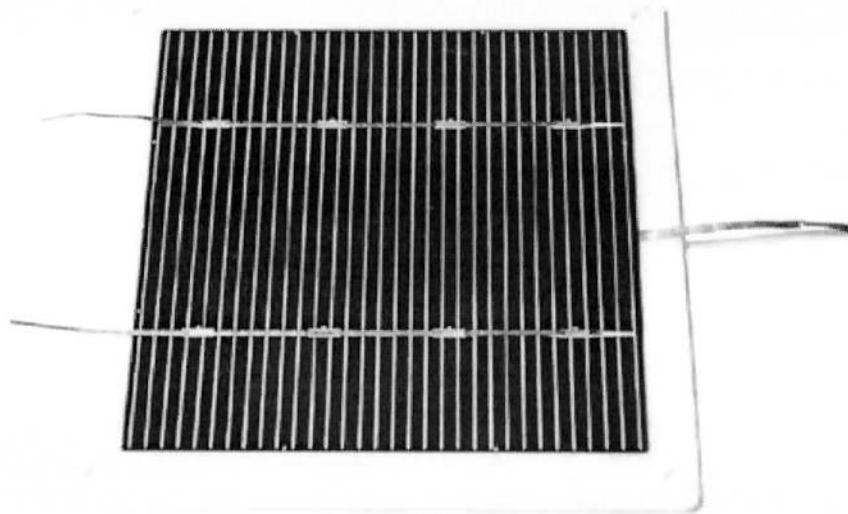


Figura 4.15. Célula fotovoltaica aderida ao seu suporte.

4.1.3.7. SUPORTE DO CIRCUITO ELÉTRICO E DO SUPORTE DO MOTOR VERTICAL (M)

A. Descrição

Fabricado em polietileno branco opaco, consiste de uma placa de 120x120x2mm, com 4 furos de 3mm de diâmetro cada, posicionados aproximadamente a 5mm de distância das laterais da placa. A célula fotovoltaica, que possui dimensões 100x100mm, é posicionada exatamente no centro

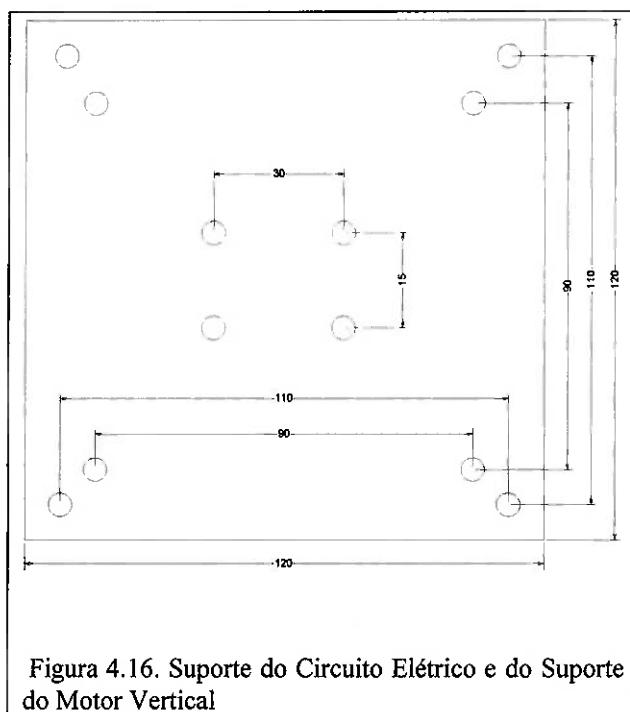


Figura 4.16. Suporte do Circuito Elétrico e do Suporte do Motor Vertical

desta placa de plástico, sendo fixada através de uma fita adesiva.

B. Processo de Fabricação e Ferramental

Partindo de um grande retalho de polietileno, serrarrou-se uma placa de 120x120mm. Com uma broca de 3mm de diâmetro e uma furadeira de bancada vertical, fizeram-se os 4 furos periféricos de fixação do suporte. Usando uma lixa d'água, removeram-se as rebarbas originadas nos processos de serramento e furação.

C. Custo e Fonte

O retalho custou R\$0,10 e foi obtido numa loja de artigos plásticos.

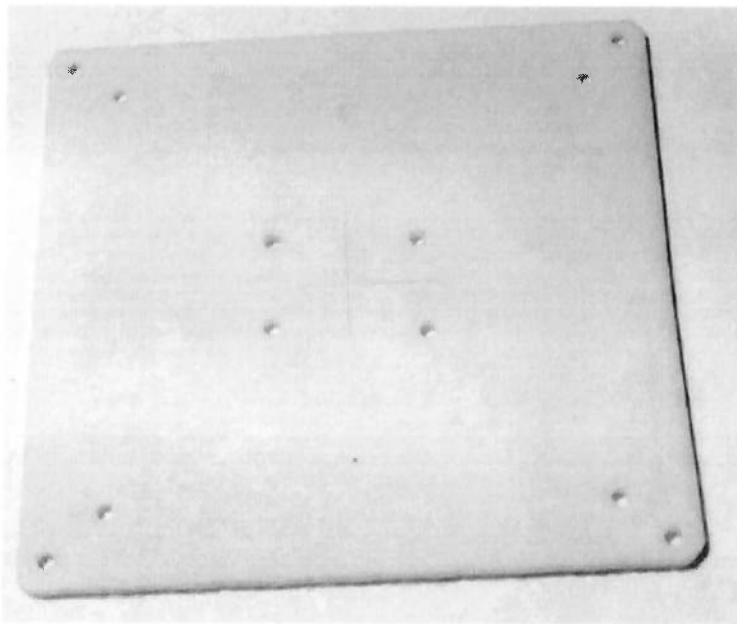


Figura 4.17. Suporte do circuito elétrico e do suporte vertical do protótipo.

4.1.3.8. ESFERA PLÁSTICA (M)

A. Descrição

Trata-se de uma esfera de PVC branco opaco, com uma abertura circular na qual existe uma espécie de aba, abertura circular de 80mm de diâmetro aproximadamente, vendida no comércio como um globo para lustre, razão pela qual ser translúcido, uma vez que permite a iluminação do ambiente sem ofuscar a vista das pessoas nele presentes.

B. Processo de Fabricação e Ferramental

O globo teve sua superfície externa polida utilizando-se de uma lixa d'água, a fim de se removerem rebarbas e imprecisões da superfície, permitindo menor interferência no seu posicionamento. Além disso, utilizando um estilete realizou-se um corte circular de aproximadamente 135mm de diâmetro, cujo centro passa pelo eixo da abertura do globo, aumentando assim o acesso ao seu interior.

C. Custo e Fonte

Vendido em unidades a R\$ 2,00 cada, em lojas de lustres e acessórios de iluminação.

4.1.3.9. COMPONENTES DE FIXAÇÃO DAS PARTES (M)*A. Descrição*

Foram utilizados apenas parafusos M2x10 e M3x10, com arruelas e porcas de mesmo diâmetro. Entre os motores e os suportes de alumínio colocou-se uma tira de filme de borracha para evitar danos na carcaça dos motores durante a fixação dos mesmos.

B. Custo e Fonte

No total foram empregados 20 parafusos, e o mesmo número de porcas e arruelas. O custo foi de R\$ 2,00.



Figura 4.18. Parafusos, porcas, arruelas e espaçadores.

4.1.3.10. CIRCUITOS ELETRÔNICOS (R)

Os circuitos eletrônicos de cada bloco apresentado foram projetados separadamente conforme sua função.

4.1.3.11. ELEVADOR DE TENSÃO/AMOSTRADOR (R)

O circuito elevador de tensão transforma a tensão de aproximadamente 0,6V fornecida pela célula fotovoltaica em uma tensão de 5V para utilização na alimentação dos demais componentes eletrônicos.

O circuito elevador de tensão e amostrador é apresentado na figura 4.19.

O funcionamento do circuito elevador de tensão baseia-se no fato de que ao cortar o suprimento de corrente num indutor, há um pico de tensão sobre o mesmo.

O circuito elevador projetado consiste num chavador baseado em MOSFET comandado por um oscilador PWM (com duty cycle e freqüência constantes, ajustados por potenciômetros).

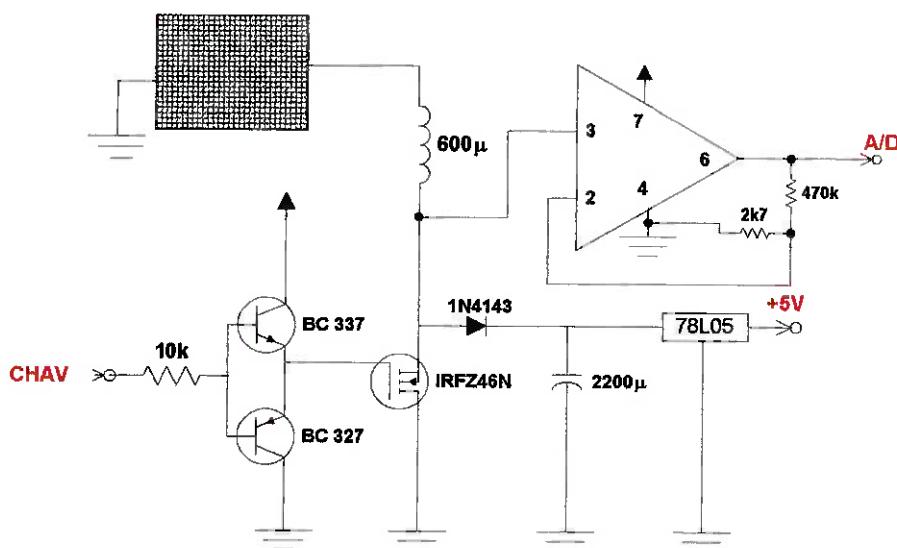


Figura 4.19. Circuito elevador de tensão e amostrador de sinal.

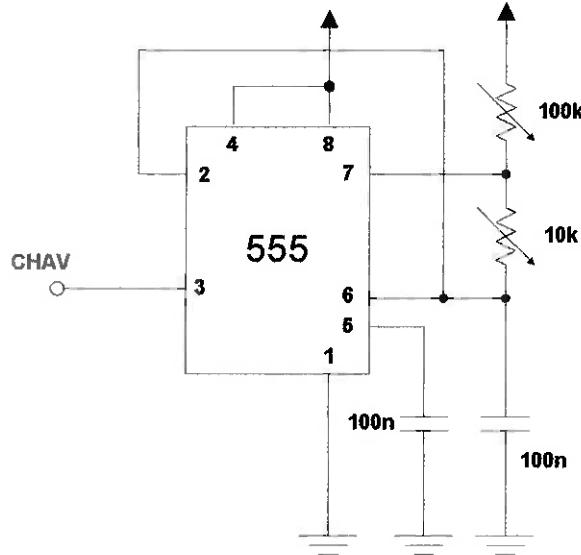


Figura 4.20. Circuito gerador do PWM para chaveamento do MOSFET

O oscilador projetado consiste em um oscilador astável baseado no circuito integrado 555.

No intervalo de tempo em que o MOSFET estiver saturado, haverá fluxo de corrente pelo indutor, armazendo energia no indutor. Ao se cortar o MOSFET, ocorrerá um pico de tensão sobre o mesmo, rompendo o limiar de condução do diodo e a energia armazenada no indutor é transferida para o capacitor de $2200\mu F$.

Como a tensão no capacitor é dada pela equação $V = \frac{Q}{C}$, ou seja, a tensão é diretamente proporcional à carga. Dessa forma, quanto maior a energia transferida para o capacitor, maior será a tensão sobre ele.

O circuito amostrador de sinal resume-se apenas num amplificador operacional com ganho de aproximadamente 50 vezes, que amostra a tensão sobre a resistência R_{DS} quando o MOSFET estiver saturado. Essa tensão amostrada é então, proporcional à corrente de curto-círcuito da célula fotovoltaica, uma vez que R_{DS} é constante. Esta

corrente de curto-circuito, por sua vez, é proporcional à potência fornecida pela célula, que é a grandeza que se deseja medir.

4.1.4. CHAVEADOR DE MOTORES (R)

O circuito amostrador tem as funções de servir como drivers de potência para os motores, além de direcionar e acionar ou não a rotação dos mesmos.

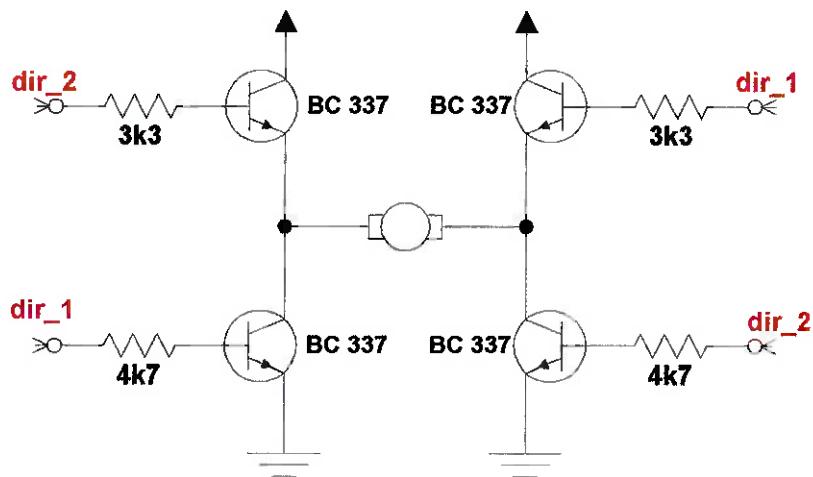


Figura 4.21. Chaveador dos motores.

O circuito chaveador dos motores consiste numa ponte H de transistores. Cada par de transistor disposto na diagonal da ponte é responsável pelo acionamento do motor numa direção de rotação.

Os sinais de acionamento (dir_1 e dir_2) são sinais de nível lógico TTL.

4.2. CONTROLE (M)

O princípio básico de funcionamento da esfera será o método da tentativa e erro: a esfera será movida em uma certa direção e se este movimento permitir um aumento na

potência captada, o próximo movimento será no mesmo sentido. Se não, move-se a esfera no sentido oposto, até se encontrar o ponto ótimo.

Para verificar se existe ou não aumento na potência, será feito uma amostragem na tensão do capacitor:

Como a energia acumulada no capacitor é dada por:

$$E = \frac{1}{2} C \cdot V^2,$$

onde C é a capacidade

V é a tensão nos terminais do capacitor.

E como o que nos interessa é a potência pela qual o capacitor é carregado, temos:

$$P = \frac{dE}{dt} = C \cdot V$$

Uma vez que apenas a informação de tensão do capacitor não é suficiente para saber se houve ou não aumento da potência, a solução encontrada é verificar a variação de tensão no capacitor num período de amostragem suficientemente pequeno para que a curva de carga possa ser linearizada. Assim, comparando-se duas amostras sucessivas, o que apresentar a maior variação de tensão será a que possui maior potência.

Uma vez com os dados de tensão obtidos, será utilizado um BASIC Stamp para a execução do algoritmo proposto (figura 4.22). Para a amostragem do sinal de tensão, um conversor A/D pode ser necessário.

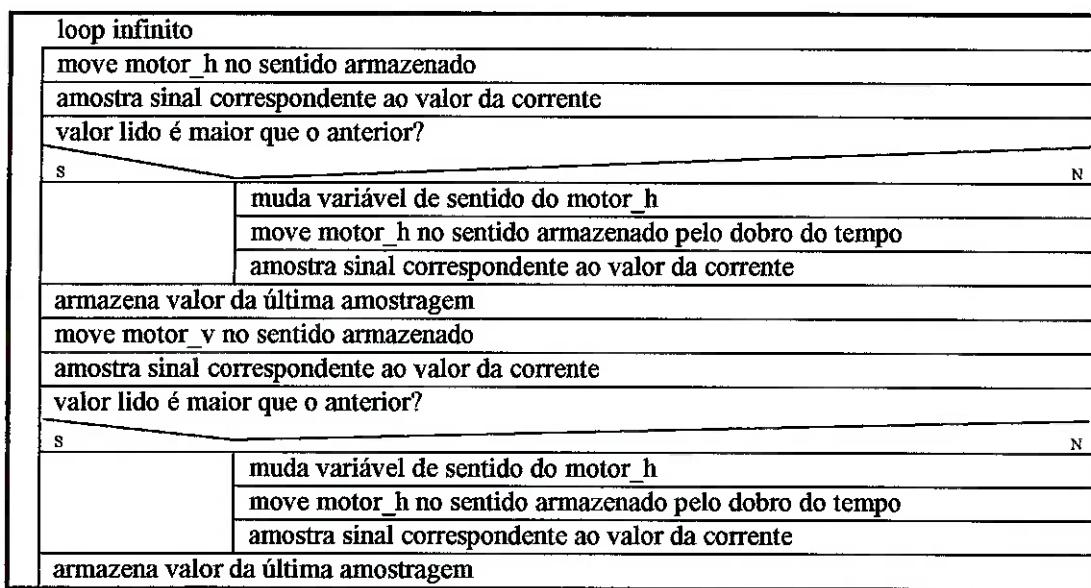


Figura 4.22. Algoritmo de controle

4.2.1. BASIC STAMP E A/D (R)

O Basic Stamp (figura 4.23) é responsável pela execução do algoritmo de controle e pela monitoração da tensão de amostragem, através do interfaceamento com um conversor A/D de 12 bits (figura 4.24).

O programa de controle da esfera (algoritmo da figura 4.22), é apresentado no Anexo I e o programa de interfaceamento com o A/D no Anexo II.

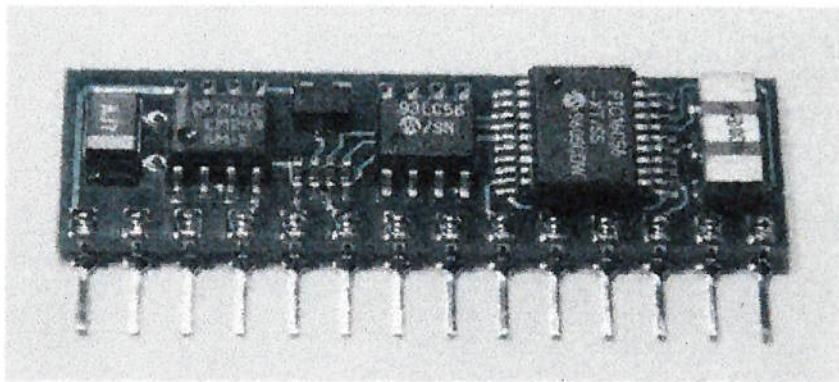


Figura 4.23. Basic Stamp.

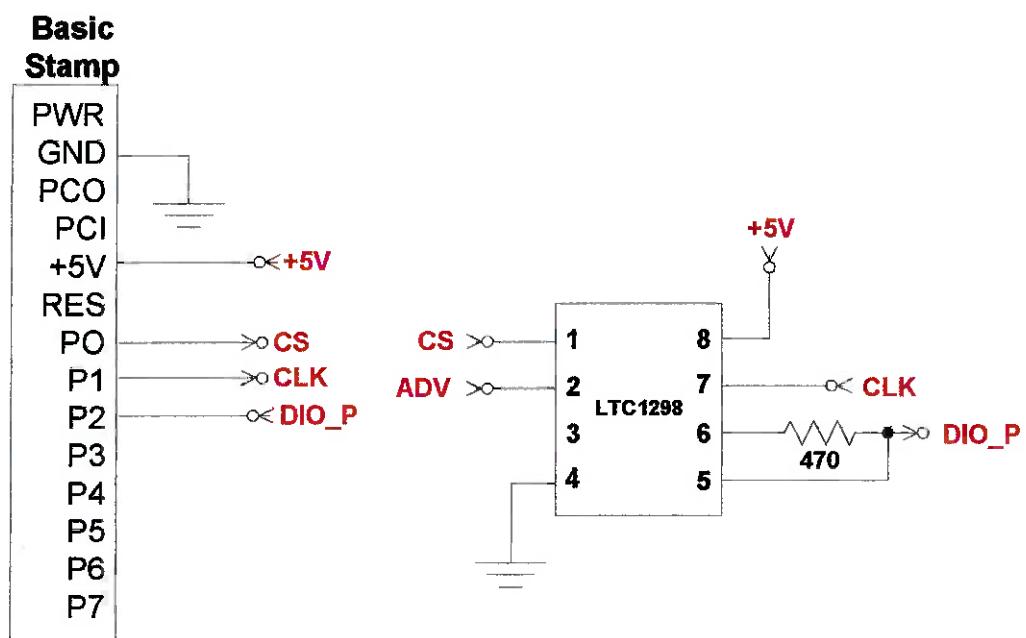


Figura 4.24. Interfaceamento entre Basic Stamp e A/D.

5. TESTES E RESULTADOS (A)

5.1. CÉLULA FOTOVOLTAICA (R)

Para que se pudesse saber o nível de potência com o qual se poderia contar para o funcionamento do dispositivo, fizeram-se alguns testes básicos de medição de corrente e tensão em curto-círcuito na célula.

Tabela 5.1. Resultados de ensaios da célula fotovoltaica.

Intensidade Luminosa (condição de medição)	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)
2 lâmpadas dícróicas (300 W cada)	1,4	0,6	0,84
luz solar fraca (dia nublado)	1,2	0,6	0,72
luz solar média (dia claro, meio da tarde)	1,9	0,6	1,14
luz solar forte (dia claro, ao meio-dia)	2,4	0,6	1,44

5.2. MOTORES E REDUTORES (M)

Foram verificados o torque e a velocidade proporcionados pelos conjuntos motores-redutores para verificar se estavam compatíveis com o que apresentava o catálogo. Assim, poder-se-ia confiar no funcionamento dos motores, que foram dimensionados baseado nos dados do catálogo.

Primeiramente, verificou-se a velocidade. Colocou-se um ponteiro acoplado no eixo do motor, alimentando-o com 4V e cronometrando o tempo decorrido durante uma revolução completa do ponteiro. Obteve-se um tempo de 86 segundos, correspondente a uma velocidade de 0,698 rpm.

O teste de torque foi realizado usando-se o pêndulo construído para o dispositivo com uma massa maior que a utilizada no dispositivo normalmente. Com um ovóide de 135 gramas na extremidade da haste do pêndulo, cujo comprimento é de 50mm, o motor

foi alimentado e levou 23 segundos para descrever um arco de 90° , partindo da posição vertical (6h, no relógio) até a horizontal (9h, no relógio). Isso significa que mesmo submetido a um torque quase duas vezes maior que o de trabalho o motor apresentou uma perda de velocidade inferior a 7%.

5.3. CHAVEAMENTO DE MOTORES (R)

Foi elaborado um programa-teste no Basic Stamp (Anexo III) para se testar o chaveamento de motores. Desta forma, além de se verificar o funcionamento do circuito chaveador, pôde-se verificar também se as saídas do Basic Stamp seriam capazes de chavear os transistores do circuito.

Os testes realizados mostraram que o circuito chaveador e o Basic Stamp poderiam controlar com sucesso os motores.

5.4. ELEVADOR DE TENSÃO/AMOSTRADOR (R)

Os testes realizados com o circuito apresentado nas figuras 4.16 e 4.17 não se mostram eficientes para alimentar os demais circuitos, uma vez que este circuito foi capaz apenas de fornecer 200mW de potência, ainda que a célula fotovoltaica fosse capaz de fornecer 1,44W.

Este resultado foi obtido devido às perdas que ocorreram no circuito:

- a resistência R_{DS} do MOSFET, por menor que seja (o utilizado foi de $0,20\Omega$), limita a corrente de saída da célula;
- o duty cycle do oscilador PWM pode ser otimizado apenas para um nível de intensidade luminosa, desta forma, uma variação na incidência de

luz na célula também afeta o rendimento do circuito elevador de tensão;

- o valor do indutor é otimizado em função da variação da corrente à qual é submetido. Como essa corrente é variável com a intensidade luminosa, o indutor deve também ser calculado em função da intensidade luminosa.

A potência conseguida seria suficiente para alimentar os outros circuitos. Porém, uma diminuição na intensidade luminosa, além de reduzir a potência disponível, abaixou também o rendimento de forma que a potência disponível na saída não fosse suficiente.

Como essas perdas são constantes e proporcionais apenas à corrente proveniente da célula, o aumento da tensão de entrada forneceria uma perda proporcionalmente menor, possibilitando o uso do circuito na alimentação dos demais componentes.

Para ter certeza de que o principal fator limitante de potência no circuito eram as perdas no MOSFET, foi testado o mesmo circuito utilizando-se duas células fotovoltaicas, obtendo-se cerca de 1W na saída.

Em função das limitações apresentadas, o circuito elevador de tensão foi eliminado, restando apenas o circuito amostrador (ver figura 5.1).

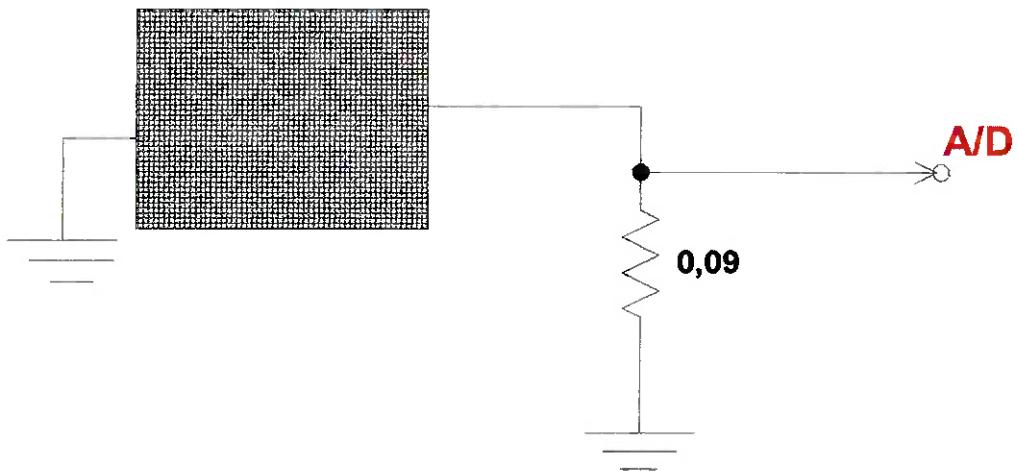


Figura 5.1. Novo circuito amostrador.

Quanto ao circuito amostrador, quando da sua integração com o Basic Stamp e o A/D, o amplificador operacional mostrou-se desnecessário, uma vez que a resolução do conversor A/D (1,22mV) é suficiente para se detectar as pequenas variações de corrente da célula sobre o resistor da figura 5.1.

5.5. BASIC STAMP E A/D (A)

O circuito da figura 4.21 foi testado com o programa do Anexo II para monitorar a tensão num divisor de tensão resistivo (figura 5.2).

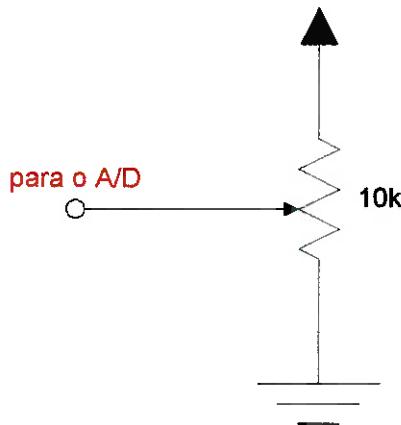


Figura 5.2. Divisor de tensão resistivo para teste do A/D.

O conjunto Basic Stamp e A/D mostrou-se muito eficaz na amostragem do sinal de tensão, apresentando grande estabilidade no valor lido.

5.6. CONJUNTO (A)

Depois de testados os diversos blocos e verificado seu funcionamento, procedeu-

se a montagem dos componentes conforme indicado pelas figuras 5.3, 5.4 e 5.5.

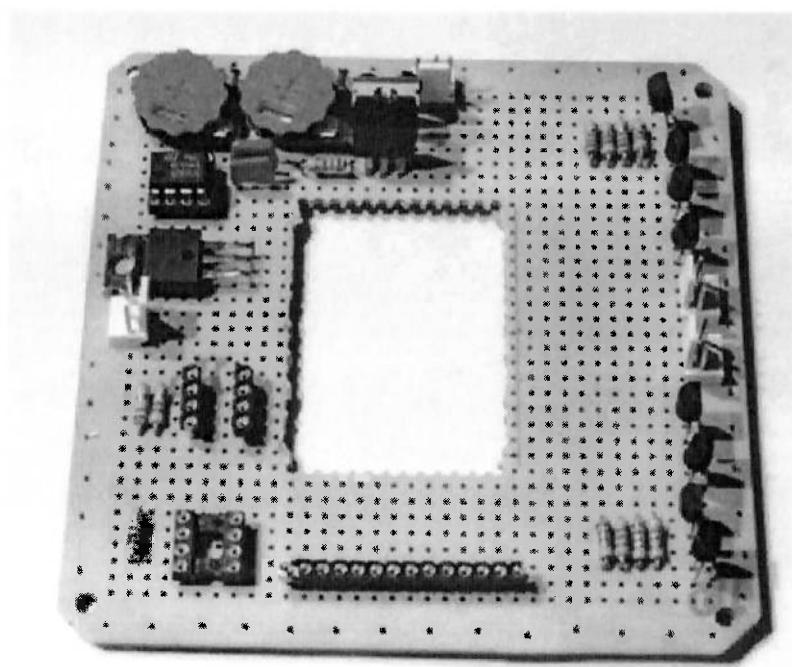


Figura 5.3. Placa dos circuitos eletrônicos.

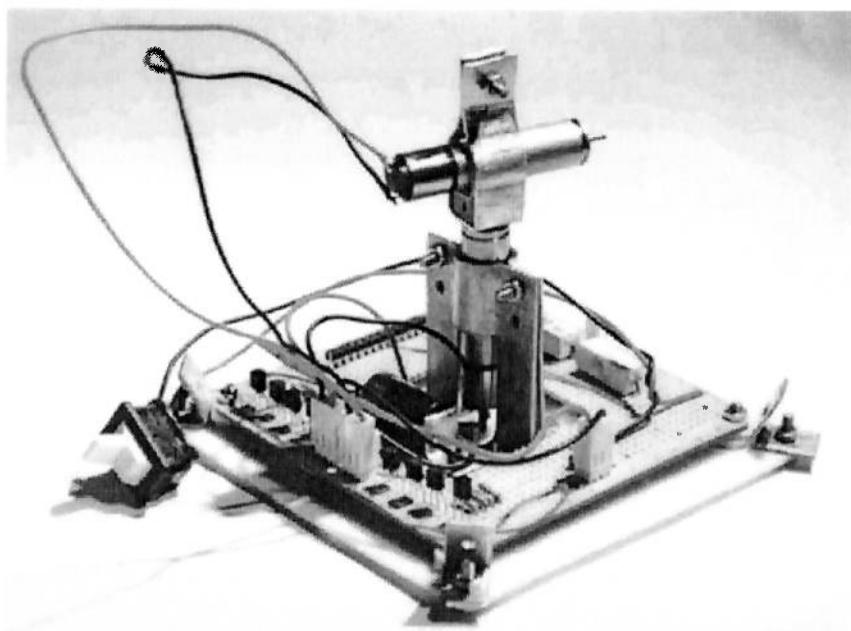


Figura 5.4. Montagem dos motores e da placa de circuitos eletrônicos no suporte.

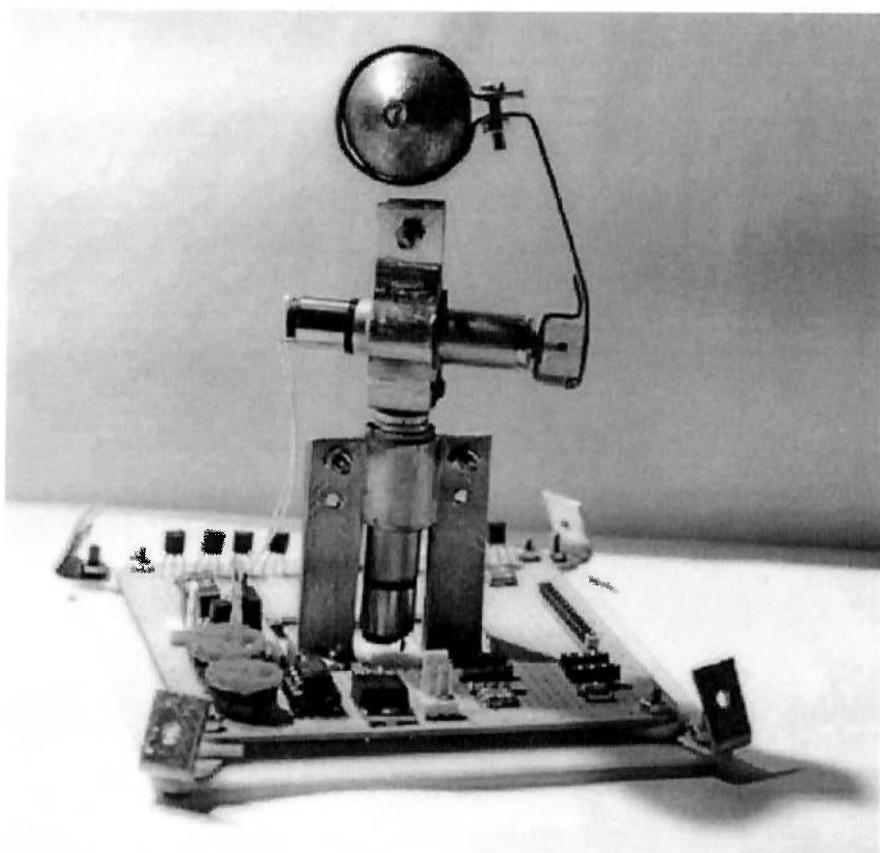


Figura 5.5. Conjunto completo.

O conjunto apresentou instabilidade quando a disposição do pêndulo proporcionava uma grande inclinação da célula, de forma que a esfera tombava. Isso ocorreu devido ao fato de o centro de massa do dispositivo estar muito alto. Para compensar este efeito, adicionou-se um contrapeso na parte inferior da esfera (figura 5.6).

Dessa maneira, minimizou-se a instabilidade acima descrita.

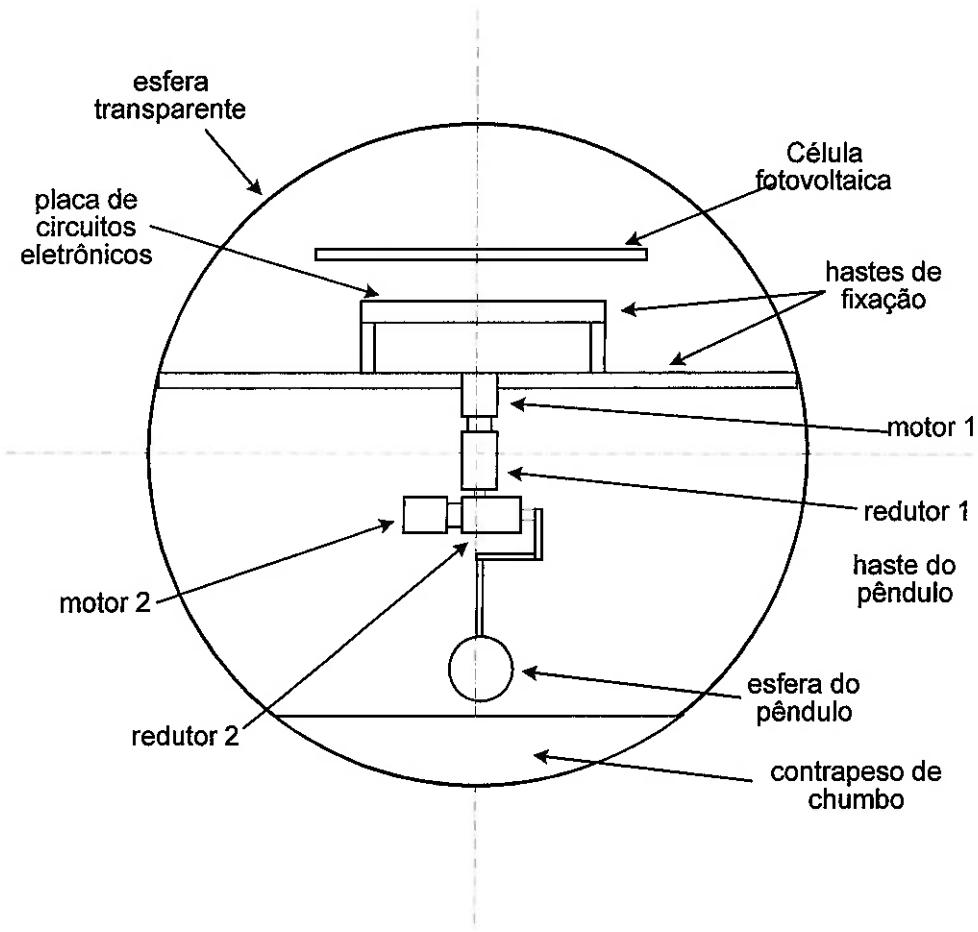


Figura 5.6. Conjunto completo com contrapeso.

6. CONCLUSÕES (A)

Baseado na performance da Esfera buscadora de sol, pôde-se concluir que o dispositivo é funcional apesar de necessitar algumas alterações importantes para melhoria de seu desempenho.

Primeiramente, o projeto inicial teve de ser alterado em uma de suas premissas básicas: a autonomia energética. Em função do uso de apenas uma célula fotovoltaica, aliado ao fato de serem grandes as perdas energéticas no circuito elevador de tensão, foi necessária a utilização de uma bateria para alimentação dos motores e dos circuitos elétricos. A solução para este problema seria a utilização de um número maior de células, conforme testado. Porém, esta solução requereria também uma esfera de diâmetro maior.

Além de uma esfera de maior diâmetro, o ideal seria que a mesma fosse transparente, permitindo que todo o conjunto ficasse disposto no seu interior. Desta forma a célula fotovoltaica, que é extremamente frágil, teria maior proteção.

Outro problema diagnosticado foi a pequena precisão nos movimentos em decorrência do uso de motores DC. Na Esfera Buscadora de Sol, o controle dos motores se dá em função do tempo de acionamento (tendo como hipótese que suas velocidades de rotação sejam sempre constantes) e não por controle do ângulo de rotação. Uma possível solução seria o emprego de motores de passo, que no entanto apresentariam necessidade de drivers mais complexos. Outra solução seria manter os motores DC mas utilizar um controle realimentado através de encoders instalados nos eixos de saída dos redutores, o que, no entanto, requereria o uso de um microcomputador (ou microcomputador) mais aprimorado. O Basic Stamp foi utilizado quase na sua

capacidade máxima pois oferece um número reduzido de variáveis e não permite o uso de memória externa.

O protótipo construído apresentou custo total de R\$ 400,00, sendo que os componentes que mais contribuem para o aumento do custo são os motores, que custam R\$ 134,00 cada e o Basic Stamp, que custa R\$ 78,90.

Em resumo, a Esfera Buscadora de Sol atingiu os objetivos propostos quase na sua plenitude, deixando, no entanto, o caminho aberto para pesquisas futuras.

7. ANEXOS (A)

7.1. ANEXO II – PROGRAMA DE CONTROLE DA ESFERA (A)

```
'PROGRAMA DE CONTROLE DA BOLA BUSCADORA DE SOL
'NOVO ALGORITMO DE CONTROLE
'VERSÃO 2.0
'BASIC STAMP I

'AUTORES: REINALDO FUGIO HINO & MARCIO GIACCHETTA PAULILO

'DECLARACAO DE VARIAVEIS

symbol ultimo = w2           'valor lido na amostragem anterior
symbol lido = w1              'valor lido na amostragem atual
symbol dir_v = b6             'direcao do motor vertical
symbol dir_h = b7             'direcao do motor horizontal
symbol motor_v1 = 3            'acionamento do motor vertical
symbol motor_v2 = 4            'acionamento do motor vertical
symbol motor_h1 = 5            'acionamento do motor horizontal
symbol motor_h2 = 6            'acionamento do motor horizontal
symbol cs = 0                 'chip select do AD
symbol clk = 1                'clock do AD
symbol dio_n = 2               'saida serial do AD
symbol dio_p = pin2            'entrada de setup do AD
symbol adbits = bl             'bit de leitura do AD
symbol ad = w1                 'valor lido no AD
symbol sgldif = 1              'single-endend ou two channel mode
symbol msbf = 1                'média de 6 leituras no AD
symbol media = w5              'contador
symbol conta = b9              'tempo de rotação do motor
symbol time=1500              'pausa entre amostragens

'INICIALIZACAO DE VARIAVEIS

low motor_v1
low motor_v2
low motor_h1
low motor_h2

let dir_v = 1                  'sentido positivo
let dir_h = 1                  'sentido positivo
gosub AMOSTRA
ultimo = lido
ultimo = lido                 'desvia para descarregar capacitor
ultimo = lido                 'iguala parametros de comparacao

'CICLO PRINCIPAL

PRINCIPAL:
    gosub MOVE_MH               'move motor horizontal
    gosub AMOSTRA
    if lido<ultimo then mudal   'amostra tensão
        goto fim_if1
    mudal:
        dir_h = -dir_h           'se lido for menor, muda de sentido
        gosub MOVE_MH             'muda direção do motor horizontal
        gosub MOVE_MH             'retorna a rotação errada 2 vezes
        gosub MOVE_MH
```

```

fim_if1:
gosub AMOSTRA           'amostra tensão
ultimo=lido              'armazena ultimo valor lido
gosub MOVE_MV             'move motor vertical
gosub AMOSTRA             'amostra tensão
if lido<ultimo then muda2
    goto fim_if2
muda2:
    dir_v = -dir_v      'muda direção do motor horizontal
    gosub MOVE_MV         'retorna a rotação errada 2 vezes
    gosub MOVE_MV
fim_if2:
gosub AMOSTRA             'amostra tensão
ultimo=lido              'armazena ultimo valor lido
goto PRINCIPAL

AMOSTRA:
high cs                  'desativa A/D

media=0
for conta=0 to 5
    goto CONVERTE
    LEITURA_AD:
    media=media+lido
    pause pausa          'pausa entre leituras de tensão
next
media=media/6
lido=media
'calcula média
return

CONVERTE:
low clk                  'abaixa clock - ativo na subida

high dio_n
low cs                   'ativa A/D
pulsout clk,5            'start bit
dio_p=sgldif             'setup bit
pulsout clk,5            'clock - envia bit em dio_p
let dio_p=0               'setup bit - canal de entrada
pulsout clk,5            'clock - envia bit em dio_p
dio_p=msbf                'setup bit
pulsout clk,5            'clock
input dio_n               'bit de dados do A/D
ad=0                      'zera valor de leitura
for adbits=1 to 13
    let ad=ad*2+dio_p
    pulsout clk,5          'amostragem
next
high cs
goto LEITURA_AD

MOVE_MV:
    if dir_v = 1 then mlvl
        high motor_v2
        pause time
        low motor_v2
        goto fim_move_mv
mlvl:
        high motor_v1
        pause time
        low motor_v1
fim_move_mv:
    return

```

```
MOVE_MH:  
    if dir_h = 1 then m1h1      'verifica a direcao do motor vertical  
        high motor_h2          'condicao falsa: direcao contraria  
        pause time              'motor atua por time ms  
        low motor_h2            'vai para o fim do if  
    m1h1:  
        high motor_h1          'condicao verdadeira: mesma direcao  
        pause time              'motor atua por time ms  
        low motor_h1            'fim do if  
    fim_move_mh:  
        return
```

7.2. ANEXO II – PROGRAMA DE TESTE DO A/D (A)

```
'Programa de amostragem utilizando A/D de 12 bits serial'
'Extraido de AppKit: Using the LTC1998 12-bit Analog-to-Digital
Converter
'Scott Edwards Electronics

symbol cs = 0          'declaracao de constantes e variaveis
symbol clk = 1
symbol dio_n = 2
symbol dio_p = pin2
symbol adbites = b1
symbol ad = w1

symbol sgldif = 1
symbol msbf = 1
symbol cu = 10
symbol cont = b5
symbol soma = w4

cont = 0          'inicializacao de variaveis
soma = 0

high cs          'inicio do programa
again:           'loop principal
    gosub convert  'chama rotina de conversão
    debug ad,cr   'mostra valor lido
    pause 500     'pause de 0,5 entre amostragens
    goto again

convert:
    low clk
    high dio_n
    low cs
    pulsout clk,cu
    let dio_p = sgldif
    pulsout clk,cu
    let dio_p=0
    pulsout clk,cu
    let dio_p = msbf
    pulsout clk,cu
    input dio_n
    let ad = 0
    for adbites = 1 to 13
        let ad = ad*2+dio_p
        pulsout clk,cu
    next
    high cs
return
```

7.3. ANEXO III – PROGRAMA TESTE DO CHAVEADOR DE MOTORES (A)

```
'Programa de teste de motores
'Reinaldo Fugio Hino e Marcio Giachetta Paulilo

low 5                      'desliga a ponte H
low 4

inicio:
b0 = 0                      'sentido 0 de rotação
gosub run_motor              'executa rotina para acionar motor
b0 = 1                      'sentido 1 de rotação
gosub run_motor              'executa rotina para acionar motor
goto inicio                  'reinicia loop

run_motor:
pause 2000                   'espera 2s
if b0 = 0 then zero          'sentido 0 de rotação
if b0 = 1 then um             'sentido 1 de rotação
zero:
    low 5                     'acionamento da ponte H
    high 4
return
um:
    low 4                     'acionamento da ponte H
    high 5
return
```

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS (A)

BEER, F. P.; JOHNSTON Jr., E.R. **Mecânica Vetorial para Engenheiros.** 5a.ed. São Paulo, McGraw-Hill Ltda., 1991.

GIACAGLIA, G. E. O. **Mecânica Analítica.** Rio de Janeiro, Almeida Neves-Editora Ltda., 1978.

ELECTRONICS NOW. Jan. 1997.

BE-A-BÁ DA ELETRÔNICA. São Paulo, no. 7, Jun. 83.

MALVINO, A. P. **Eletrônica.** Vols. 1 e 2. São Paulo, McGraw-Hill Ltda., 1986.

COLEÇÃO SABER ELETRÔNICA. **Circuitos & Informações.** V.5. São Paulo, Editora Saber, 1988.

LINEAR DATABOOK. National Semiconductor Co. Santa Clara, 1980.