

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ERILSON DE SOUSA BARBOSA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE BAIXO CUSTO PARA
RASTREAMENTO DE CONCENTRADORES CILÍNDRICO-PARABÓLICOS

Fortaleza

2009

ERILSON DE SOUSA BARBOSA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE BAIXO CUSTO PARA
RASTREAMENTO DE CONCENTRADORES CILÍNDRICO-PARABÓLICOS

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos, Sistemas e Equipamentos para Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Carlos André Dias Bezerra.

FORTALEZA
2009

ERILSON DE SOUSA BARBOSA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE BAIXO CUSTO PARA
RASTREAMENTO DE CONCENTRADORES CILÍNDRICO-PARABÓLICOS

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Sistemas e Equipamentos para Energias Renováveis.

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos André Dias Bezerra (Orientador).
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof^a. Dra. Maria Eugênia Vieira da Silva
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

FORTALEZA

2009

AGRADECIMENTOS

A Deus por sua provisão em todos os momentos.

Aos meus pais Fátima e Edílson que sempre me incentivaram nos estudos e nada me deixaram faltar.

Aos meus irmãos Elcio e Erica.

À minha esposa Itna pelo carinho e compreensão.

À FUNCAP e à CAPES pela concessão de bolsa de mestrado em momentos diferentes.

Ao professor Carlos André pela orientação e à professora Maria Eugênia por sua atenção e dedicação.

Ao professor Klemens Schwarzer pela colaboração.

Aos colegas do Laboratório de Energia Solar e Gás Natural - LESGN e do Laboratório de Protótipos Educacionais e Mecatrônica - LPEM da Universidade Federal do Ceará.

RESUMO

Um concentrador solar parabólico é um tipo de refletor usado para aumentar a intensidade da radiação em uma superfície. Para que ocorra a reflexão adequada da radiação solar, o refletor parabólico deve constantemente rastrear a posição do sol de tal forma que os raios solares sejam refletidos em um tubo que se encontra na posição de foco da parábola. A proposta deste trabalho é desenvolver um sistema eletrônico de controle de baixo custo para concentradores parabólicos aplicados à refrigeração e proporcionar autonomia ao equipamento. Também é apresentado um sistema mecânico para acionamento do rastreador. Por ser parte de um sistema de refrigeração, o tubo colocado no foco da parábola deve sofrer processos de aquecimento e resfriamento. O sistema eletrônico é constituído de uma placa de controle com um microcontrolador em seu núcleo, sensores de luminosidade e sensores limitadores de movimento e um motor de passo responsável pelo acionamento da estrutura móvel do concentrador solar. Através do sistema desenvolvido, pode-se fazer com que sejam atingidas temperaturas em torno de 180°C na superfície externa do tubo coletor colocado na posição de foco da parábola.

Palavras-chave: *Rastreador Solar, Concentrador Parabólico, Sensores*

ABSTRACT

A parabolic solar concentrator is a type of reflector utilized to increase the radiation intensity on a surface. In order to have a proper reflection of solar radiation, the parabolic reflector should constantly track the sun's position so that solar rays are converged to a tube that is at the focus position of the parabola. The purpose of this study is to develop an electronic control system for low-cost parabolic trough concentrators applied to refrigeration process, and to provide autonomy to the equipment. It also is presented a mechanical system to guide the tracker. As part of a refrigeration device, the tube placed at the parabola's focus should experiment heating and cooling processes. The electronic system consists of a control plate with a microprocessor at its core, motion limiting and light sensors, and a step motor responsible for move the solar concentrator structure. Through this developed system, temperatures close to 180°C can be reached on external surface of the heat adsorption tube, which is placed on the position of parabola's focus.

Keywords: *Solar Tracker, Parabolic Concentrator, Sensors*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – O padrão espectral da radiação adotado por WRC (adaptado de Duffie e Beckman, 1980)	17
Figura 2.2 – Ângulos necessários para determinação da posição solar através do método de rastreamento passivo sobre dois eixos	18
Figura 2.3 – Conjunto concentrador parabólico e máquina de vapor construída por Ericsson em 1883 (MEINEL e MEINEL, 1976)	21
Figura 2.4 – Sistemas de coletores solares construído por Shuman e Boys em Meadi, Egito (MEINEL e MEINEL, 1976)	21
Figura 2.5 – Posições críticas do deslocamento da superfície parabólica	22
Figura 2.6 – Esquema dos enrolamentos dos dois tipos de motores, bipolar (à esquerda) e unipolar (à direita). (ATMEL, 2006).....	25
Figura 2.7 – Ciclo básico de refrigeração por adsorção	27
Figura 3.1 – Placa de simulação e gravação de microcontroladores AT89S52	29
Figura 3.2 – Gravador de Microcontroladores AVR's ATmega8 e ATmega16.....	29
Figura 3.3 – Superfície fotossensível de um LDR (adaptado de Dally <i>et al</i> , 1993)	31
Figura 3.4 – Composição de um LDR (adaptado de Dally <i>et al</i> , 1993)	32
Figura 3.5 – Esquema do circuito elétrico para leitura de apenas um sensor LDR	32
Figura 3.6 – Disposição dos LDR's	33
Figura 3.7 – Esquema de controle do motor de passo	35
Figura 3.8 – Pinagem do microcontrolador Atmega8	36
Figura 3.9 – Diagrama de blocos do sistema de controle com o microcontrolador Atmega8	37
Figura 3.10 – Esquema de simulação da placa com o microcontrolador Atmega8	38
Figura 3.11 – Placa de controle montada	38
Figura 3.12 – Coleta de dados para verificação do comportamento do LDR em função da radiação solar	40
Figura 3.13 – Gráfico do comportamento do LDR em relação à radiação solar em dia de céu claro	41

Figura 3.14 – Gráfico do comportamento do LDR em relação à radiação solar em dia de céu claro	43
Figura 3.15 – Coleta de dados para determinação da diferença dos sinais fornecidos pelo sensor em que o concentrador deve permanecer parado	46
Figura 3.16 – Exibição dos valores lidos através de um <i>display</i> LCD	46
Figura 3.17 – Gráfico dos valores inteiros adimensionais correspondentes as tensões elétricas fornecidas pelos sensores de luminosidade em função do tempo	47
Figura 3.18 – Módulo de sensores de luminosidade	49
Figura 3.19 – Sensores limitadores de movimento	49
Figura 3.20 – Fluxograma da rotina do código de programação do microcontrolador responsável apenas por realizar o rastreamento	51
Figura 3.21 – Fluxograma da rotina das interrupções externas do sistema provocadas pelos sensores FDC1 e FDC2	52
Figura 3.22 – Fluxograma da rotina de posicionamento do concentrador durante a noite	53
Figura 4.1 – Um típico elemento refletivo em um concentrador parabólico. (Fonte: adaptado de ANDERSON, 1983)	54
Figura 4.2 – Imagem formada por um concentrador parabólico. (Fonte: adaptado de ANDERSON, 1983).	55
Figura 4.3 – Dimensões reais do concentrador cilíndrico-parabólico necessárias para determinação da razão de concentração	56
Figura 4.4 – Concentrador Parabólico adequado para receber o sistema de rastreamento	57
Figura 4.5 – Fixação do módulo de sensores de luminosidade	57
Figura 4.6 – Sensores limitadores de movimento fixados na estrutura do concentrador	58
Figura 4.7 – Esquema do mecanismo de acionamento	59
Figura 4.8 – Mecanismo de acionamento com as duas molas de tração, a polia fixa e uma corrente	59
Figura 4.9 – Motor de passo bipolar acoplado a um conjunto de redução para aumento do torque	60
Figura 5.1 – Disposição dos termopares axialmente no tubo coletor	63
Figura 5.2 – Disposição dos termopares radialmente no tubo coletor	64

Figura 5.3 – Termopares fixados na superfície externa do tubo coletor	64
Figura 5.4 – Curva de velocidade do vento, de distribuição de temperatura no tubo adsorvedor e de radiação com rastreamento ativo em dia de céu com muitas nuvens	66
Figura 5.5 – Velocidade do vento, radiação solar e distribuição temperatura em função do tempo com parte do dia com céu claro	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Determinação do número n do dia para cálculo da declinação	19
Tabela 3.1 – Comparação do Custo das placas com diferentes microcontroladores em seu núcleo	39

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 – Cálculo da declinação δ	19
Equação 3.1 – Determinação da tensão elétrica de saída do módulo de sensores LDR's	32
Equação 3.2 – Determinação da resolução do sistema de controle	44
Equação 4.1 – Determinação da distância L do elemento refletivo ao ponto focal ..	54
Equação 4.2 – Cálculo da largura da imagem w_i em função da coordenada y	55
Equação 4.3 – Largura da imagem produzida por um elemento refletivo localizado na superfície parabólica	55
Equação 4.4 – Cálculo da razão de concentração para coletor de tubo circular	55

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM – *American Society of Testing and Materials*

WRC - *World Radiation Center*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

ALU – Unidade Lógico-Aritmética

RISC – (*Reduced Instruction Set Computer*) ou computador com um conjunto reduzido de instruções.

CISC - (*Complex Instruction Set Computer*) ou computador com conjunto de instruções complexas

CMOS - *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*

I/O – *Input/Output*

ADC – *Analog Digital-to-Converter*

EEPROM - *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*

UART - *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*

PWM – *Pulse Width Modulation*

CI – Circuito integrado

SDCC – *Small Device C Compiler*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivos Específicos	14
1.1.2	Objetivo Geral	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	A Radiação Solar	16
2.2	O Rastreamento da Radiação Solar	17
2.3	Concentradores Parabólicos	20
2.4	Princípio de Funcionamento dos Concentradores Parabólicos	22
2.5	Microcontroladores	23
2.5.1	Microcontroladores AVR ATmega8	23
2.6	Motor de Passo	25
2.7	Ciclo de Refrigeração por Adsorção	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	Visão Geral	28
3.2	Ferramentas de <i>Hardware</i> e <i>Software</i> Utilizadas	28
3.3	Módulo de Sensores de Luminosidade	30
3.4	A Placa de Controle	33
3.4.1	A Placa de Controle com o Microcontrolador ATmega8 em seu Núcleo	35
3.5	Análise dos Sensores de Luminosidade	39
3.5.1	Experimento para Análise da Resposta do LDR às Variações da Intensidade da Radiação Solar	39
3.5.2	Compensação dos Sinais dos Sensores de Luminosidade	44
3.6	Funcionamento do Concentrador Cilíndrico-Parabólico	48
4.	APARATO EXPERIMENTAL	54
4.1	Montagem do Concentrador Cilíndrico-Parabólico	56
4.2	Código de Programação do Microcontrolador ATmega8 em Linguagem Basic	60
5.	RESULTADOS	63
5.1	Medição de Temperatura com Rastreamento da Radiação	65
6.	CONCLUSÃO	70

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
APÊNDICES	74
ANEXOS	81

1 INTRODUÇÃO

A utilização de concentradores parabólicos tem sido restrita às aplicações que necessitam de fluidos em temperaturas mais elevadas do que podem ser obtidas através de coletores planos. Tal restrição é devida ao custo adicional do equipamento ocasionado pela necessidade de um sistema de rastreamento solar para posicionamento contínuo do concentrador em relação aos raios solares.

O alto custo de aquisição de grandes concentradores e a sua implantação são os grandes entraves para a utilização dessa tecnologia em países em desenvolvimento que ainda não despertaram para a necessidade de ir, progressivamente, reduzindo o consumo de combustíveis convencionais. A inviabilidade da utilização de grandes e caros equipamentos para serem utilizados em relativamente pequenos sistemas de refrigeração, além da falta do produto no mercado nacional motivou o desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para concentradores cilíndrico-parabólicos para esta finalidade.

Os sistemas de rastreamento solar dos concentradores parabólicos convencionais são baseados em circuitos hidráulicos ou elétricos de alta potência em virtude do grande comprimento, da grande área de abertura da superfície refletora e dos esforços sobre a estrutura causados pela força do vento. A redução do tamanho da superfície refletora em virtude da finalidade do equipamento e a conseqüente redução do peso possibilitam a utilização de um atuador de baixa potência associado com componentes mecânicos móveis menos massivos.

1.1 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é a validação experimental de um sistema de controle eletrônico para rastreamento solar em concentradores parabólicos de baixo custo aplicados à refrigeração pelo método de adsorção. Para isto, utilizou-se um concentrador solar parabólico operado manualmente instalado no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural – LESGN.

1.1.1 Objetivos Específicos

- a) Projeto, simulação e fabricação da placa eletrônica de comando;
- b) projeto e fabricação do módulo de sensores de luminosidade;
- c) fixação de sensores necessários à automação do concentrador;
- d) realização de medições experimentais;
- e) análise de resultados.

1.1.2 Objetivo Geral

Auxiliar no desenvolvimento de novos equipamentos e sistemas para expansão do aproveitamento da energia solar a nível regional.

Este trabalho está dividido em seis capítulos que estão dispostos na forma a seguir.

No Capítulo de revisão bibliográfica é feito um breve histórico dos concentradores parabólicos até a sua utilização nos dias atuais. Informações sobre equipamento e dispositivos mecânicos e eletrônicos utilizados neste trabalho também são apresentados. Aborda também os conhecimentos necessários para desenvolvimento da dissertação e obtenção dos resultados. Neste momento, aspectos referentes à mecânica do deslocamento relativo do sol, aquisição de sinais, microcontroladores e atuadores são apresentados.

No Capítulo de materiais e métodos são apresentadas as ferramentas (*hardware* e *software*) necessárias para projeto, simulação e fabricação dos componentes que compõem o sistema de controle eletrônico. Em seguida, o método para se realizar o seguimento da radiação solar direta é apresentado graficamente através de diagramas de blocos e fluxograma para explicação da execução do código de programa embarcado no microcontrolador.

O Capítulo do aparato experimental apresenta como o experimento foi montado juntamente com os instrumentos de aquisição de dados para se fazer a coleta de informações e análise de resultados.

No Capítulo de resultados têm-se as curvas de temperaturas obtidas através de medição na parede externa do tubo coletor de aço inox fixado na posição de foco da parábola. São mostrados gráficos com curvas de temperatura coletados em dia de céu claro e com nuvens para verificar o funcionamento do concentrador cilíndrico-parabólico.

No último Capítulo, conclui-se que foi possível atingir os resultados esperados com os materiais e métodos propostos para o desenvolvimento do sistema de rastreamento do concentrador cilíndrico-parabólico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A Radiação Solar

A radiação solar global divide-se em dois tipos quanto à forma com que atinge a superfície terrestre. A radiação solar direta e a radiação solar difusa ou dispersa. Vários autores, dentre os quais, Fraidenraich e Lyra (1995), definem a radiação solar direta como a fração da radiação solar que atinge a superfície terrestre sem sofrer desvios. Por outro lado, a radiação difusa é definida como parte da radiação global que atinge a superfície terrestre em diversas direções, devido às modificações introduzidas pela atmosfera e à presença de nuvens.

Em relação à temperatura do sol, de acordo com Duffie e Beckman (1980), a esfera solar apresenta as seguintes temperaturas e densidade: o sol tem uma temperatura efetiva de corpo negro de 5777 K. A temperatura na região central do seu interior é estimada em torno de 8×10^6 a 40×10^6 K.

A quantidade de energia que incide sobre uma superfície unitária, normal aos raios solares, por unidade de tempo, no topo da atmosfera é denominada de constante solar. Segundo Fraidenraich e Lyra (1995), a constante solar e o espectro solar extraterrestre são definidos para o semi-eixo maior da órbita terrestre ou uma unidade astronômica ($149,6 \times 10^6 \text{ km}$). A variação da distância Terra-Sol na órbita elíptica descrita pela Terra resulta em uma variação da constante solar.

O valor para a constante solar de 1353 W/m^2 com erro de $\pm 1,5\%$ é tido como padrão pela NASA e ASTM. Este valor foi medido em grandes altitudes através de balões, aviões e satélites por volta da década de 1970. Porém, de acordo com Rabl (1985), medições mais recentes têm apontado o valor de 1373 W/m^2 para a constante solar.

Thekaekara (1977 apud FRAIDENRAICH, e LYRA, 1995) fornece a Tabela A.1, para variações da constante solar em função da variação da distância Terra-Sol e a hora da passagem do Sol pelo plano Meridional.

O espectro solar padronizado pelo WRC (*World Radiation Center*) para comprimentos de onda de até $2\mu\text{m}$ é mostrado na Figura 2.1. Valores da irradiância solar espectral para outros comprimentos de onda e de forma detalhada estão disponíveis. Iqbal (1983) fornece várias tabelas com estas informações.

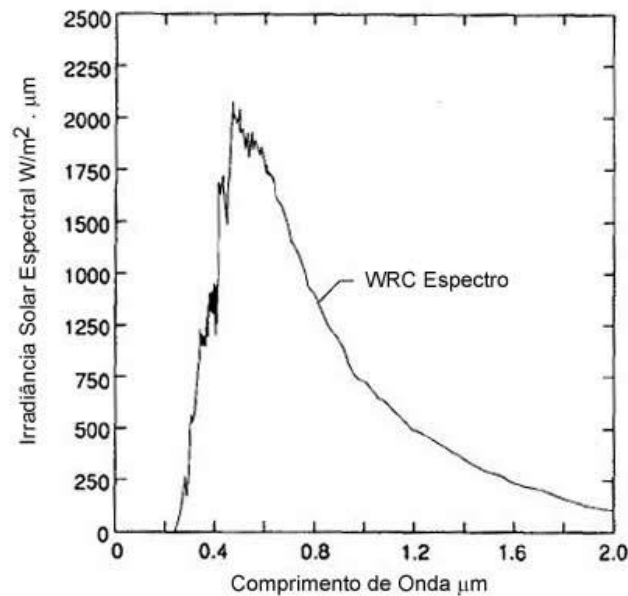


Figura 2.1 – O padrão espectral da radiação adotado por WRC (adaptado de Duffie e Beckman, 1980).

2.2 O Rastreamento da Radiação Solar

Normalmente, os sistemas de rastreamento da radiação solar direta são baseados em dois métodos. O primeiro, conhecido por rastreamento passivo da radiação, baseia-se em equações de cálculos de ângulos para determinação da posição do sol. O segundo método, conhecido por rastreamento ativo da radiação solar, baseia-se em informações coletadas através de sensores para posicionar adequadamente a superfície refletora em relação aos raios solares.

Nos casos em que o método passivo é utilizado para concentradores parabólicos, apenas o ângulo horário (ω), que representa o deslocamento relativo do sol na direção Leste-Oeste é utilizado. A adoção deste método para

posicionamento adequado de equipamentos como o Disco de Stirling¹ ou aumento da eficiência de módulos fotovoltaicos, que necessitam de rastreamento em dois eixos, representa um acréscimo considerável de ângulos a serem determinados e conseqüente aumento do número de equações. A Figura 2.2 exibe os ângulos necessários para o posicionamento de um plano para captação dos raios solares perpendicularmente.

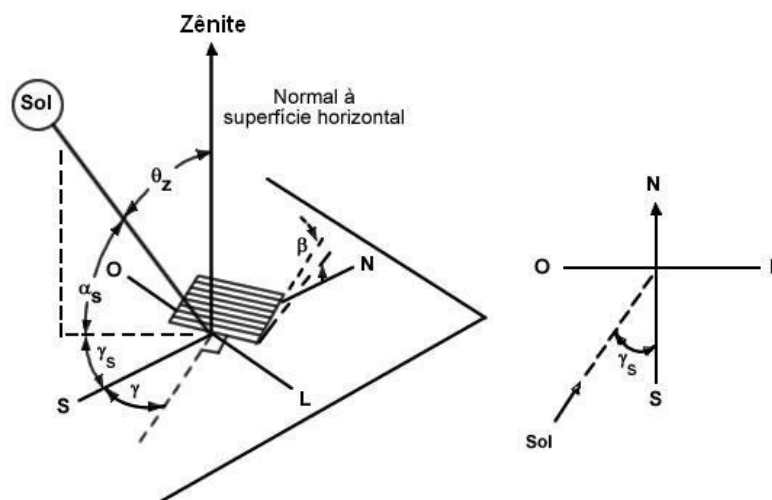


Figura 2.2 – Ângulos necessários para determinação da posição solar através do método de rastreamento passivo sobre dois eixos (adaptado de Duffie e Beckman, 1980).

Duffie e Beckman (1980) apresentam uma série de equações para cálculos de ângulos e determinação da direção da radiação solar direta.

Neste trabalho, em virtude da necessidade de deslocamento angular em apenas uma direção, foi necessário apenas o cálculo da declinação solar. A declinação solar é o ângulo formado entre a linha imaginária que une o centro da Terra ao centro do Sol e o plano do Equador. Este ângulo varia de $-23,45^\circ$ à $+23,45^\circ$, considerando a inclinação para o Norte positiva.

A declinação δ pode ser obtida através da Equação 1 de Cooper (1969):

¹ Disco de Stirling é um equipamento para captação da radiação solar direta cuja forma da superfície refletora é uma calota parabólica. É dado este nome em virtude da colocação de um motor de Stirling na posição de foco da calota. Este tipo de motor é capaz de transformar energia térmica em energia elétrica.

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.1)$$

Em que δ é a declinação e n é dado pela Tabela 1.

Tabela 2.1 – Determinação de n para cálculo da declinação

Para o dia médio do mês				
Mês	n para o dia i do mês	Data	Dia do ano (n)	Declinação (δ)
Janeiro	i	17	17	-20,9
Fevereiro	$31 + i$	16	47	-13,0
Março	$59 + i$	16	75	-2,4
Abril	$90 + i$	15	105	9,4
Maio	$120 + i$	15	135	18,8
Junho	$151 + i$	11	162	23,1
Julho	$181 + i$	17	198	21,2
Agosto	$212 + i$	16	228	13,5
Setembro	$243 + i$	15	258	2,2
Outubro	$273 + i$	15	288	-9,6
Novembro	$304 + i$	14	318	-18,9
Dezembro	$334 + i$	10	344	-23,0

Fonte: adaptado de Duffie e Beckman (1980).

Como este método não considera a influência do clima local onde o concentrador for instalado, a sua adoção pode resultar em perda parcial do foco da radiação solar no tubo. Outra desvantagem deste método é que o controlador deve ter um controle rígido de tempo já que os ângulos são específicos para cada hora e dia do ano. Este aspecto apresenta-se como um fator determinante na hora de selecionar o controlador para sistemas concentradores que utilizam este método, o que pode mostrar-se inviável economicamente para pequenos sistemas.

2.3 Concentradores Parabólicos

Concentradores parabólicos já são empregados há alguns anos na geração de energia elétrica em usinas termosolares e geração de vapor para a indústria. Mais recentemente, concentradores parabólicos têm sido usados para o aquecimento de fluidos em sistemas de refrigeração realizando o aquecimento no processo por radiação solar.

Para se obter fluidos com temperaturas mais elevadas, geralmente são utilizados tubos absorvedores de metais inseridos em um tubo de vidro concêntrico para redução da perda de calor por convecção. Como o tubo do concentrador utilizado neste trabalho é o próprio adsorvedor e por esta razão processos de aquecimento e resfriamento são necessários, logo, não há nenhum tipo de revestimento sobre o tubo de metal inoxidável além da tinta seletiva de cor preta para aumentar a absorbância dos raios solares.

Além dos concentradores parabólicos, equipamentos como o Disco de Stirling, módulos de células fotovoltaicas e alguns tipos de sensores de radiação necessitam de sistemas de rastreamento em um ou dois eixos para captação da radiação solar direta.

Pesquisas mostram que o ato de concentrar a radiação solar em uma área é uma prática bastante antiga e que buscava atender a objetivos diversos. Acredita-se que o princípio dos refletores concentradores de radiação foi descoberto pelos gregos.

Em 1883, Ericsson desenvolveu um motor solar cujo fluido termodinâmico era vapor d'água produzido em um concentrador parabólico. O motor atingia uma potência de 1,6hp com uma superfície de coleta de radiação de 16,4 m². Em 1886, Ericsson experimentou um motor de 2,5hp (FRAIDENRAICH e LYRA, 1995). A Figura 2.3 mostra o concentrador parabólico e a máquina de vapor construída por Ericsson.

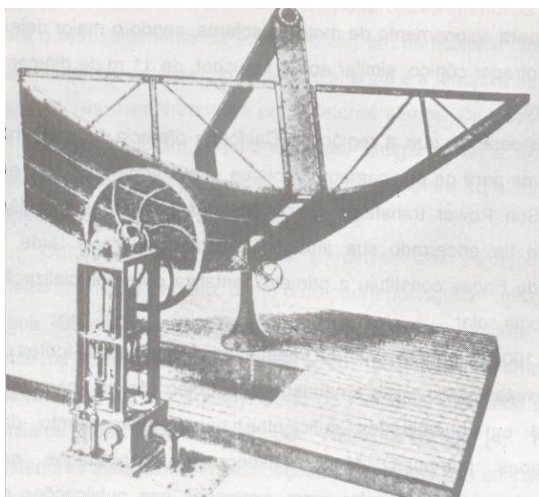


Figura 2.3 – Conjunto concentrador parabólico e máquina de vapor construída por Ericsson em 1883 (MEINEL e MEINEL, 1976 apud FRAIDENRAICH e LYRA, 1995).

Trabalhos posteriores introduziram modificações importantes nas concepções do sistema e, devido aos resultados favoráveis, Shuman² e seu colaborador C. V. Boys atraíram interesse de investidores britânicos para a construção de uma planta de bombeamento de água para irrigação no Egito. Em junho de 1913, a maior planta solar da época termina de ser instalada em Meadi, Egito, a qual é mostrada na figura 2.4 (ACKERMAN, 1914 apud FRAIDENRAICH, e LYRA, 1995).

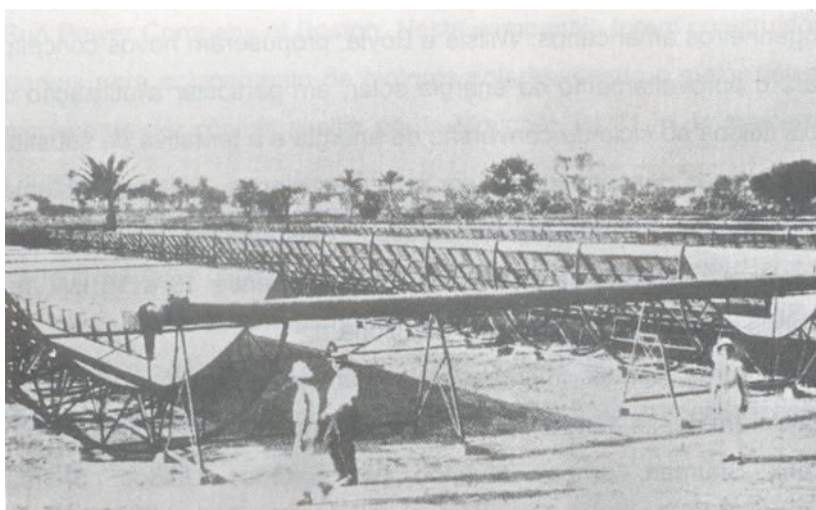


Figura 2.4 – Sistemas de coletores solares construído por Shuman e Boys em Meadi, Egito (MEINEL e MEINEL, 1976 apud FRAIDENRAICH e LYRA, 1995).

² Shuman começou suas atividades em 1906 e, em 1907, construiu uma primeira planta comercial em Tocony, perto da Filadélfia (ACKERMAN, 1914 apud FRAIDENRAICH, e LYRA, 1995).

Atualmente, grandes plantas de geração de eletricidade utilizam o concentrador parabólico para produção de vapor. Os Estados Unidos e parte da Europa, principalmente Espanha e Alemanha, destacam-se nesta forma de aproveitamento da energia solar.

2.4 Princípio de Funcionamento dos Concentradores Parabólicos

A operação de rastreamento da radiação solar direta pelo concentrador parabólico ao longo de um dia inicia-se normalmente com a superfície parabólica refletora inclinada para o nascente a Leste e finaliza-se inclinada para o poente a Oeste.

Quando se finaliza a operação do equipamento ao anoitecer, a superfície concentradora pode permanecer virada para o Oeste e, ao amanhecer, voltar a se posicionar para o nascente. Outra prática comum é o retorno da superfície refletora para a posição de nascente logo que é atingido o extremo ao fim do dia. Esta prática é mais comum em sistemas que utilizam o método passivo de rastreamento da radiação solar.

Para reduzir a área de contato do concentrador com o vento e, principalmente, aumentar a transferência de calor no tubo adsorvedor para o seu resfriamento, optou-se neste trabalho por posicionar a superfície refletora na posição de meio-dia (horizontal) durante a noite. A Figura 2.5 mostra as posições extremas do deslocamento da superfície parabólica.

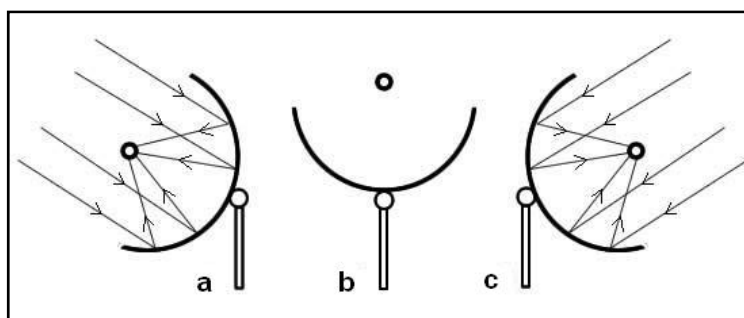


Figura 2.5 – Posições críticas do deslocamento da superfície parabólica.

A posição de início de operação é mostrada em (a). Em (b) é mostrada a posição ao meio-dia, por movimento do concentrador e à noite. A posição de fim do dia é apresentada em (c). O nível de inclinação nas posições (a) e (c) é definida de acordo os requisitos de projeto de cada concentrador.

2.5 Microcontroladores.

A utilização de microcontroladores proporciona inteligência e flexibilidade ao sistema, uma vez que é possível fazer alterações neste sistema sem ter que necessariamente fazer alterações de dispositivos eletrônicos. Desta forma, querendo-se que o sistema execute determinada tarefa sob o comando de algum sensor, por exemplo, basta apenas que o código de programa do *chip* microcontrolador seja editado para este fim.

De acordo com Ibrahim (2008), “O microcontrolador é um sistema microprocessador que contém dados e memória de programa, portas de I/O paralelas e seriais, *timers*, interrupções interna e externas, tudo integrado em um só *chip*”.

Há alguns anos se tem presenciado a evolução dos microcontroladores. Estes dispositivos têm revitalizado equipamentos em quase todos os campos incluindo telecomunicações, medicina, indústria e eletrodomésticos.

Atualmente, existem muitas famílias de microcontroladores como: Intel 4048 e 8051, Motorola, 68HC11, Zilog Z8, Microchip PIC, Hitachi H8 e Atmel AVR. Gadre (2001) cita que uma família de microcontroladores indica a disponibilidade de muitos diferentes microcontroladores com o mesmo núcleo central, mas diferentes periféricos e velocidade de operação.

2.5.1 Microcontroladores AVR ATmega8

Em virtude do baixo custo, da disponibilidade de recursos adicionais em relação a outros *chips* com o custo semelhante e a facilidade de programação,

optou-se por escolher o microcontrolador AVR ATmega8 para comandar a placa de controle do sistema de rastreamento desenvolvido neste trabalho.

Quanto ao tipo de arquitetura, os microcontroladores são classificados como sendo de arquitetura Harvard ou Von Neumann.

A arquitetura de Von Neumann é codificada/decodificada na plataforma CISC (*Complex Instruction Set Computer*) ou computador com conjunto de instruções complexas. Na arquitetura de Von Neumann, há apenas um barramento para acesso às memórias de programa e de dados. Isto implica que enquanto o processador está executando uma instrução ele fica impossibilitado de buscar a próxima instrução na memória de programa, uma vez que o barramento está ocupado.

A arquitetura Harvard é um conceito mais recente que a de Von Neumann. A principal diferença entre esta e a arquitetura Harvard é a velocidade de execução das informações, já que utiliza a técnica conhecida por *pipeline* em que, enquanto uma instrução começa a ser executada, outra já é buscada na memória de programa para que a mesma possa ser executada no próximo ciclo de *clock*. A maioria dos microcontroladores de arquitetura de Harvard utiliza a plataforma RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) ou computador com um conjunto reduzido de instruções.

Gadre (2001) cita algumas características dos microcontroladores da família Atmel AVR:

- a) arquitetura RISC com 32 registradores de propósito geral;
- b) técnica de *pipeline* que aumenta a velocidade de execução;
- c) maior quantidade de instruções em um ciclo de *clock*;
- d) até 10 MHz de velocidade de operação do *clock*;
- e) grande variedade de periféricos, incluindo portas de I/O, ADC, EEPROM, *timer*, UART, *pulse width modulation* (PWM);
- f) memória interna de dados e de programa;
- g) programação *In-system*;
- h) disponibilidade de encapsulamento de 8 a 64 pinos que atende a uma grande variedade de aplicações;
- i) até 12 vezes o ganho de desempenho sobre os microcontroladores mais convencionais com arquitetura CISC;
- j) larga escala de tensão de operação. De 2,7 V a 6,0 V;

- k) a arquitetura simples proporciona um pequeno tempo de aprendizado para iniciantes.

2.6 Motor de Passo

O motor de passo é um dispositivo eletromecânico cuja função é transformar energia elétrica em movimento rotativo. Este tipo de motor geralmente é utilizado em aplicações que exigem boa exatidão no posicionamento do rotor. Em virtude da sua precisão, estes motores podem ser usados em circuitos abertos, ou seja, sem qualquer realimentação de controle normalmente proporcionada por potenciômetros, codificadores ou outros sensores.

O passo do motor é o menor deslocamento angular possível que pode ser executado. Desta forma, existem diversas resoluções para eles como por exemplo: $1,8^\circ$, $3,6^\circ$, $7,5^\circ$, 15° e até 90° , ou seja, 200, 100, 48, 24 e 4 passos por rotação respectivamente. Entretanto, dependendo do controle, é possível fazer com que o motor opere executando meio-passo e micro-passo diminuindo ainda mais sua resolução.

Os dois tipos de motores de passo mais comuns são os motores unipolares e os bipolares. A Figura 2.6 ilustra o esquema dos enrolamentos dos dois tipos de motores, bipolar e unipolar.

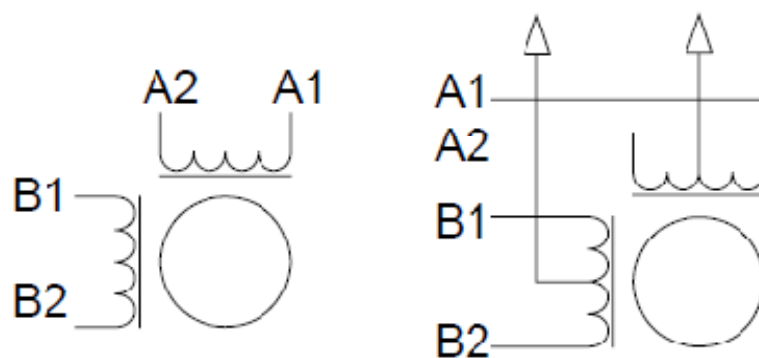


Figura 2.6 – Esquema dos enrolamentos dos dois tipos de motores, bipolar (à esquerda) e unipolar (à direita). (ATMEL, 2006).

De acordo com a nota de aplicação “AVR446: *Linear speed control of stepper motor*”, o motor bipolar necessita de corrente elétrica em ambas as direções dos enrolamentos e uma ponte completa (*Full Bridge*) para o seu controle. O fio central no enrolamento do motor unipolar permite a utilização de um circuito de controle mais simples, limitando o fluxo de corrente em apenas uma direção. A principal vantagem do motor bipolar é o maior torque devido à sua capacidade de energizar todos os enrolamentos de uma só vez.

Neste trabalho, foi utilizado um motor de passo bipolar de 4 fios que opera sob tensão de 12 V e com corrente elétrica de 0,5 A. O motor de passo bipolar necessita de alimentação com polaridade invertida. No caso deste trabalho, o circuito L298 é responsável por fornecer este tipo de polarização.

2.7 Ciclo de Refrigeração por Adsorção

O equipamento de refrigeração por adsorção é formado por três componentes básicos: evaporador, condensador e adsorvedor. O ciclo por adsorção opera em regime intermitente e é caracterizado por duas fases: uma de resfriamento (adsorção) e outra de aquecimento (dessorção).

A fase de resfriamento ocorre com a evaporação parcial do adsorbato (fluido refrigerante) contido no evaporador, devido à remoção de calor da vizinhança. Ao ser evaporado, o adsorbato flui do evaporador para o adsorvedor e é adsorvido (fixado) nas cavidades porosas do material adsorvente, devido às forças intermoleculares formadas entre o adsorbato e o adsorvente (sólido poroso). Com a evaporação, o líquido que cedeu calor (resfriado) no evaporador pode ser utilizado em refrigeração e/ou condicionamento de ar.

Na fase seguinte do ciclo (fase de aquecimento), um sistema térmico cede calor ao adsorvedor e promove a regeneração do leito adsortivo. O adsorbato é desprendido das cavidades porosas do adsorvente e flui do adsorvedor para o condensador onde passa para a fase líquida por transferência de calor latente ao meio condensante. Na fase líquida, o fluido retorna para o evaporador. Ao final desta fase é possível o reinício do ciclo de adsorção. A Figura 2.4 mostra o ciclo básico de refrigeração por adsorção.

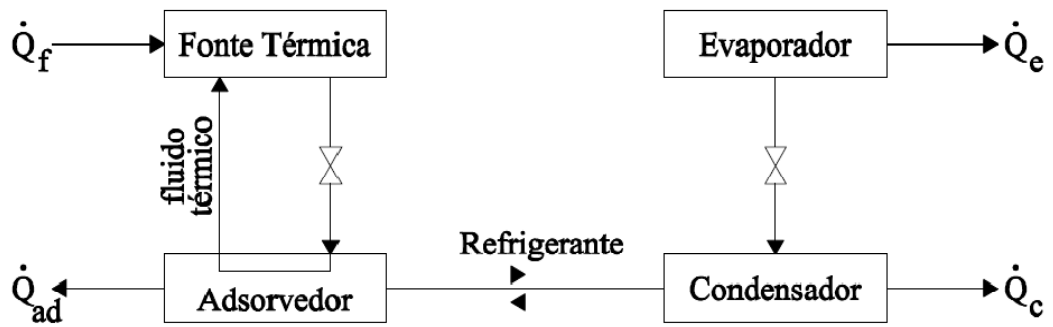


Figura 2.7 - Ciclo básico de refrigeração por adsorção

Espera-se que a temperatura no tubo coletor do concentrador permaneça superior a 80°C durante a fase de aquecimento do ciclo de adsorção.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Visão Geral

Este projeto trata-se do desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para rastreamento de concentradores cilíndrico-parabólicos aplicados à refrigeração.

Além do posicionamento do coletor solar para captação dos melhores níveis de radiação, o sistema é responsável pela automação do coletor, de forma que não seja necessária nenhuma intervenção humana para o seu funcionamento ao longo do dia, como operações de desligamento no período noturno e o seu acionamento ao amanhecer. Outro aspecto importante é o baixo consumo de energia elétrica do sistema de controle e do atuador.

O sistema é composto por dois sensores de luminosidade, dois sensores limitadores de movimento, uma placa de controle com um microcontrolador em seu núcleo e um motor de passo.

3.2 Ferramentas de *Hardware* e *Software* Utilizadas

Durante o desenvolvimento deste trabalho, duas placas de controle foram projetadas. A primeira, em virtude do seu desenvolvimento no início do trabalho, apresentava algumas limitações e custo mais elevado. Posteriormente, optou-se pelo desenvolvimento de outra placa mais simples e menor, porém, com mais recursos. Esta placa é apresentada no Apêndice A.

Dois ferramentas de *hardware* foram utilizadas no desenvolvimento deste projeto. Inicialmente, foi utilizada uma placa de simulação e gravação através da porta paralela de um microcomputador para o microcontrolador. A Figura 3.1 mostra o *kit* de simulação e gravação para o AT89S52.

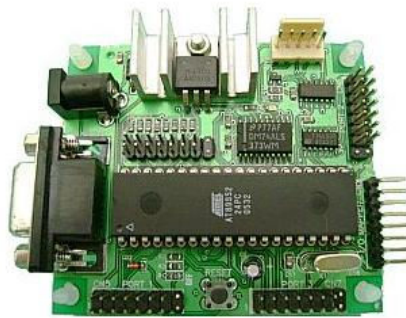


Figura 3.1 - Placa de simulação e gravação de microcontroladores AT89S52.

Para a programação do microcontrolador AT89S52 utilizou-se o software gratuito SDCC (*Small Device C Compiler*). O SDCC é um compilador de códigos editados em Linguagem C e está disponível no endereço eletrônico

Posteriormente, após estudos de comparação de custo e simplificação da placa de controle optou-se pela substituição do microcontrolador AT89S52 por um AVR ATmega8 com mais recursos, menor custo e menor número de pinos. Devido a esta substituição, teve-se que utilizar outra ferramenta para gravação do código hexadecimal no microcontrolador através da porta serial de um microcomputador. A Figura 3.2 mostra o gravador de microcontroladores AVR ATmega8 e ATmega16.



Figura 3.2 - Gravador de Microcontroladores AVR's ATmega8 e ATmega16

Foram utilizados dois *softwares* para o desenvolvimento da placa de controle. Para o projeto e simulação da placa de controle utilizou-se o *software* Proteus Isis v6.7 que dispõe de uma grande variedade de componentes eletrônicos de diversos fabricantes em sua biblioteca. Para construção automática do *layout* da placa de circuito impresso utilizou-se o *software* Proteus Ares v6.7.

Para a edição, compilação, depuração e simulação do código de programa do microcontrolador AVR ATmega8 foi utilizado o software BASCOM-AVR

que dispõe de vários microcontroladores da família AVR em sua biblioteca. A função mais importante deste software é a de compilador de códigos editados na linguagem BASIC para microcontroladores. O arquivo *.hex* gerado por este *software* resultante da compilação foi gravado no microcontrolador através do *software* gratuito PonyProg2000 *Serial Device Programmer* versão 2.05a beta. Além de ser gravado no próprio microcontrolador, o arquivo em formato hexadecimal é utilizado pelo Proteus Isis para realizar a simulação do circuito eletrônico.

3.3 Módulo de Sensores de Luminosidade

O módulo de sensores de luminosidade é responsável por enviar à placa de controle as informações necessárias para realizar o rastreamento dos melhores níveis de radiação solar e, junto com os sensores limitadores de movimento, automatizar toda operação do concentrador parabólico durante o dia. Este módulo é composto por dois sensores LDR (*Light Dependent Resistors*).

Havia a possibilidade da utilização de dois tipos de dispositivos para integrar o módulo de sensores de luminosidade. A primeira opção era pequenas células fotovoltaicas que geram corrente elétrica proporcionalmente ao nível de radiação incidente sobre as suas superfícies. A vantagem da utilização destes sensores é a qualidade da fabricação dos mesmos que faz com que estes dispositivos apresentem o mesmo comportamento ou pequenas diferenças quando submetidos às mesmas condições de luminosidade. Como desvantagens têm-se a magnitude do sinal, que exige a utilização de amplificadores para adequar o sinal fornecido pelo sensor para ser recebido pelo microcontrolador, e o alto custo de aquisição do produto que inviabiliza a sua utilização em projetos objetivando o baixo custo. O outro tipo de dispositivo é conhecido por fotoresistor ou LDR. Este dispositivo é constituído de dois terminais externos e uma superfície fotossensível. Estes sensores têm uma resistência elétrica interna variável em função da intensidade luminosa incidente sobre sua superfície. Com estes resistores variáveis podem ser obtidas resistências elétricas da ordem de 100 M Ω no escuro até a ordem de 100 Ω quando são expostos à radiação solar direta.

Apresentam-se como vantagens dos LDR o custo muito baixo de

aquisição, a facilidade de encontrá-los nos estabelecimentos de venda de produtos eletrônicos e a geração do sinal na magnitude da tensão de referência do microcontrolador, dependendo apenas da tensão de alimentação do módulo de sensores, dispensando o uso de amplificadores. Como desvantagem dos LDR, tem-se a diferença nas resistências elétricas apresentadas quando estes são submetidos aos mesmos níveis de luminosidade. Tal diferença é agravada quando há o mínimo de desnivelamento entre os sensores já que estes são muito sensíveis a pequenas variações de luminosidade. Estas desvantagens dos LDR apresentavam-se como problemas que foram solucionados através de experimentos com os sensores e os resultados foram transformados em informações, que foram introduzidas no código de programação do microcontrolador.

Segundo Dally *et al* (1993), o LDR é fabricado a partir de materiais semicondutores, normalmente sulfeto de cádmio (CdS) ou seleneto de cádmio (CdSe), pois estes apresentam uma excelente resposta fotocondutora. Quando um fóton de luz colide com uma molécula de CdSe (ou CdS), um elétron recebe energia do fóton e evolui para a banda de condução da molécula, caso receba energia suficiente do fóton. Na banda de valência surge uma lacuna em razão da ausência do elétron. Tanto a lacuna quanto o elétron são portadores de carga, e o aumento do fluxo luminoso incidente no LDR aumenta os portadores de carga no semicondutor. Este processo aumenta a condutividade do dispositivo.

A Figura 3.3 e a Figura 3.4 ilustram respectivamente a superfície fotossensível e a composição de um LDR.

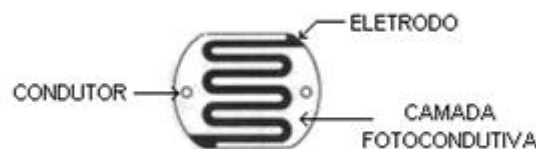


Figura 3.3 - Superfície fotossensível de um LDR (adaptado de Dally *et al*, 1993).

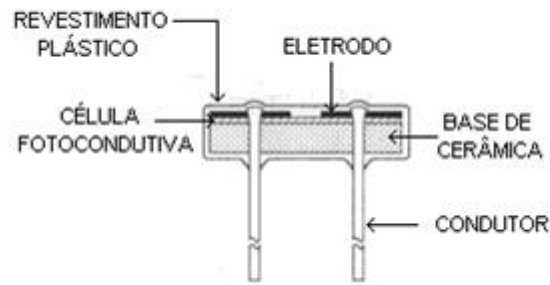


Figura 3.4 - Composição de um LDR (adaptado de Dally *et al*, 1993).

A Figura 3.5 mostra o esquema do circuito elétrico, conhecido por circuito divisor de tensão, para leitura de apenas um LDR.

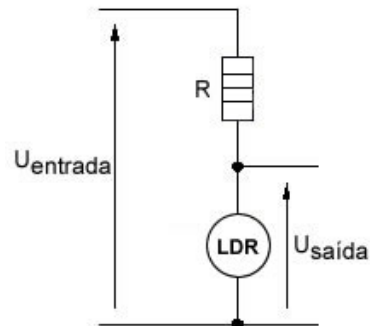


Figura 3.5 - Esquema do circuito elétrico para leitura de apenas um sensor LDR.

A tensão elétrica de entrada no circuito é de 5V e a tensão de saída é dada pela seguinte equação:

$$U_{saida} = \frac{R_L}{R_R + R_L} U_{ent} \quad (3.1)$$

no qual:

U_{saida} é o valor da tensão em *Volts* que sai do circuito dos sensores e é analisada pelo microcontrolador;

R_R é o valor da resistência elétrica em Ω do resistor R;

R_L é o valor da resistência elétrica instantânea oferecida pelo LDR;

U_{ent} é o valor da tensão de alimentação em *Volts* do circuito dos sensores.

Observa-se por este circuito que quanto maior for a intensidade da radiação solar sobre o LDR, menor será a sua resistência elétrica e também menor será a tensão elétrica de saída correspondente a este sensor. Durante a noite, por exemplo, a tensão de saída correspondente a qualquer um dos LDR ficará muito próxima da tensão de entrada do circuito, já que a resistência elétrica desses sensores estará na ordem de $100\text{ M}\Omega$ e para esta aplicação pode ser considerada infinita. Por outro lado, durante um dia de céu claro, a tensão de saída se encontrará bem abaixo da tensão de entrada do circuito, mas nunca será zero visto que a resistência dos LDR permanece, nessas condições, próxima de $100\ \Omega$.

A Figura 3.6 mostra como os sensores LDR's foram dispostos de tal forma que recebessem os mesmos níveis de radiação quando a base fosse perpendicular à radiação solar direta.

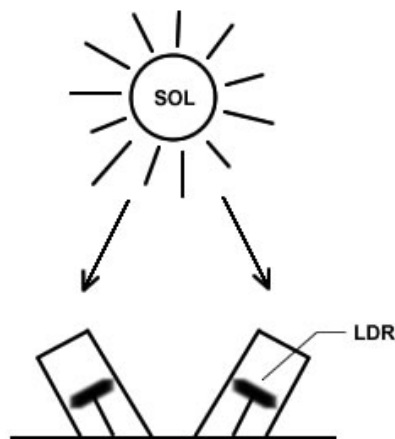


Figura 3.6 – Disposição dos LDR's

3.4 A Placa de Controle

A placa de controle do sistema de rastreamento contém um microcontrolador em seu núcleo que recebe as informações dos sensores limitadores de movimento e de luminosidade. Para se fazer o tratamento desses sinais é necessário um dispositivo interno ou externo ao microcontrolador conhecido por conversor analógico-digital (*analog-to-digital converter* – ADC) que transforma os sinais analógicos das tensões que saem do circuito elétrico do módulo de sensores

de luminosidade em dados digitais. Esses dados são analisados e com base neles é feito o acionamento do atuador posicionando o concentrador parabólico adequadamente em relação aos raios solares. Outros dois circuitos controladores de motor de passo compõem a placa de controle.

Para o controle do motor de passo foram utilizados os circuitos integrados L297 e o L298. O integrado L297 foi desenvolvido para controle de motor de passo bipolar, unipolar e motores CC e pode gerar sinais para duas fases bipolares ou quatro fases unipolares. Este circuito integrado possibilita a utilização do motor de passo nos modos meio-passo ou passo-completo, possui inibidor de corrente que possibilita um rápido decaimento da carga elétrica na alternância de energização das bobinas do motor e facilita bastante o controle do motor, visto que não é necessário programar no código do microcontrolador a seqüência de sinais a ser enviada ao motor, proporcionando um código mais leve e reduzindo o tempo de execução do programa do microcontrolador. O Anexo B mostra a pinagem do circuito integrado L297 com informações adicionais.

O circuito integrado L298 é ideal para aplicações que exigem tensão e corrente elevadas, além de proporcionar simplificação à placa de controle já que todos os transistores de potência necessários para o controle do motor estão integrados em um só *chip*. Este circuito foi projetado para suportar tensões de até 46V e correntes de até 2A por fase. O Anexo C mostra a pinagem detalhada do CI L298 e informações adicionais. A Figura 3.7 mostra esquema de controle do motor de passo.

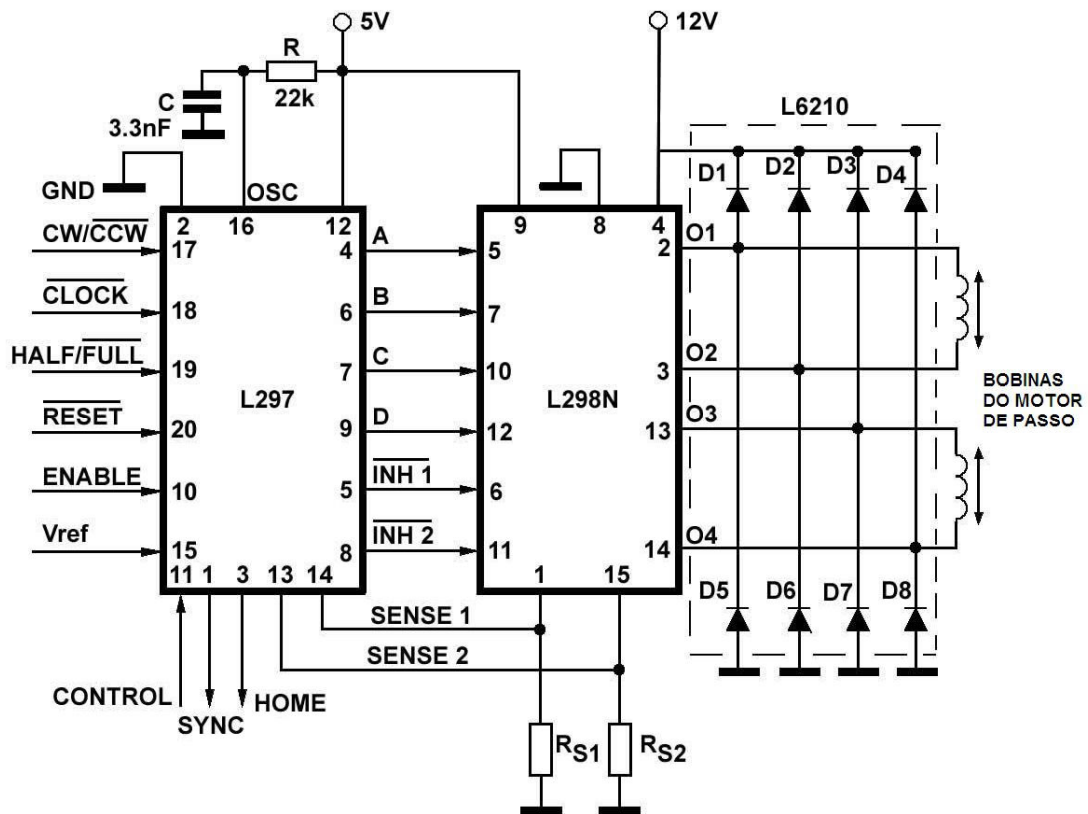


Figura 3.7 - Esquema de controle do motor de passo.

A utilização deste conjunto proporciona certa flexibilidade ao sistema já que com a mesma placa de controle, sem alteração do *layout*, é possível controlar motores de passo unipolar, bipolar e motor CC.

3.4.1 A Placa de Controle com o Microcontrolador ATmega8 em seu Núcleo

Com o objetivo de reduzir o custo do sistema, simplificação da placa de controle e utilização de um display LCD para analisar os sinais dos sensores, foi desenvolvida outra placa com o microcontrolador AVR ATmega8 em seu núcleo.

O ATmega8 é um microcontrolador de 8 *bits* de tecnologia CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) e arquitetura RISC (*Reduced Instruction Set Computer*). Uma característica interessante deste dispositivo é sua capacidade de executar uma instrução por ciclo de *clock*. Esta taxa de execução de instruções foi possível de ser alcançada em virtude da conexão direta de seus 32

registradores de propósito geral com a unidade lógica aritmética (ALU). Esta característica o deixa em vantagem quando comparado com os concorrentes da família PIC. Além do mais, apesar de ser RISC, possui um grande número de instruções (130), o que permite a melhoria de código de alto nível.

Com o objetivo de maximizar o desempenho e o paralelismo, o AVR segue arquitetura *Harvard*, em que os barramentos associados às memórias de dados e do programa são distintos. Além disso, utiliza-se a técnica do *pipeline*, em que, enquanto uma instrução começa a ser executada, outra já é buscada na memória de programa para que a mesma possa ser executada no próximo ciclo de relógio (Atmel, 2004).

A Figura 3.8 mostra a pinagem do microcontrolador e o Anexo A exhibe a arquitetura do ATmega8.

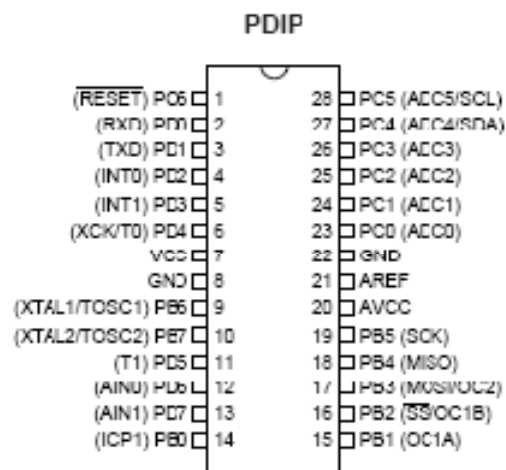


Figura 3.8 - Pinagem do microcontrolador ATmega8.

A seguir, são listadas algumas características importantes do microcontrolador ATmega8.

- a) 8K bytes de memória *Flash* com método ISP (*In-System Programmable*) de programação, o que capacita a leitura da memória enquanto se escreve o código;
- b) 1 kbyte de memória SRAM interna;
- c) dois *Timer/Counters* de 8 bits e um *Timer/Counter* de 16 bits;

- d) seis canais de conversão analógico-digital, com a possibilidade da utilização da tensão de referência de 2,56V fornecida internamente pelo próprio microcontrolador. Quatro destes canais de conversão possuem resolução de 10 *bits* e os outros dois de 8 *bits*. O *ADC* utiliza o método de aproximações sucessivas para realizar conversão;
- e) dois pinos de interrupção externa *INT0* e *INT1*;
- f) cinco modos de operação *sleep*: *Idle*, *ADC Noise reduction*, *Power-save*, *Power-down* e *Standby*;
- g) resistores *pull-up* internos.

Em modo de operação *Idle*, a memória interna *SRAM*, os *Timers/Counters*, a porta *SPI* e as interrupções do sistema permanecem funcionando. No modo *Power-down* salva-se o conteúdo dos registradores, mas congela-se o oscilador, desabilitando-se todas as outras funções do *chip* até a próxima interrupção ou operação de *reset* por hardware. O modo *Power-save* permite a execução do *timer* possibilitando ao usuário manter um tempo base enquanto o resto do dispositivo continua “dormindo”. O modo *ADC Noise Reduction Mode* pára a CPU e todos os módulos de I/O exceto o *timer* e o conversor analógico-digital, para minimizar ruídos durante as conversões. Com relação ao modo *Standby*, o oscilador continua executando enquanto o resto do dispositivo permanece “dormindo” (Atmel, 2004).

O AVR ATmega8 é suportado com um completo conjunto de *softwares* e ferramentas de desenvolvimento de sistemas, incluindo compiladores C, programas depuradores e simuladores, gravadores e *kits* de desenvolvimento (Atmel, 2004).

A Figura 3.9 mostra o diagrama de blocos da placa com o microcontrolador ATmega8.

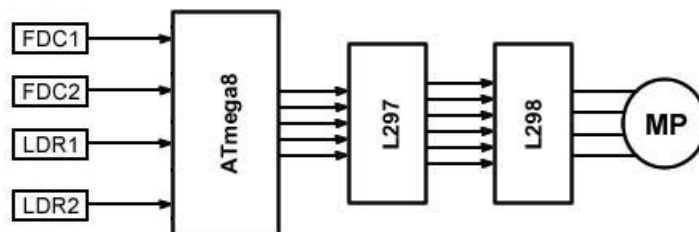


Figura 3.9 – Diagrama de blocos da placa controladora com o microcontrolador.

A Figura 3.10 e a Figura 3.11 mostram, respectivamente, o esquema de simulação com o novo microcontrolador AVR ATmega8 em seu núcleo e a placa de controle montada.

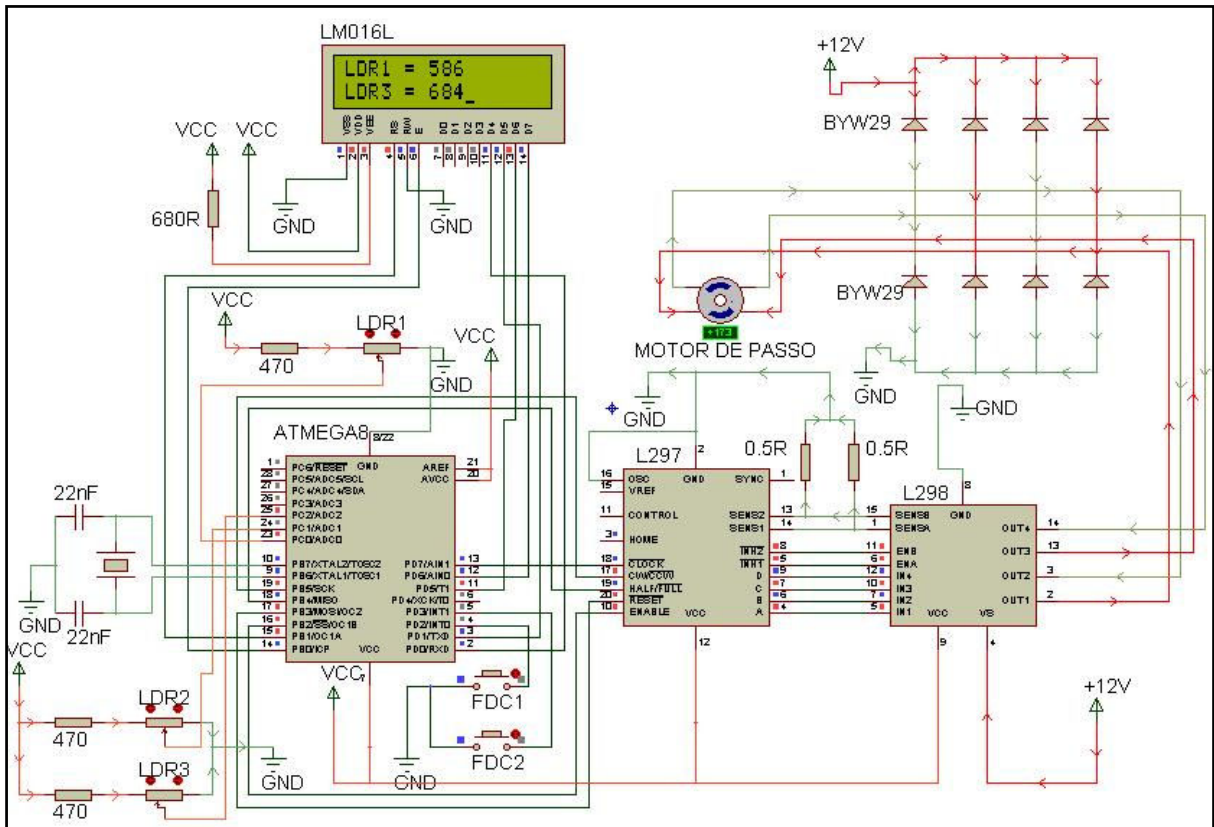


Figura 3.10 – Esquema de simulação da placa com o microcontrolador Atmega8.

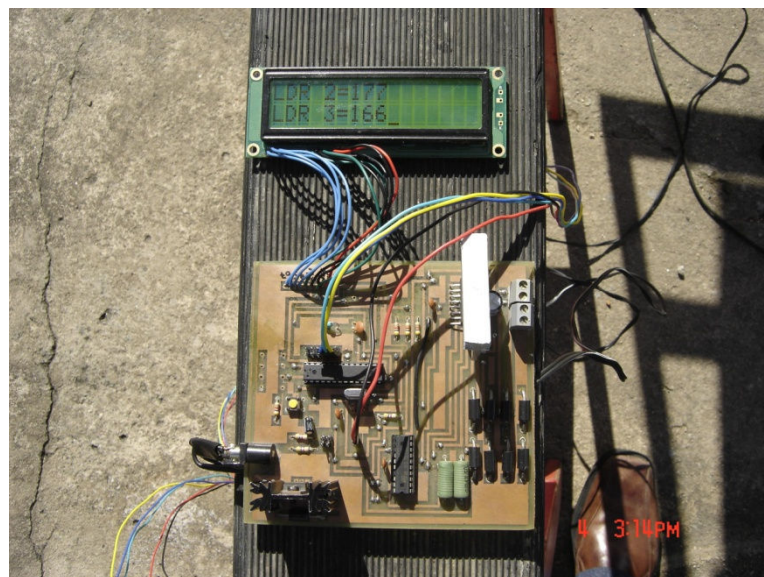


Figura 3.11 - Placa de controle montada.

A Tabela 3.1 mostra uma comparação de custos das placas utilizando-se o microcontrolador AT89S52 e o AVR Atmega8.

Tabela 3.1 - Comparação do Custo das placas com diferentes microcontroladores em seu núcleo.

Componentes	Placa com AT89S52 (R\$)	Placa com ATmega8 (R\$)
Microcontrolador	5,50	6,00
ADC externo	9,00	-
Conjunto controlador de motor de passo	15,00	15,00
Placa e outros componentes	21,00	19,50
TOTAL	50,00	40,50

A tabela 3.1 mostra que a substituição do microcontrolador proporcionou uma redução de custo no sistema de 23,5%.

3.5 Análises dos Sensores de luminosidade

A análise do comportamento dos dois sensores LDR foi essencial para introduzir no código de programação do microcontrolador informações necessárias para o funcionamento adequado do concentrador parabólico.

3.5.1 Experimento para Análise da Resposta do LDR às Variações da Intensidade da Radiação Solar.

Inicialmente, foi analisado o comportamento de apenas um dos dois sensores LDR em dia de céu claro e em dia de céu com muitas nuvens apenas para

verificar que tipo de curva era gerada com valores de resistência elétrica.

A Figura 3.12 mostra a forma como os dados foram coletados e armazenados em um equipamento *data logger*. Os dados referentes à radiação solar foram medidos com um piranômetro plano com a mesma inclinação do sensor LDR.



Figura 3.12 - Coleta de dados para verificação do comportamento do LDR em função da radiação solar.

A Figura 3.12 mostra o gráfico da primeira análise do comportamento de um LDR em relação à radiação solar em dia de céu claro. Foram coletados dados no dia 9 de janeiro de 2009 no período de 14h49min as 17h00min referentes à resistência elétrica dos LDR e dados dos níveis de radiação solar próximos ao sensor. A declinação utilizada foi de aproximadamente -20° .

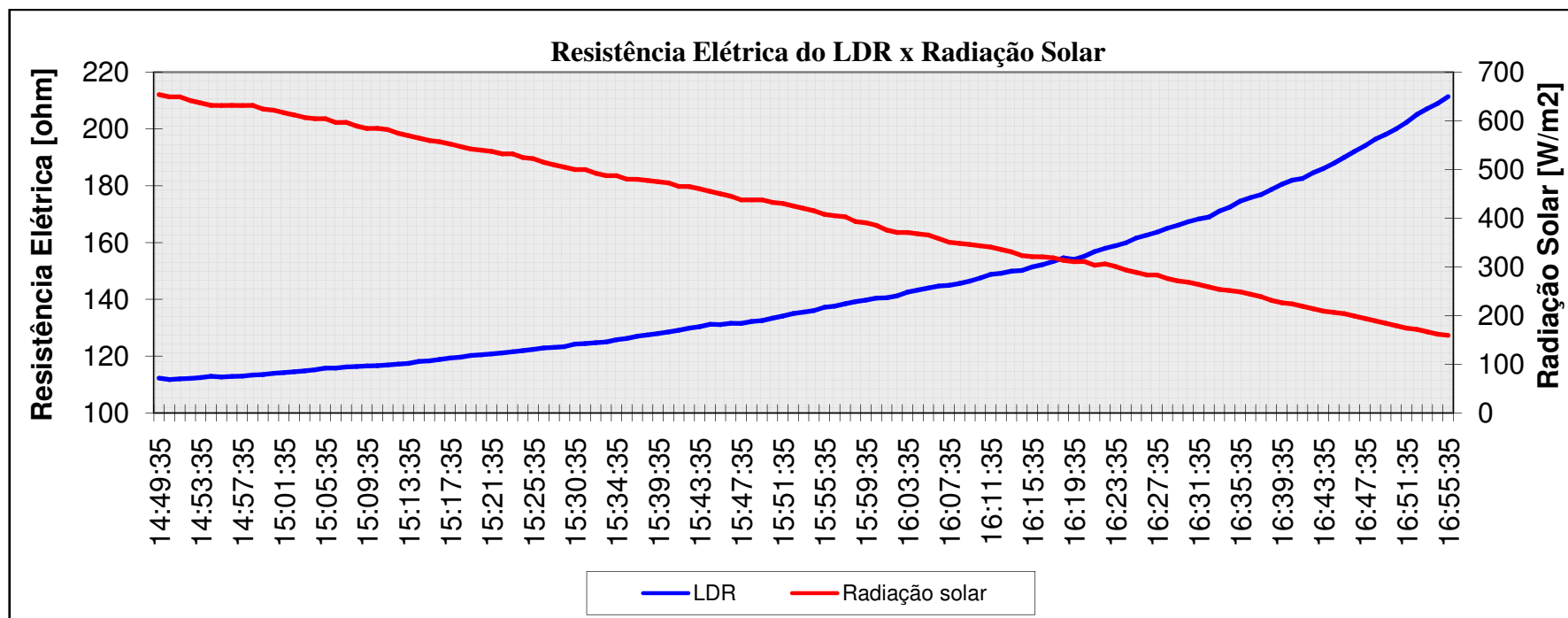


Figura 3.13 – Gráfico do comportamento do LDR em relação à radiação solar em dia de céu claro.

Observa-se pelo gráfico da Figura 3.12 que para altos níveis de radiação solar a resistência elétrica do LDR apresenta um comportamento linear. À medida que a intensidade de radiação vai reduzindo, a curva da resistência elétrica vai perdendo seu caráter linear e tende rapidamente a valores infinitos de resistência elétrica. Nota-se também no mesmo gráfico que o LDR é pouco sensível a pequenas variações da radiação solar quando esta está em níveis muito altos. Por outro lado, pequenas variações da radiação solar quando esta está em níveis baixos pode ser percebida pelo LDR. A Figura 3.14 mostra outra análise feita em dia de céu com muitas nuvens. As medições foram feitas no dia 15 de janeiro de 2009 durante o período de 10h40min às 17h55min com o piranômetro com a mesma inclinação do sensor LDR.

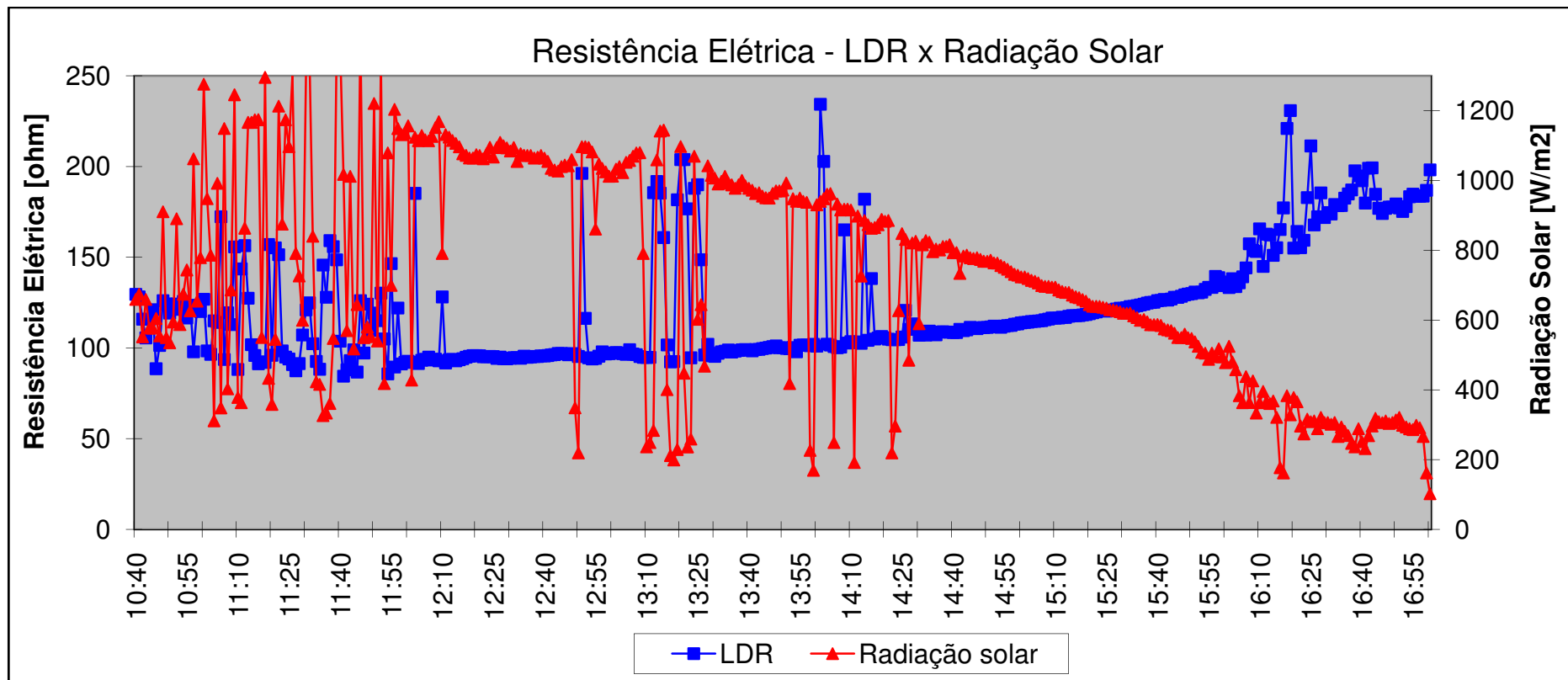


Figura 3.14 – Gráfico do comportamento do LDR em relação à radiação solar em dia com muitas nuvens no céu.

Novamente, observa-se que a sensibilidade do sensor LDR aumenta à medida que a radiação solar diminui. O gráfico da Figura 3.13 deixa bem clara esta característica do LDR. Na primeira parte do gráfico, de 10h40min as 13h40min, observa-se que a magnitude da variação da radiação solar é maior que a magnitude da variação da resistência elétrica. Por outro lado, na segunda parte do gráfico, de 13h40min as 17h00min, observa-se que a relação se inverte. Maiores variações de resistência elétrica do LDR são causadas por pequenas variações da radiação solar. Devido a esta característica, em relação ao tempo de resposta do LDR, o gráfico anterior mostra que para altos níveis de radiação solar, o tempo de resposta do LDR é pequeno já que a escala de variação da resistência elétrica, também é pequena.

Em relação aos sensores de radiação, conclui-se que no início do dia e ao anoitecer o rastreador pode se apresentar instável em virtude das condições de luminosidade e devido ao aumento no seu tempo de resposta nestes períodos. Durante o restante do dia, caso o céu esteja com poucas nuvens ou nenhuma, o sensor oferece estabilidade ao concentrador considerando-se o pequeno tempo de resposta em relação à velocidade do deslocamento relativo do sol e o caráter linear da curva para altos níveis de radiação.

3.5.2 Compensação dos Sinais dos Sensores de Luminosidade

Devido às diferenças apresentadas entre dois sensores LDR e imperfeições na montagem dos mesmos, foi necessário verificar o sinal fornecido por cada sensor quando estes estavam sob os mesmos níveis de luminosidade.

A resolução do sinal fornecido pelo sensor é dada pela seguinte equação:

$$r = \frac{V_{REF}}{2^n} \quad (3.2)$$

Em que,

r = é a resolução do sinal fornecido pelo sensor em *Volts*;

V_{REF} é a tensão de referência do conversor ADC;

n é o número de *bits* do conversor ADC.

Considerando que a capacidade do conversor analógico-digital é de 10 *bits*, o maior valor que pode ser fornecido por este dispositivo é o número inteiro 1023 ($2^{10} = 1024$ incluindo o inteiro 0). Logo, todos os valores de tensão lidos nos sensores são convertidos para valores inteiros entre 0 e 1023. Por exemplo, o valor de tensão de 0 V corresponde ao número inteiro 0 após a conversão e o valor de referência, que é o maior valor de tensão que pode ser lido pelo dispositivo, corresponde ao valor inteiro 1023.

Tendo-se a tensão de referência de +5V, a resolução do sinal fornecido pelo sensor, calculada pela Equação 3.2, é de 4,88 mV, ou seja, a variação de tensão de 4,88 mV corresponde à variação de uma unidade na escala de 0 a 1023.

Para definição da diferença entre os sinais dos dois sensores LDR em que o concentrador permanecesse parado, foi utilizado um *display* LCD de dezesseis colunas e duas linhas. Através deste *display* foi mostrada a magnitude do sinal de cada LDR no instante em que os raios chegavam perpendicularmente ao módulo de sensores de luminosidade. O valor mostrado no *display* corresponde ao valor de 0 a 1023 referente às tensões de 0 a +5V.

Para se comprovar que a radiação solar direta estava incidindo igualmente sobre os dois sensores LDR foi colocada uma haste metálica perpendicular à base onde os sensores estavam montados e foram coletados dados, instantaneamente a cada 10 minutos, correspondentes às tensões fornecidas pelos sensores. A Figura 3.15 e a Figura 3.16 mostram imagens do experimento para coleta de dados através de um *display* LCD. O código do microcontrolador para leitura dos LDR é apresentado no Apêndice B.

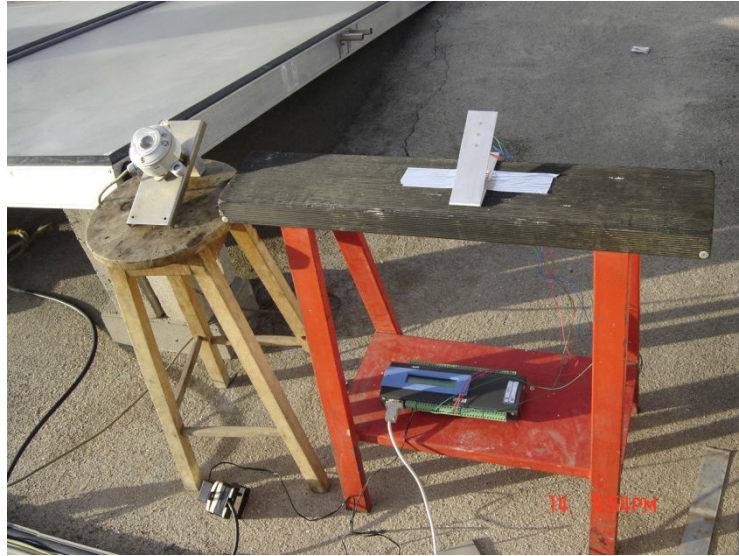


Figura 3.15 - Coleta de dados para determinação da diferença dos sinais fornecidos pelo sensor em que o concentrador deve permanecer parado.



Figura 3.16 - Exibição dos valores lidos através de um *display* LCD.

A Figura 3.17 mostra o gráfico dos valores inteiros das tensões nos sensores, após a conversão analógico-digital.

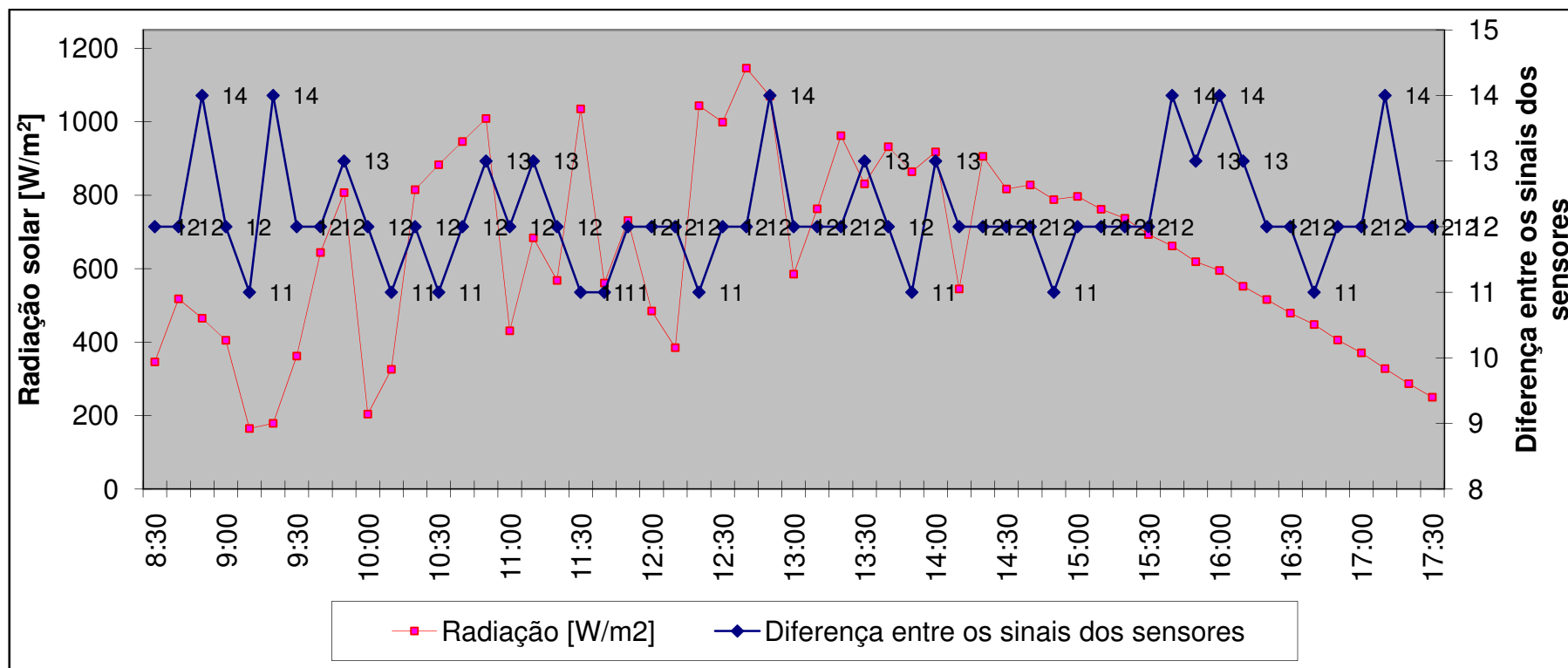


Figura 3.17 - Gráfico dos valores inteiros adimensionais correspondentes as tensões elétricas fornecidas pelos sensores de luminosidade em função do tempo.

Dois valores foram definidos a partir das informações do gráfico anterior e introduzidos no código de programação do microcontrolador.

Como foi constatado que o sinal do sensor LDR2 apresentava-se com maior frequência 12 unidades menor que o sinal do sensor LDR1 para mesmos níveis de radiação devido a imperfeições entre eles, então, logo após a conversão dos sinais pelo ADC foi feita essa compensação no código de programação do microcontrolador. Desta forma, logo após a conversão dos sinais foram somadas 12 unidades ao sinal do sensor LDR2 para se fazer a compensação.

Como além do valor de 12 unidades também foram observadas diferenças de 11, 13 e 14 unidades, foi definida uma constante $D = 2$ referente à diferença entre os sinais dos sensores para que o concentrador permanecesse parado e proporcionando desta forma estabilidade ao equipamento.

Esta análise é específica para estes dois sensores. Portanto, sempre que novos sensores forem utilizados uma nova análise deve ser feita para a definição dos parâmetros para a compensação na diferença nos sinais.

3.6 Funcionamento do Concentrador Cilíndrico-Parabólico

O método de rastreamento ativo do sol exige a utilização de sensores para se buscar os maiores níveis possíveis de radiação solar. Para se realizar este trabalho, optou-se pela utilização de dois resistores que variam sua resistência elétrica à medida que se varia a intensidade da luminosidade sobre eles. Estes resistores são LDR ou fotoresistores. A Figura 3.18 mostra o módulo de sensores de luminosidade utilizado neste trabalho.



Figura 3.18 - Módulo de sensores de luminosidade.

Outros dois sensores limitadores de movimento colocados no início e no fim do deslocamento do concentrador ao longo do dia foram utilizados neste projeto. Estes sensores foram chamados de FDC1 e FDC2. A Figura 3.19 mostra os sensores limitadores de movimento.



Figura 3.19 - Sensores limitadores de movimento.

Os dois sensores de luminosidade, chamados de LDR1 e LDR2, são responsáveis por determinar para qual direção o concentrador deve se deslocar de

acordo com os níveis de radiação solar.

A superfície fotossensível do LDR1 encontra-se inclinada para a mesma direção onde se encontra instalado o sensor FDC1 (nascente) e a superfície fotossensível do sensor LDR2 encontra-se inclinada para o poente assim como com o sensor fim-de-curso FDC2.

Em dias de céu claro, ao final do dia, o concentrador toca o sensor limitador de movimento FDC2. Ao acontecer o toque, o microcontrolador avalia os níveis de radiação solar presentes. Considerando que no circuito divisor de tensão o nível de radiação é inversamente proporcional à tensão elétrica, definiu-se o valor máximo de tensão, ou seja, a tensão de referência do microcontrolador (1023 após a conversão analógico-digital) para o período noturno.

Constatando-se a ausência de radiação solar, o concentrador é posicionado na posição horizontal (posição de meio-dia). Optou-se pela permanência do concentrador nesta posição durante a noite porque desta forma, a superfície refletora não impede que o vento atinja o tubo adsorvedor aumentando a transferência de calor. Outro motivo para a permanência nesta posição é que os esforços na estrutura metálica do concentrador e na caixa de redução do motor devido à ação do vento e do próprio peso do concentrador são reduzidos. Após ser feito este posicionamento, o microcontrolador permanece no modo *standby*.

Ao amanhecer, o sistema torna-se ativo ao constatar que o valor da tensão lida no circuito divisor de tensão é menor que o valor da tensão de referência (1023 após a conversão analógico-digital). A partir desse momento já se inicia o rastreamento solar, não sendo necessária uma programação específica para posicionar o concentrador.

Chegando na posição inicial do rastreamento, a superfície refletora toca o sensor fim-de-curso FDC1. Ao acontecer o toque, é acionada a rotina de interrupção para este comando no código de programação do microcontrolador para fazer com que o concentrador pare de girar, embora permaneça lendo as tensões fornecidas pelos sensores de luminosidade. Neste caso, ele permanece parado até que a tensão lida no LDR2 seja menor do que a tensão lida no LDR1.

A Figura 3.20 mostra o fluxograma da rotina do código de programação do microcontrolador responsável apenas por realizar o rastreamento.

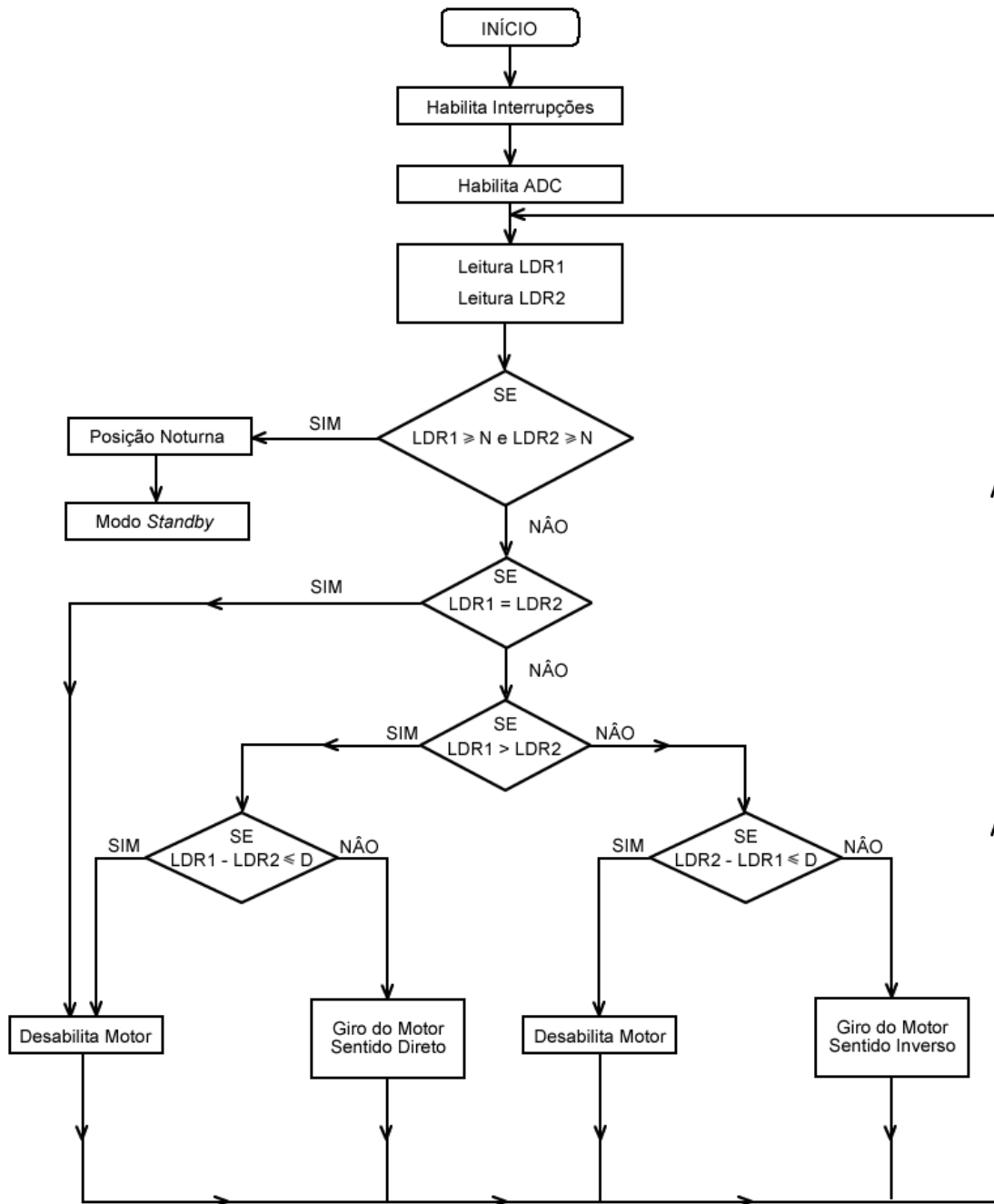


Figura 3.20 - Fluxograma da rotina do código de programação do microcontrolador responsável apenas por realizar o rastreamento.

No fluxograma anterior, o primeiro bloco condicional que sucede às leituras dos LDR tem a função de verificar se já anoiteceu através dos níveis de radiação nos sensores LDR1 e do LDR2. Neste momento, a tensão de saída lida no circuito divisor de tensão dos sensores está muito próxima da tensão de referência. O valor de $N = 1023$, referente à ausência de radiação solar, foi definido anteriormente através de experimento.

A partir do segundo bloco condicional inicia-se o rastreamento propriamente dito através de comparações feitas entre as tensões fornecidas pelos sensores LDR1 e LDR2. A variável $D = 2$ que aparece em alguns blocos condicionais foi definida anteriormente através de experimento.

No código de programação do microcontrolador, além da rotina de rastreamento, existem as rotinas de interrupções dos dois sensores limitadores de movimento FDC1 e FDC2 e a rotina para posicionar o concentrador na posição horizontal ao anoitecer colocando-se o sistema no modo *Standby*.

A Figura 3.21 mostra o fluxograma da rotina das interrupções externas do sistema provocadas pelos sensores FDC1 e FDC2.

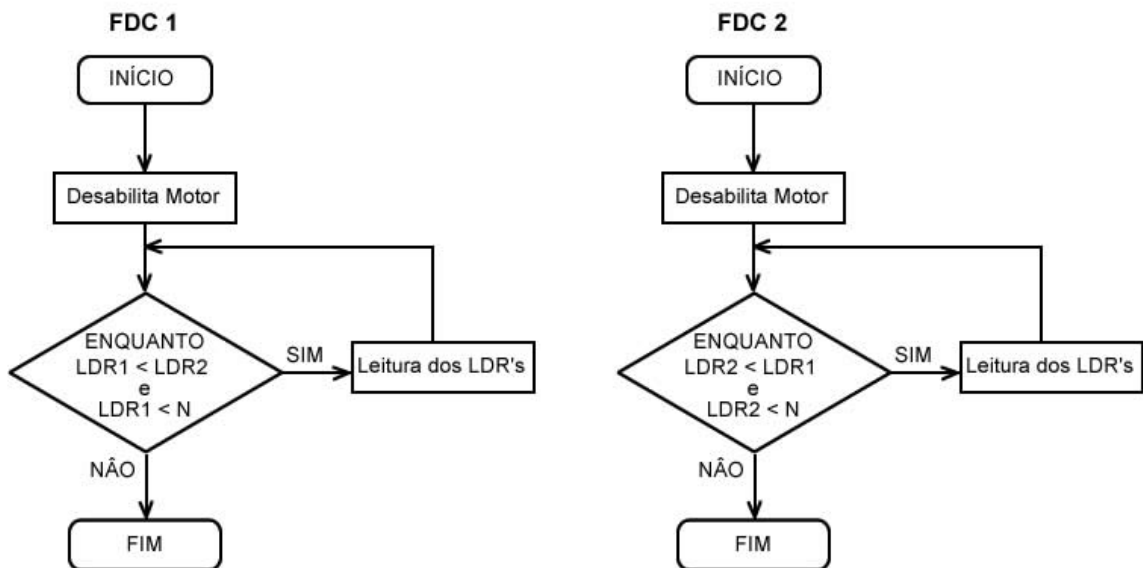


Figura 3.21 - Fluxograma da rotina das interrupções externas do sistema provocadas pelos sensores FDC1 e FDC2.

Observa-se no fluxograma da rotina de interrupção do FDC1 que há um bloco condicional que engloba apenas a leitura dos sensores de luminosidade. Esse *loop* tem a função de evitar que o motor continue girando quando o sensor FDC1 for tocado e quando o nível de radiação do LDR1, que está inclinado para o mesmo lado, permanecer maior que no LDR2. Uma rotina semelhante é utilizada para o sensor FDC2 associado ao LDR2.

A Figura 3.22 mostra o fluxograma da rotina de posicionamento do concentrador durante a noite.

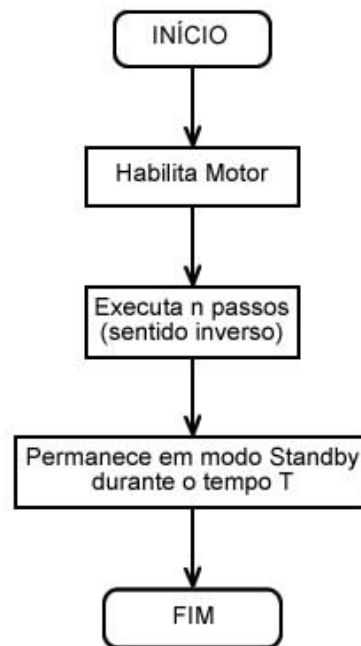


Figura 3.22 - Fluxograma da rotina de posicionamento do concentrador durante a noite.

Considerando o passo do motor de $1,8^\circ$, a caixa de redução de 750:1 e a redução que há também entre a engrenagem do motor e a polia fixa na estrutura parabólica, teve-se que fazer a contagem do número de passos necessários para colocação da parábola na posição horizontal partindo-se da posição de poente. Esta contagem foi feita utilizando-se mais uma vez o *display* LCD. Foi então definido o número $n = 37000$ de passos necessários para realização desta tarefa.

Para o período de permanência no modo *standby* de funcionamento do microcontrolador, foi definido o tempo de 10 horas considerando que a ausência total de radiação solar sobre os sensores inicia-se às 19h00min e a detecção de algum nível de radiação solar, ocorre às 5h00min.

4. APARATO EXPERIMENTAL

Anderson (1983) apresenta algumas equações para determinação da razão de concentração do concentrador cilíndrico-parabólico

A orientação de um elemento refletivo localizado em uma posição geral (x,y) e a distância L do ponto focal podem ser encontradas através da geometria da Figura 4.1.

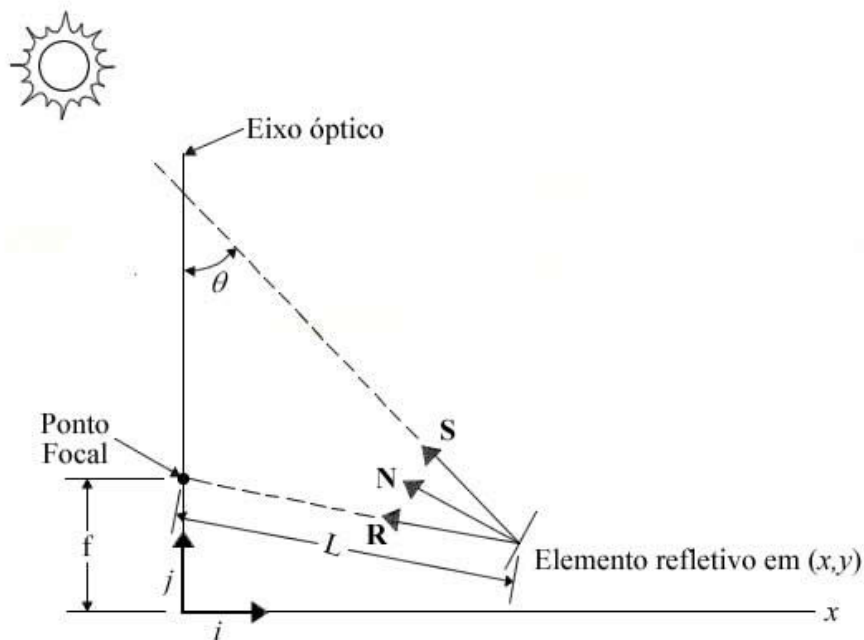


Figura 4.1 – Um típico elemento refletivo em um concentrador parabólico. (Fonte: adaptado de ANDERSON, 1983).

Considerando o caso bidimensional onde os raios solares incidem formando um ângulo θ com o eixo y , a distância L pode ser determinada por:

$$L = [x^2 + (f - y)^2]^{1/2} \quad (4.1)$$

No qual,

L é a distância do elemento refletivo ao ponto focal;

x e y são os valores da coordenada (x,y) do elemento refletivo;

f é a altura do ponto focal.

Uma vez que o Sol não é um ponto e os raios solares ao atingirem a superfície refletora formam um ângulo de $32''$ ($0,0093$ radianos), a imagem produzida pelo concentrador terá uma largura de w_i como mostrado na figura 4.2. Como o ângulo é pequeno, a aproximação $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$ é válida, então a largura da imagem em função da coordenada y é dada por:

$$w_i = 0,0093[4fy + (f - y)^2]^{1/2} \quad (4.2)$$

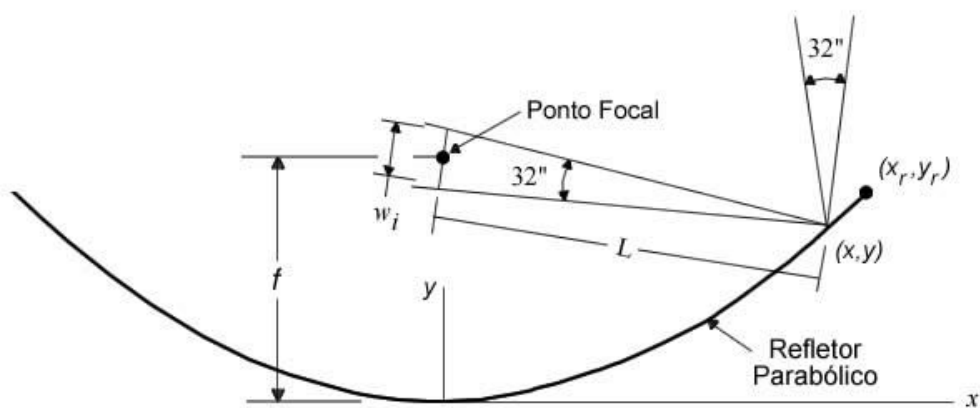


Figura 4.2 – Imagem formada por um concentrador parabólico. (Fonte: adaptado de ANDERSON, 1983).

Um elemento refletivo da parábola localizado no ponto ($y = y_r$) produz uma imagem de largura

$$w_{i,r} = 0,0093y_r[4\alpha + (\alpha - 1)^2]^{1/2}, \text{ em que } \alpha = f/y_r \quad (4.3)$$

Para o coletor de tubo circular, a razão de concentração $C = A_a/A_r$ é igual a $2x_r/w_{i,r}$, ou

$$C = \frac{4}{0,0093\pi} \left[\frac{\alpha}{4\alpha + (\alpha - 1)^2} \right]^{1/2} \quad (4.4)$$

Utilizando-se os valores das dimensões reais do concentrador cilíndrico-parabólico como visto na Figura 4.3 na qual foi anexado o sistema de rastreamento, obteve-se a razão de concentração igual a 36.

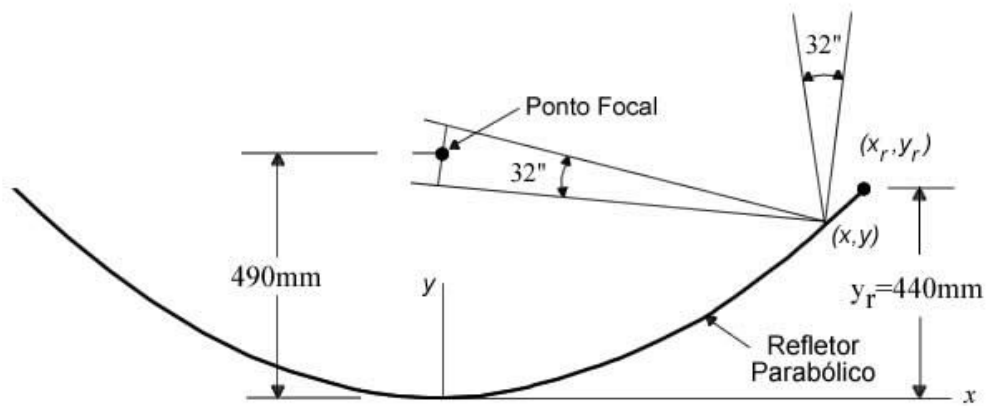


Figura 4.3 – Dimensões reais do concentrador cilíndrico-parabólico necessárias para determinação da razão de concentração.

4.1 Montagem do Concentrador Cilíndrico-Parabólico

Para verificar a eficiência do sistema de rastreamento, o concentrador parabólico do Laboratório de Energia Solar e Gás natural – LESGN, que antes era operado manualmente, foi adaptado para receber o sistema de rastreamento. A área de abertura da superfície refletora é de $3,6\text{m}^2$. A Figura 4.4 mostra o concentrador parabólico utilizado neste projeto.



Figura 4.4 - Concentrador Parabólico adequado para receber o sistema de rastreamento.

O mecanismo utilizado para mover o concentrador foi desenvolvido por Ebert (2004), e é formado por uma polia fixa, uma corrente e duas molas de tração. O uso das molas neste caso é fundamental para amortecer os esforços causados pelo vento e agravados pelo peso do concentrador, evitando o rápido desgaste das engrenagens da caixa de redução acoplada ao motor de passo.

A Figura 4.5 mostra o módulo de sensores de luminosidade fixado na parte superior, paralelo ao plano da abertura da superfície refletora.

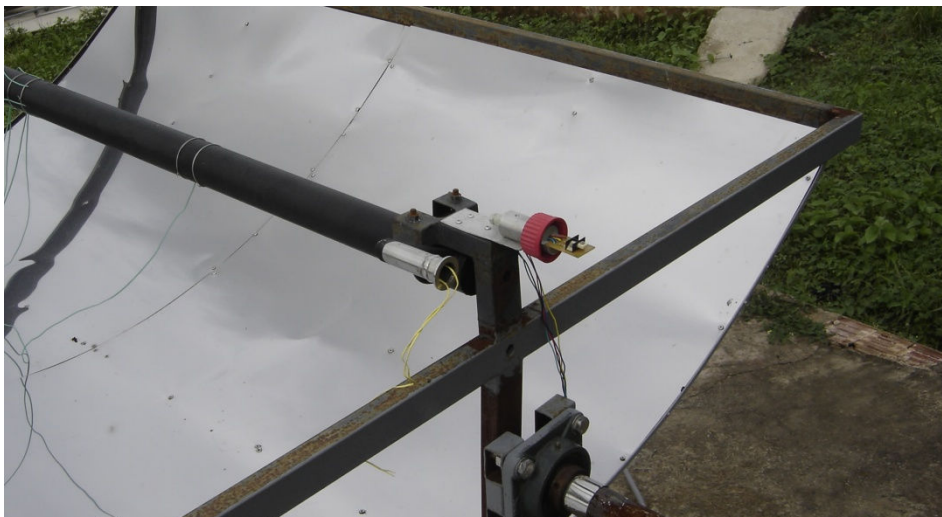


Figura 4.5 - Fixação do módulo de sensores de luminosidade.

A Figura 4.6 mostra os sensores limitadores de movimento fixados na estrutura parabólica do concentrador.



Figura 4.6 - Sensores limitadores de movimento fixados na estrutura do concentrador.

A Figura 4.7 e a Figura 4.8 mostram, respectivamente, o esquema do mecanismo de acionamento e o mecanismo já montado no concentrador solar parabólico.

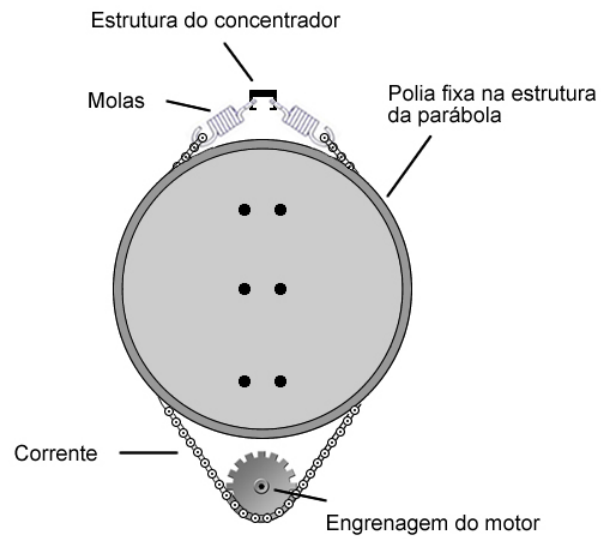


Figura 4.7 – Esquema do mecanismo de acionamento.

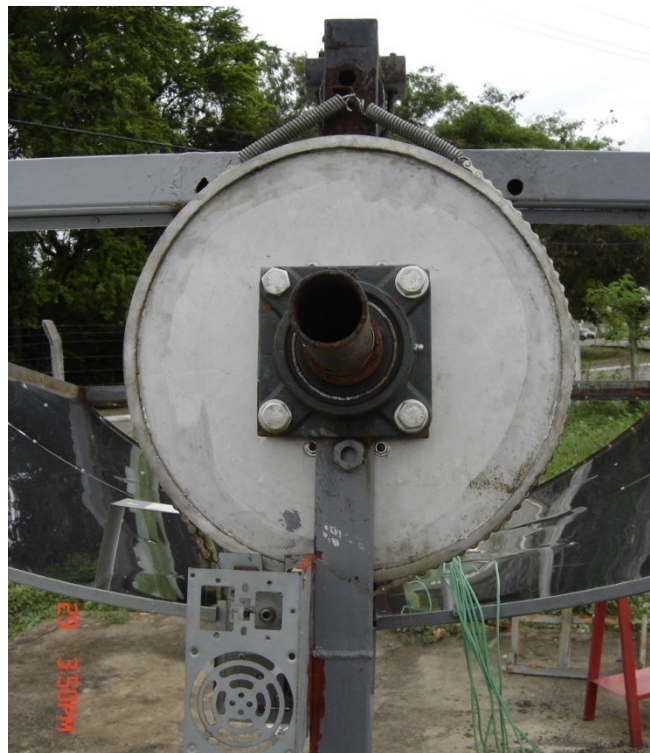


Figura 4.8 - Mecanismo de acionamento com as duas molas de tração, a polia fixa e uma corrente.

A Figura 4.9 mostra o motor de passo bipolar acoplado a um conjunto de

redução para aumento do torque. As informações relativas a este motor encontram-se no Anexo F.



Figura 4.9 - Motor de passo bipolar acoplado a um conjunto de redução para aumento do torque.

4.2 Código de Programação do Microcontrolador ATmega8 em Linguagem Basic

a) Declaração de variáveis:

Dim X As Integer , Y As Integer , D1 As Integer , D2 As Integer, A As Integer:

variável X: valor da tensão no sensor LDR1 após a conversão AD;

variável Y: valor da tensão no sensor LDR2 após a conversão AD;

variável D1: valor da diferença entre X e Y se $X > Y$

variável D2: valor da diferença entre Y e X se $Y > X$.

variável A: variável utilizada em *loops* ao longo do código;

b) Processo de leitura dos sinais dos sensores de luminosidade e atribuição de valores às variáveis:

Start Adc: inicia-se o processo de conversão analógico-digital;

$X = \text{Getadc}(0)$: X recebe o valor da tensão no sensor LDR1. A leitura deste sensor é feita através do canal ADC0 do conversor AD;

$Y = \text{Getadc}(1) + 12$: Y recebe o valor da tensão no sensor LDR2. A leitura deste sensor é feita através do canal ADC1 do conversor AD e faz a compensação dos sinais;

Stop Adc: finalize o processo de conversão analógico-digital.

c) Comparação entre as tensões nos sensores LDR1 e LDR2:

If X And Y < 1023: o rastreamento permanece ativo apenas enquanto houver radiação solar incidindo sobre os sensores;

If X > Y Then: compara os valores;

D1 = X - Y: a variável D1 recebe o valor da diferença dos sinais se a tensão em LDR1 for maior do que em LDR2;

d) Verificação da magnitude da diferença entre os sinais dos sensores de luminosidade:

If D1 <= 2 Then: verifica se as diferenças entre os sinais dos sensores é menor ou igual a 2. Caso a condição seja satisfeita, o motor permanece parado;

Habilita_motor = 0: motor permanece desabilitado;

e) Habilitação e giro do motor:

Else: caso a diferença entre os sinais após a compensação seja maior que 2, o motor é habilitado;

Habilita_motor = 1: motor é habilitado para executar o número de passos definidos pelo oscilador;

Passo = 0: motor gira em modo de passo completo

Sentido = 0: motor gira no sentido direto

For I = 0 To 20: loop para execução de 20 passos consecutivos antes da próxima leitura dos sensores;

Clock = 1: pino do oscilador é colocado em nível alto;

Waitus 100: geração de onda quadrada com período de 100µs;

Clock = 0: pino do oscilador é colocado em nível baixo;

Waitus 100

Next A: fecha o *loop*.

A rotina para o valor de tensão de LDR2 maior que LDR1 é similar ao que foi apresentado anteriormente.

f) Subrotina de interrupção causada pelo toque no sensor fim-de-curso FDC1:

While Y > X: enquanto os níveis de radiação em LDR1 for maior do que em LDR2 o motor permanece parado e a execução do programa permanece dentro do *loop while* até que ;

Start Adc

X = Getadc(0)

Y = Getadc(1) + 12

Stop Adc

Wend

Return

A subrotina de interrupção para o sensor fim-de-curso FDC2 é similar ao que foi apresentado anteriormente para o sensor FDC1. O código de programação em linguagem *Basic* completo para o microcontrolador ATmega8 se encontra disponível no Apêndice B.

5 RESULTADOS

A operação do sistema de rastreamento foi verificada analisando-se a distribuição de temperatura na superfície externa do tubo adsorvedor. Termopares foram fixados radialmente e axialmente no tubo. As propriedades físicas da substância utilizada para fixação dos termopares encontram-se disponível na Tabela B.1. Os termopares utilizados são do tipo K (níquel - cromo) com faixa de operação entre -270°C e 1.372°C , com saída analógica entre $6,458\text{mV}$ e $54,886\text{mV}$.

Cinco termopares foram colocados na parte inferior do tubo que recebe a radiação solar concentrada refletida pela superfície parabólica. Outros três termopares foram colocados na parte superior do tubo que não recebem a radiação solar concentrada. Os termopares foram calibrados para a temperatura de 100°C . A Figura 5.1 e a Figura 5.2 mostram, respectivamente, a forma como os termopares foram dispostos axialmente e radialmente em uma seção transversal do adsorvedor.

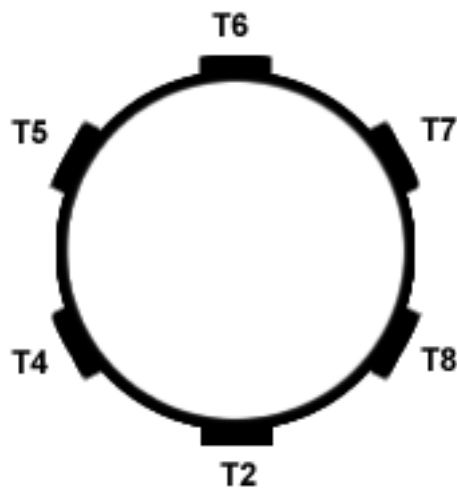


Figura 5.1 - Disposição dos termopares axialmente no tubo adsorvedor.

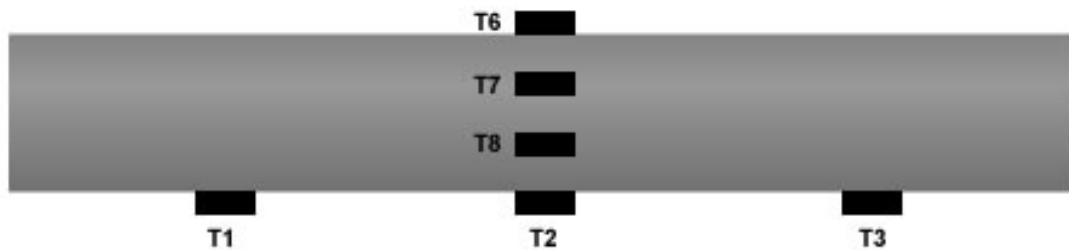


Figura 5.2 - Disposição dos termopares radialmente no duto adsorvedor.

A Figura 5.3 mostra os termopares do tipo K fixados na superfície externa do tubo adsorvedor.



Figura 5.3 - Termopares fixados na superfície externa do tubo adsorvedor.

O comportamento do concentrador foi analisado em duas situações diferentes: rastreamento ativo em dia de céu aberto e rastreamento ativo em dia com muitas nuvens no céu.

Através de análise visual observou-se que a temperatura medida através de um equipamento *data logger* Datatrap v1.0 no tubo adsorvedor caía bastante à

medida que a velocidade do vento aumentava. Em virtude disto, além dos níveis de radiação, a análise de distribuição de temperatura no tubo adsorvedor foi feita levando-se em consideração os dados relativos à velocidade do vento.

5.1 Medição de temperatura no tubo com rastreamento

A Figura 5.4 mostra um gráfico com a curva de velocidade do vento, de distribuição de temperatura no tubo adsorvedor e de radiação com rastreamento ativo em dia de céu com muitas nuvens. Os dados apresentados são médias de dois minutos.

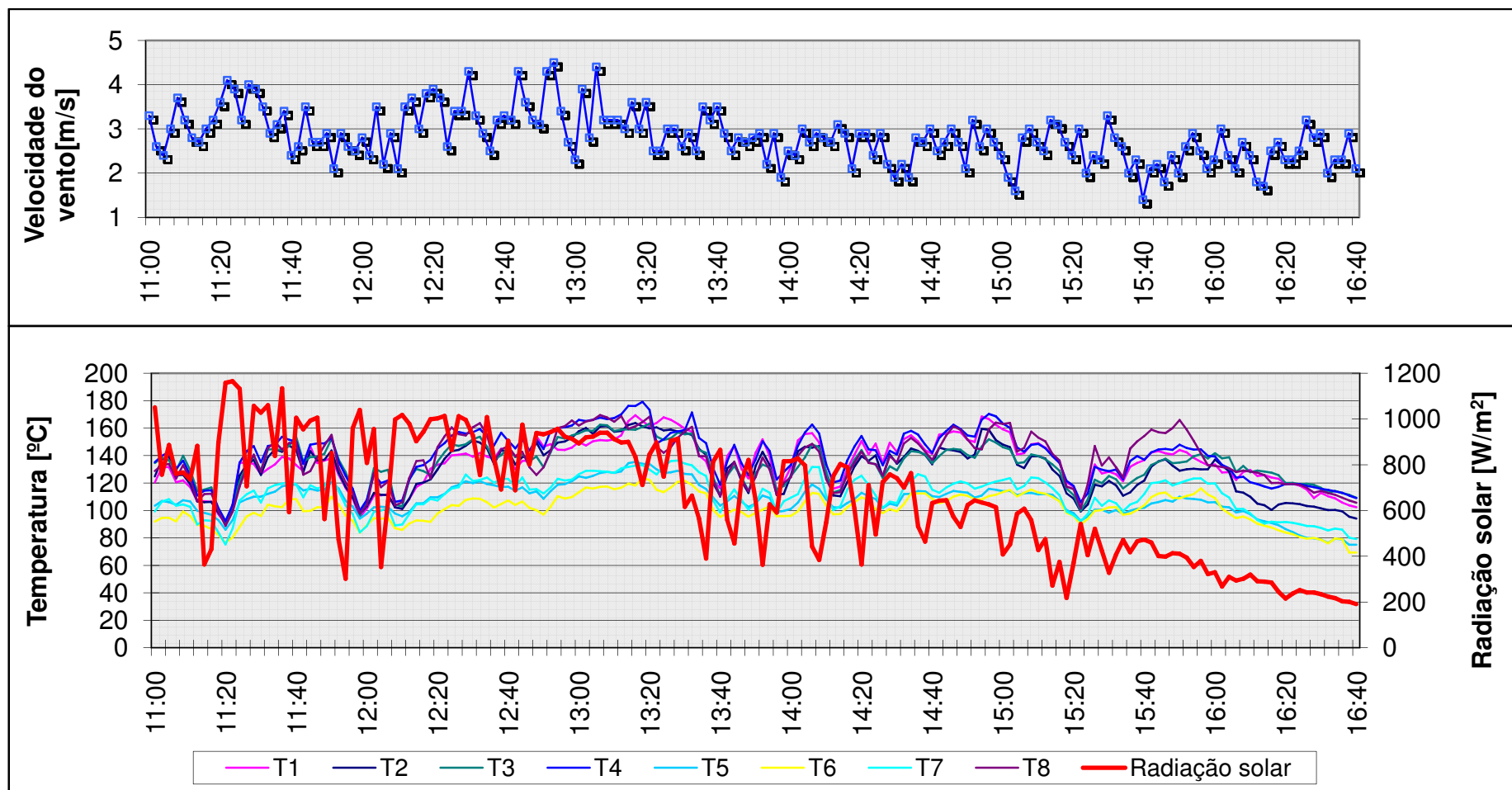


Figura 5.4 - Curva de velocidade do vento, de distribuição de temperatura no tubo adsorvedor e de radiação com rastreamento ativo em dia de céu com muitas nuvens.

No gráfico de distribuição de temperatura no tubo adsorvedor, dois grupos de curvas de temperatura são observadas. O primeiro grupo, com valores mais elevados, é formado por curvas de temperatura referente aos termopares colocados em posições no tubo que estão sob influência direta da radiação solar concentrada. Neste grupo foram medidas temperaturas de até 186°C, obtendo-se temperatura média até 182°C. Este grupo é formado pelas curvas de temperatura T1, T2, T3, T4 e T8.

O segundo grupo, com valores mais baixos, é formado por curvas de temperatura referente aos termopares colocados em posições no tubo que não são alcançados pela radiação solar concentrada. Neste grupo foram medidas temperaturas de até 137°C, obtendo-se temperatura média até 135°C. Este grupo é formado pelas curvas de temperatura T5, T6 e T7.

A partir de 14h20min, aproximadamente, verifica-se a influência da velocidade do vento na redução da temperatura em todos os pontos de medição. A velocidade do vento não se reduz muito, porém, à medida que a superfície refletora vai virando para o Oeste, o vento vai sendo impedido cada vez mais de atingir diretamente o tubo adsorvedor, diminuindo a perda de calor por convecção.

Com a redução da radiação solar devido à passagem de nuvens observa-se que todas as curvas de temperatura ficam muito próximas. Isto acontece porque todos os pontos de medição de temperatura passam a estar sob influência apenas da radiação solar difusa.

A Figura 5.5 mostra um gráfico com a curva de velocidade do vento e de distribuição de temperatura no tubo adsorvedor em função do tempo. Os dados apresentados são médias de dois minutos.

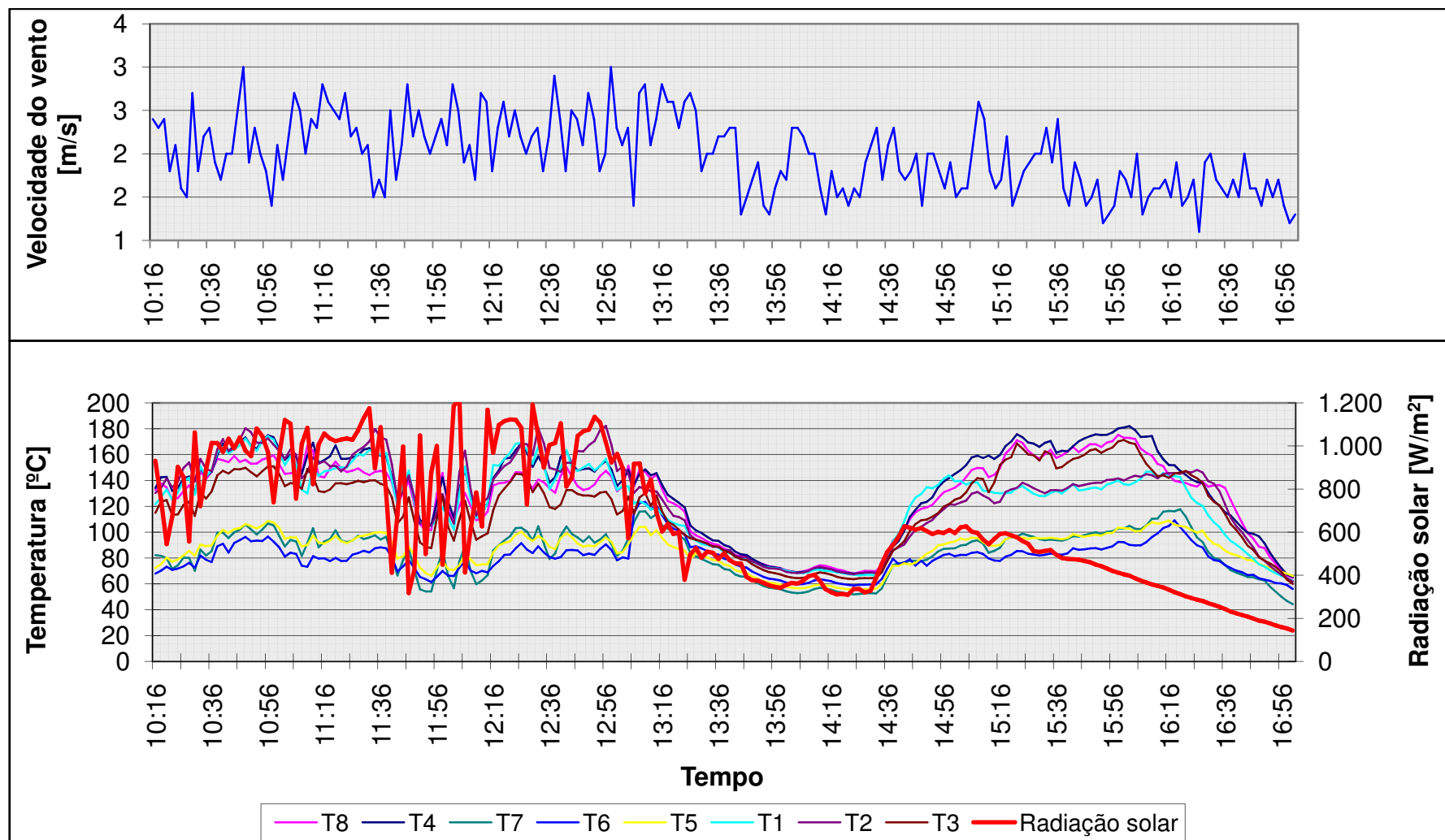


Figura 5.5 - Velocidade do vento, radiação solar e distribuição temperatura em função do tempo com parte do dia com céu claro.

No gráfico da Figura 5.5, de 13h15min as 14h45min, aproximadamente, o céu esteve nublado com níveis de radiação solar em torno de 400W/m^2 . Depois de 14h45min o céu permaneceu claro com níveis de radiação acima de 600W/m^2 . Neste período observa-se claramente a redução da influência do vento devido à barreira formada pela parábola.

Analisando-se a diferença entre as medições de temperaturas realizadas por meio de termopares colocados ao longo da superfície externa do tubo adsorvedor radialmente e axialmente. E, considerando-se que nos pontos que estavam sob influência direta da radiação solar concentrada foram constatadas diferenças de mais de 50°C em alguns momentos durante o dia de céu claro em relação aos pontos não atingidos diretamente pela concentração da radiação, conclui-se que o sistema de rastreamento dos melhores níveis de radiação solar mostra-se operante para captação da radiação solar direta.

6. CONCLUSÃO

O objetivo do projeto de fabricação da placa de controle e a montagem do módulo de sensores de luminosidade foram alcançados satisfatoriamente, visto que o custo deste sistema é apropriado para o concentrador parabólico de pequeno porte e de baixo custo no qual ele foi instalado. Além disso, a temperatura máxima obtida de 186 °C supera a temperatura de dessorção do sistema de refrigeração sílica-água.

Em relação aos sensores fotoresistores pode-se concluir que, através da análise do tipo de curva de resistência elétrica em função da radiação solar, do tempo de resposta às mudanças dos níveis de radiação solar devido à passagem de nuvens e da compensação necessária para os sinais dos sensores, estes dispositivos podem substituir outros de custo mais elevado como pequenas células fotovoltaicas.

Quanto ao microcontrolador AVR ATmega8 utilizado, apesar de oferecer mais recursos do que o necessário para este projeto pode-se dizer que o seu uso é aceitável dado o seu baixo custo, tamanho reduzido, implicando na simplificação da placa de controle, e velocidade de processamento.

Quanto ao sistema de transmissão de movimento, deve-se ressaltar que este sistema de controle foi desenvolvido por EBERT (2004) para ser utilizado com um dispositivo auto-travante. Neste caso, a caixa de engrenagem acoplada ao motor de passo bipolar é capaz, devido à elevada relação de redução, de evitar que a parábola deslize enquanto o motor permanece desabilitado.

Através das medições de velocidade do vento de Leste para o Oeste juntamente com as medições de radiação solar pode-se concluir que, embora haja altos níveis de radiação solar presentes, o vento é um fator determinante para limitação de temperatura na superfície externa do tubo. Por outro lado, quando a superfície refletora começa a girar para o Oeste, ela vai funcionando como uma barreira que não permite que boa parte do vento atinja a superfície externa do tubo adsorvedor fazendo com que a temperatura permaneça elevada mesmo ao entardecer como é mostrado nos gráficos dos resultados.

Portanto, pode-se concluir que é possível utilizar os dispositivos e equipamentos utilizados para se desenvolver um sistema de controle para concentradores parabólicos de baixo custo aplicados à refrigeração cujo adsorvedor é o próprio tubo de foco da parábola.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMAN, A. S. E. - *Journal of the Royal Society of Arts*, abril, 538p, 1915. apud FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F. **Energia Solar – Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotermelétrica e Fotovoltaica**. Recife: Editora Universitária – UFPE, 1995

ACKERMAN, A. S. E. - *The Society of Engineering, Transactions*, 81p, 1914. apud FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F. **Energia Solar – Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotermelétrica e Fotovoltaica**. Recife: editora Universitária – UFPE, 1995

ANDERSON, Edward E., *Fundamentals of Solar Energy Conversion*. Lincoln, Nebraska. 1983

ATMEL, *ATmega8 and ATmega8L 8-bit with 8K Bytes In-System Programmable Flash*, Datasheet, 2004.

ATMEL, *AVR446: Linear speed control of stepper motor*, Application Note, 2006.

COOPER, P. L. *The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills*. *Solar Energy*, 12, 3, 1969. Apud DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2. Madison: John Wiley e Sons, Inc. 1980.

DALLY, J. W., RILLEY, W. F., McCONNEL, K. G., *Instrumentation for Engineering Measurements*, 2^a. ed. John Wiley & Sons, Inc., 1993.

Drehtalente mit Wertschöpfung. Schrittmotoren – Elektronik. Catálogo, 2006.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2. Madison: John Wiley e Sons, Inc. 1980

EBERT, M., *Entwicklung eines modularen Parabolrinnenkollektors*, Diplomarbeit, Fachhochschule Aachen. Abteilung Jülich, Solar-Institut Jülich. 2004.

FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F. **Energia Solar – Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotermelétrica e Fotovoltaica**. Editora Universitária – UFPE, 1995.

GADRE, D. V. ***Programming And Customizing The Avr Microcontroller***. McGraw-Hill, Pune, Índia 2001.

IBRAHIM, D. ***Avanced PIC Microcontroller Projects in C: from USB to RTOS with the PIC18F series***. Londres: editora Newnes. 2007.

IQBAL, M. ***An Introduction to Solar Radiation***, Academic Press, Toronto, 1983.
Apud DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. ***Solar Engineering of Thermal Processes***.
2. Madison: John Wiley e Sons, Inc. 1980

KLEIN, S. A. ***Calculation of Monthly Average Isolation on Tilted Surfaces***. *Solar Energy* 19, 325, 1977.

MEINEL, A. B.; MEINEL, M. P. ***Applied Solar Energy***. Reading, Mass-USA, AdisonWesley Pub. Co. 1976. Apud FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F. ***Energia Solar – Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotermelétrica e Fotovoltaica***. Editora Universitária – UFPE, 1995.

NICOLOSI, D. E. C.; BRONZERI, R. B., ***Microcontrolador 8051 com Linguagem C - Prático e Didático***. São Paulo: editora Érical. 2005.

PARAB J. S.; SHELAKE, V. G.; RAJANISH, K. K.; NAIK, G. M. ***Exploring C for Microcontrollers: A Hands on Approach***. Dordrecht. Editora Springer, 2007.

RABL, A. ***Active Solar Collectors and Their Applications***. New York. Oxford University Press. 1985.

STMicroelectronics. ***Stepper Motor Controller L297***. Datasheet. 2001

STMicroelectronics. ***Dual Full-Bridge Driver L298***. Datasheet. 2000

THEKAEKARA, M. P. ***Solar Irradiance, Total and Spectral. Solar Energy Engineering***. Editado por Sayigh, A. A. M. New York: Academic Press. 1977.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Primeira Placa de Controle com o Microcontrolador AT89S52

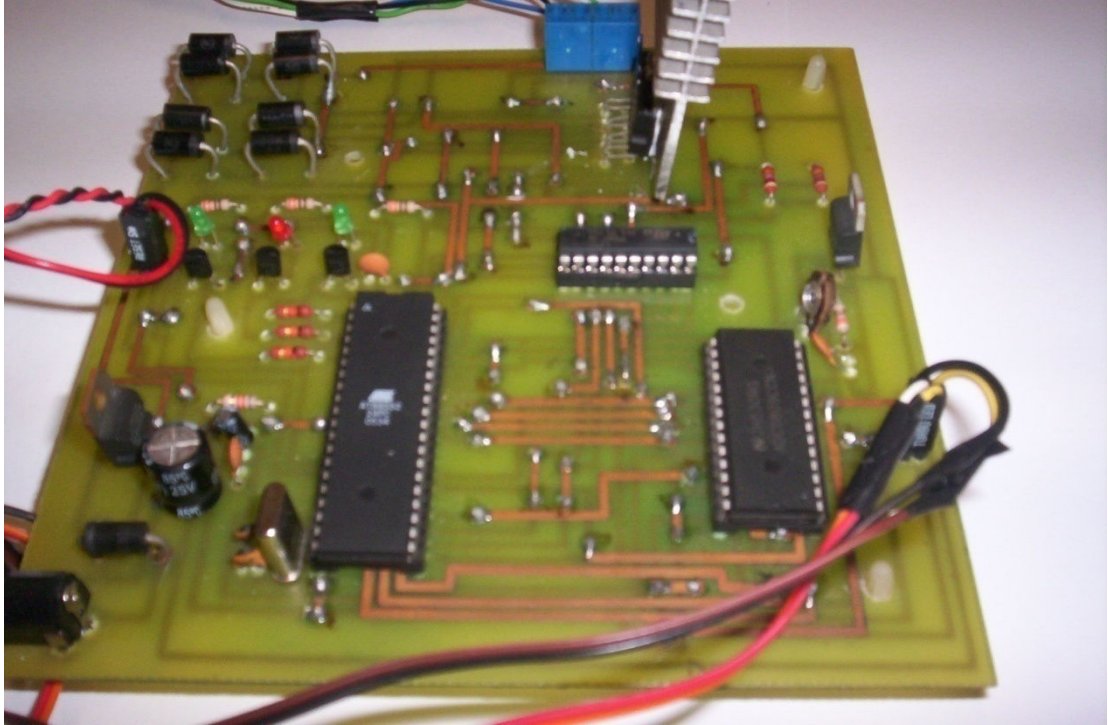


Figura A.1 - Primeira Placa de Controle com o Microcontrolador AT89S52.

APÊNDICE B - Código do Microcontrolador para Leitura dos LDR e Exibição dos Dados no Display LCD.

```
$regfile = "m8def.dat"
```

```
$crystal = 16000000
```

```
Config Adc = Single , Prescaler = Auto , Reference = Avcc
```

```
Dim X As Integer , Y As Integer, I As Byte
```

```
Config Lcdmode = Port
```

```
Config Lcd = 16 * 2
```

```
Config Lcdbus = 4
```

```
Config Lcdpin = Pin , Db4 = Portd.0 , Db5 = Portd.1 , Db6 = Portd.5 , Db7 = Portd.6 ,  
E = Portb.0 , Rs = Portb.1
```

```
Enable Adc
```

```
Do
```

```
Start Adc
```

```
  X = Getadc(0)
```

```
  Y = Getadc(1)
```

```
  Stop Adc
```

```
Lcd "LDR 1=" ; X
```

```
Lowerline
```

```
Lcd "LDR 2=" ; Y
```

```
Wait 2
```

```
Cls
```

```
Loop
```

APÊNDICE C - Código de Programação em Linguagem *Basic* completo do microcontrolador ATmega8

```
$regfile = "m8def.dat"
```

```
$crystal = 16000000
```

```
Config Adc = Single , Prescaler = Auto , Reference = Avcc
```

```
Dim X As Integer , Y As Integer , D1 As Integer , D2 As Integer
```

```
Dim A As Byte , Cont As Byte , T As Integer
```

```
Declare Sub Posicao_noite
```

```
Config Portb = Output
```

```
Habilita_motor Alias Portb.2
```

```
Reset_motor Alias Portb.3
```

```
Passo Alias Portb.4
```

```
Sentido Alias Portb.5
```

```
Clock Alias Ddrd.7
```

```
Config Portd.2 = Input
```

```
Config Portd.3 = Input
```

```
Enable Interrupts
```

```
Config Int0 = Low Level
```

```
Config Int1 = Low Level
```

```
On Int0 Fdc1
```

```
On Int1 Fdc2
```

```
Enable Adc
```

```
Do
```

```
Enable Int0
```

APÊNDICE C (Cont.)

```
Enable Int1
Mcucr = 10010000
Start Adc
  X = Getadc(0)
  Y = Getadc(1) + 12
  Stop Adc
Mcucr = 00010000
If X < 1023 And Y < 1023 Then
  Cont = 0
  If X > Y Then
    D1 = X - Y
    If D1 < 2 Then
      Habilita_motor = 0
      Reset_motor = 1
    Else
      Habilita_motor = 1
      Reset_motor = 1
    Passo = 0
    Sentido = 0
    For I = 0 To 20
      Clock = 1
      Waitus 100
      Clock = 0
      Waitus 100
    Next A
  End If
  Elseif X < Y Then
    D2 = Y - X
    If D2 < 2 Then
      Habilita_motor = 0
      Reset_motor = 1
```


APÊNDICE C (Cont.)

Else

Habilita_motor = 1

Reset_motor = 1

Passo = 0

Sentido = 1

For I = 0 To 20

Clock = 1

Waitus 100

 Clock = 0

Waitus 100

Next A

End If

Loop

End

Fdc2:

Cont = 1

Habilita_motor = 0

Reset_motor = 1

While X < Y

 Mcucr = 10010000

 Start Adc

 X = Getadc(0)

 Y = Getadc(1) + 12

 Stop Adc

 Mcucr = 00010000

Wend

Return

Fdc1:

Habilita_motor = 0

APÊNDICE C (Cont.)

```
Reset_motor = 1
While X > Y
Start Adc
X = Getadc(0)
Y = Getadc(1) + 12
Stop Adc
Wend
Return
```

```
Sub Posicao_noite
T = 10
Habilita_motor = 1
Sentido = 0
If Cont = 1 Then
For I = 0 To 50
Clock = 1
Waitus 100
Clock = 0
Waitus 100
Next I
Habilita_motor = 0
Mcucr = 11100000
Wait T
Mcucr = 01100000
Cont = 0
Else
End If
End Sub
```

ANEXOS

ANEXO A - Variação da constante em função da variação da declinação solar e da passagem do Sol pelo Plano Meridional.

Tabela A.1 - Variação da constante em função da variação da declinação solar e da passagem do Sol pelo Plano Meridional

DATA	Distância Terra-Sol em unidade astronômicas	Constante solar W/m ²	Declinação solar			Passagem pelo Plano Meridiano		
			grau	min.	seg.	h.	min.	seg.
JAN. 1	0,983 34	1339	-23	05	11	12	03	16
4	0,983 32	1399	-22	49	45	12	04	41
FEV. 1	0,985 31	1393	-17	24	08	12	13	32
12	0,987 03	1389	-14	02	51	12	14	17
MAR 1	0,990 97	378	-7	37	00	12	12	21
20	0,995 94	1364	0	11	42	12	07	27
ABR. 1	0,999 41	1355	+4	30	26	12	03	50
4	0,999 98	1353	+5	39	32	12	02	57
MAI. 1	1,007 70	1332	+15	02	57	11	57	03
14	1,010 72	1324	+18	36	18	11	56	17
JUN 1	1,014 13	1316	+22	02	27	11	57	47
21	1,016 30	1310	+23	26	24	12	01	77
JUL. 1	1,016 72	1309	+23	06	54	12	03	49
3	1,016 73	1309	+22	58	07	12	04	12
26	1,015 66	1312	+19	27	28	12	06	27
AGO. 1	1,014 95	1313	+18	02	30	12	06	15
SET. 1	1,009 14	1329	+8	18	55	11	59	54
23	1,003 37	1344	0	02	08	11	52	17
OUT. 1	1,001 07	1350	-3	09	00	11	49	36
5	0,999 89	1353	-4	41	46	11	48	22
NOV. 1	0,992 39	1347	-14	24	01	11	43	37
3	0,991 87	1375	-15	02	01	11	43	36
DEZ. 1	0,98598	1392	-21	47	19	11	49	09
22	0,983 68	1398	-23	26	22	11	58	44

Fonte: THEKAEKARA (1977).

ANEXO B – Propriedades Físicas da Substância Utilizada para Fixação dos Termopares ao Tubo Coletor.

Tabela B.1 - Propriedades da substância responsável pela fixação dos termopares ao tubo coletor.

Cor	incolor
Viscosidade após a mistura	12.000 cps
Tempo de trabalho após a mistura	6-12 mins.
Isolamento elétrico	10^{12} ohms
Coefficiente de expansão térmica (in/in/°F)	51×10^{-6}

Fonte: OMEGABOND® *Epoxy Adhesive User's Guide*.

ANEXO C – Informações Gerais sobre a Tinta Semi-seletiva Utilizada sobre o Tubo Coletor.

Tabela C.1 - Propriedades físicas da tinta semi-seletiva utilizada sobre o tubo coletor.

Volume específico	1,04 g/cm ³
Massa específica	6 m ² /kg
Absortividade	95%
Emissividade	86%
Temperatura de trabalho	-60°C a +250°C

Fonte: <<http://www.transfer-electric.de/solarlack/index.html>>

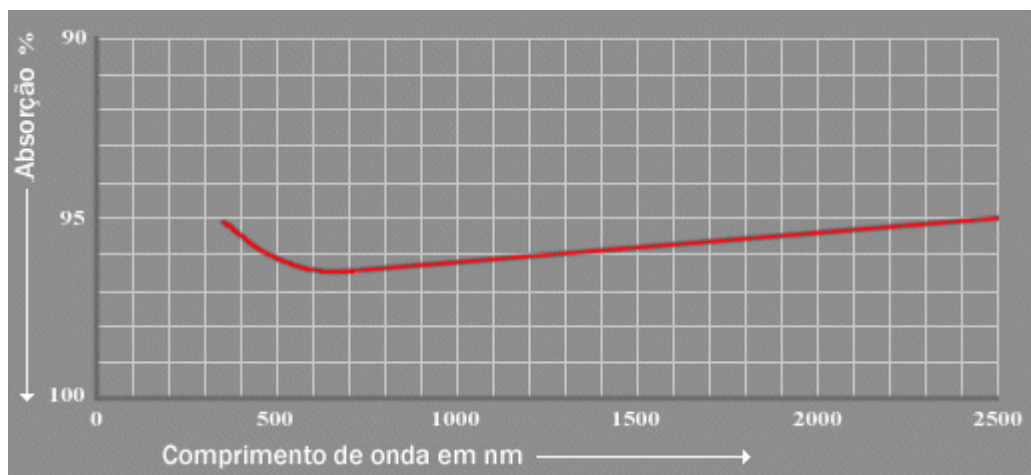


Figura C.2 – Gráfico da Absortividade versus comprimento de onda da tinta semi-seletiva utilizada sobre o tubo coletor.

Fonte: <<http://www.transfer-electric.de/solarlack/index.html>>

ANEXO D – Informações Gerais sobre o CI L297

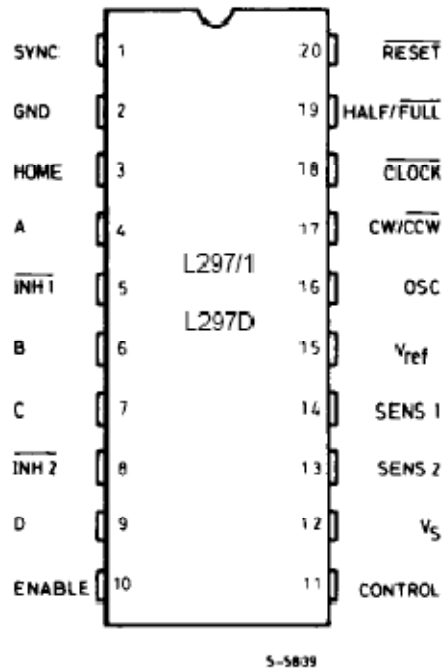


Figura D.1 – Pinagem do circuito integrado L297.

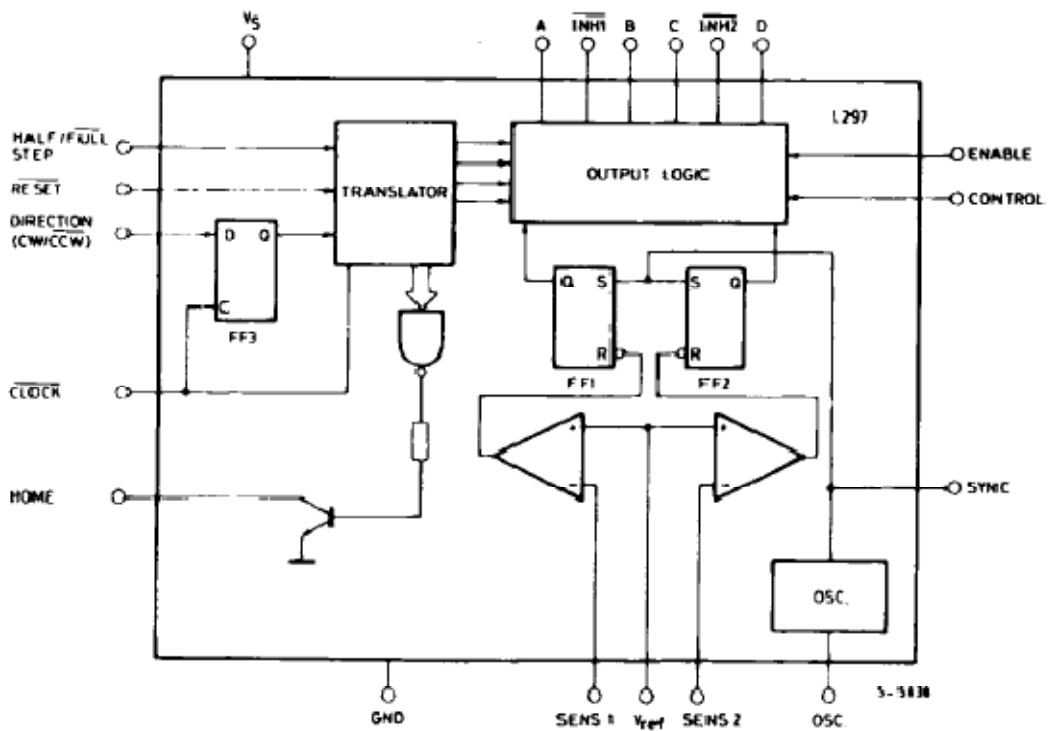


Figura D.2 – Diagrama de blocos do CI L297.

ANEXO E – Informações Gerais sobre o CI L298

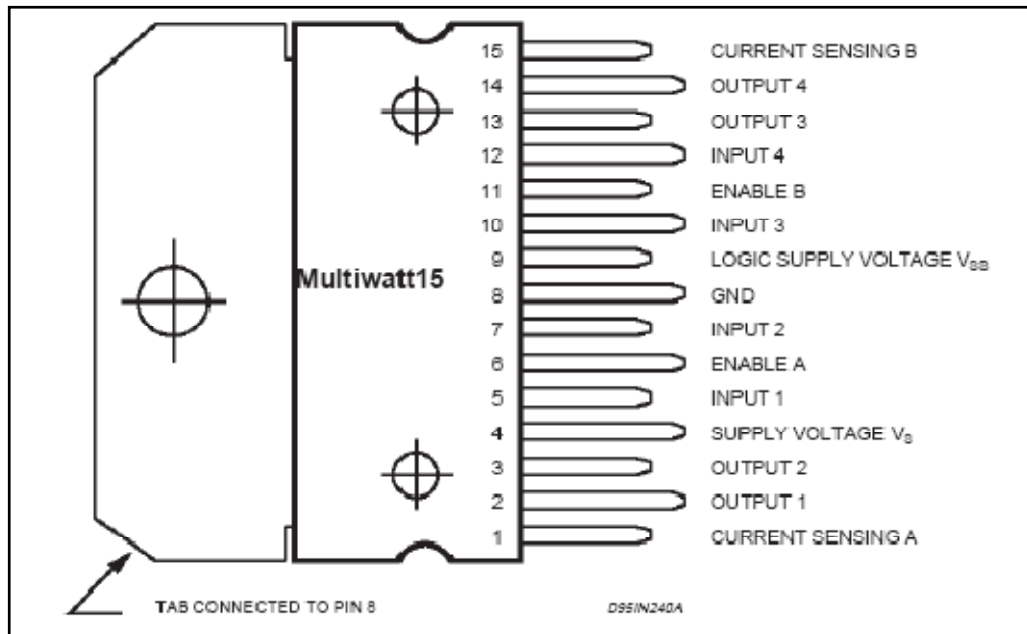


Figura E.1 – Pinagem do CI L298

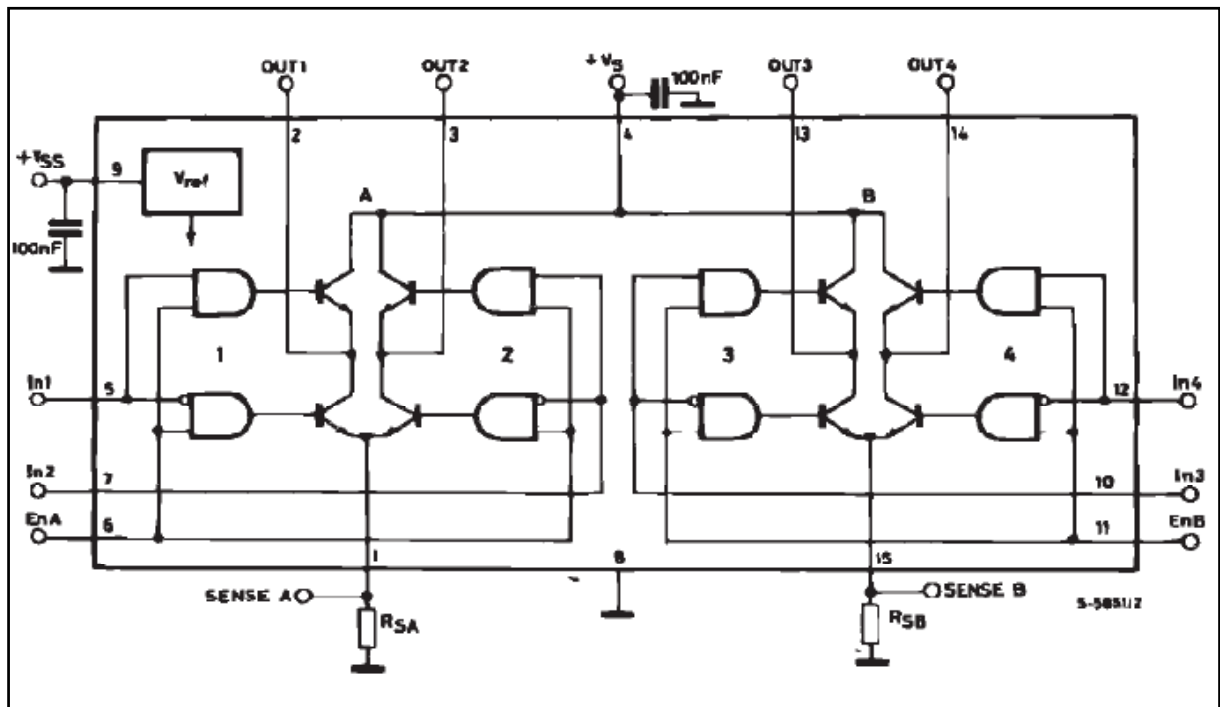


Figura E.2 – Diagrama de blocos do CI L298.

ANEXO F – Informações Gerais sobre o Motor de Passo Bipolar

Tabela F.1 – Especificações técnicas do Motor de Passo Bipolar

Motor de Passo Bipolar SAM 39/200						
Modelo	Modo de Operação	<i> Holding</i> Torque (mNm)	Corrente por fase (A)	Resistência por fase (Ohm)	Indução por fase (mH)	Torque inercial (gcm²)
2200	Bipolar	120	0,50	6	8	30