

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA

GABRIEL DE OLIVEIRA MORAES
ROBERTO MELO DE SOUTO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA
TEMPERATURA EM UM SISTEMA CONCENTRADOR
SOLAR DE PEQUENO PORTE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO
FEVEREIRO - 2014

GABRIEL DE OLIVEIRA MORAES
ROBERTO MELO DE SOUTO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA EM UM
SISTEMA CONCENTRADOR SOLAR DE PEQUENO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso Superior de Engenharia Eletrônica – COELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Tarso Neves Junior

TOLEDO

2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Eletrônica



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso Nº 001

Análise do comportamento da temperatura em um sistema concentrador solar de pequeno porte

por

Gabriel de Oliveira Moraes

Roberto Melo de Souto

Esse Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10:00h do dia **19 de fevereiro de 2014** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Eletrônica**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. M. Ednei Luiz Miotto
(UTFPR-TD)

Prof. Dr. Felipe Walter Dafico Pfrimer
(UTFPR-TD)

Prof. Dr. Paulo de Tarso Neves Junior
(UTFPR-TD)
Orientador

Visto da Coordenação

Prof. M. Rodrigo da Ponte Caun
Coordenador da COELE

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus por nos permitir esta oportunidade e dar força para concluirmos nosso trabalho.

Também agradecemos à nossas famílias por todo o apoio, paciência e compreensão, devido ao tempo dedicado ao trabalho.

Por fim, agradecemos também a todos os profissionais, amigos e professores que contribuíram para o nosso projeto.

RESUMO

MORAES, Gabriel de O.; SOUTO, Roberto de M. **Análise do comportamento da temperatura em um sistema concentrador solar de pequeno porte**. 2014. 120 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica)-Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2014.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema concentrador solar de pequeno porte. O sistema utiliza o mesmo conceito que os já existentes, conhecidos como CSP (Concentrated Solar Power) e utilizados na geração de energia elétrica. Nestes sistemas, basicamente, são utilizados espelhos para refletir a luz solar para um único recipiente com fluido, aquecendo-o e possibilitando, assim, gerar energia através de turbinas a vapor. Contudo, o projeto proposto não abrange a geração de energia elétrica, mas sim, além do desenvolvimento do sistema, obter as curvas de temperatura ao longo do tempo com a variação do volume de água. Isso permitiu analisar a eficiência energética do sistema de pequeno porte.

Palavras-chave: Concentrador solar. Curva de temperatura. Energia solar.

ABSTRACT

MORAES, Gabriel de O.; SOUTO, Roberto de M. **Analysis of temperature behavior in a small size solar concentrator**. 2014. 120 f. Completion of course work (Baccalaureate in Electronic Engineering) – Federal University of Technology – Paraná. Toledo, 2014.

That work presents a development of a small size solar concentrator. The system uses the same concept already existent, known like CSP (Concentrated Solar Power) and used in electrical energy generation. These systems, basically, are used to reflect solar light to a single object with fluid, heating it and allowing generate energy by steam turbines. However, the proposed project do not covers electrical energy generation, instead, beyond of system development, get temperature over time curve with the variation in volume of water. This allowed analyzes the energy efficiency of small size system.

Key-words: Solar concentrator. Temperature curve. Solar Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema geral de funcionamento.....	23
Figura 2 - Parte inferior da estrutura.	24
Figura 3 - Parte superior da estrutura.	25
Figura 4 - Detalhe de fixação do espelho.....	26
Figura 5 - Seguidor solar. Vista 3D e superior.....	31
Figura 6 - Alocação espacial dos objetos.....	38
Figura 7 - Caixa das PCIs.	41
Figura 8 - Esquemático da entrada do MP.....	47
Figura 9 - Esquemático cartão SD.	48
Figura 10 - Esquemático do display LCD.	49
Figura 11 - Esquemático para interface com RS485.....	50
Figura 12 - Esquemático para o controle dos motores de passo.	52
Figura 13 – Ponte H utilizada no circuito de testes.	53
Figura 14 - Esquemático interno do CI L298N.	54
Figura 15 - Esquemático do sensoriamento.....	55
Figura 16 – Esquema interno simplificado do AD627.....	57
Figura 17 - Esquemático para o microcontrolador 1.....	60
Figura 18 - Esquemático para o microcontrolador 2.....	61
Figura 19 - Esquemático para gravação <i>in-circuit</i>	62
Figura 20 – Layout do módulo principal.	63
Figura 21 - Esquemático da entrada do MC.....	68
Figura 22 - Esquemático do microcontrolador do MC.	69
Figura 23 – Layout do módulo controlador.....	70
Figura 24 - Definição das coordenadas X, Y e Z.....	77
Figura 25 - Definição dos ângulos θ e ϕ	77
Figura 26 – Offset de ângulo do seguidor solar.....	78
Figura 27 – Posição dos LDRs no seguidor solar.	79
Figura 28 – Ângulos de incidência e reflexão em um espelho plano.....	82
Figura 29 – Raios incidentes em um espelho plano.....	84
Figura 30 – Soma vetorial dos raios incidentes.....	85
Figura 31 - Distâncias no plano XY.	86
Figura 32 - Distâncias no plano YZ.	86
Figura 33 - Ponto genérico do espaço tridimensional.	87
Figura 34 – Frame RS485.....	88

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Concentrador solar parabólico, Califórnia - EUA.....	18
Fotografia 2 - Concentrador tipo "Fresnel", Liddell - Austrália.....	19
Fotografia 3 - Dish Stirling System, Albuquerque - Novo México.....	19
Fotografia 4 - Torre de potência de Ivanpah, Califórnia - EUA.....	20
Fotografia 5 - Estrutura espelho maior - Visão frontal.....	27
Fotografia 6 - Estrutura espelho maior - Visão lateral.....	27
Fotografia 7 - Estrutura espelho menor - Visão frontal.....	28
Fotografia 8 - Estrutura espelho menor - Visão lateral.....	28
Fotografia 9 - Detalhe da barra de conectores e fim de curso.....	29
Fotografia 10 - Detalhe do contrapeso.....	29
Fotografia 11 - Sustentação do motor - Parte interior.....	30
Fotografia 12 - Sustentação do motor - Parte superior.....	30
Fotografia 13 - Estrutura do Seguidor Solar - Visão frontal.....	33
Fotografia 14 - Estrutura do Seguidor Solar - Visão lateral.....	33
Fotografia 15 - Estrutura do Seguidor Solar - Visão traseira.....	34
Fotografia 16 - Detalhe do fim de curso - inclinação.....	34
Fotografia 17 – Base da estrutura de sustentação da caldeira.....	35
Fotografia 18 – Topo da estrutura de sustentação da caldeira.....	36
Fotografia 19 – Caldeira.....	36
Fotografia 20 - Base em construção.....	39
Fotografia 21 - Base finalizada.....	39
Fotografia 22 - Distribuição espacial - Vista do recipiente.....	40
Fotografia 23 - Distribuição espacial - Vista das caixas.....	40
Fotografia 24 - Estrutura de fixação das PCIs, fundo falso.....	42
Fotografia 25 - PCIs instaladas.....	42
Fotografia 26 – Detalhe do <i>cooler</i> para refrigeração.....	43
Fotografia 27 - Detalhe da entrada dos cabos do Seguidor Solar.....	43
Fotografia 28 – Caixa de passagem antes da instalação.....	44
Fotografia 29 - Caixa de passagem 30 x 30 x 30 cm após a passagem dos cabos.....	44
Fotografia 30 - Detalhe da caixa das fontes (40 x 40 x 12 cm).....	46
Fotografia 31 – Módulo principal – “top view”.....	64
Fotografia 32 – Módulo principal – “bottom view”.....	64
Fotografia 33 – Módulo principal – visão superior.....	65
Fotografia 34 – Módulo principal – vista dos conectores de saída dos motores.....	65
Fotografia 35 – Módulo principal – vista dos conectores de entrada.....	66
Fotografia 36 – Módulo principal – vista do SD card.....	66
Fotografia 37 – Módulo principal – vista dos conectores dos sensores.....	67
Fotografia 38 – Módulo controlador – “top view”.....	71

Fotografia 39 – Módulo controlador – “bottom view”	71
Fotografia 40 – Módulo principal – visão superior.....	72
Fotografia 41 – Módulo principal – vista dos conectores de saída dos motores.	72
Fotografia 42 – Módulo principal – dos componentes do circuito de entrada.....	73
Fotografia 43 – Módulo principal – vista do conector de gravação <i>in-circuit</i>	73
Fotografia 44 – Módulo principal – vista dos conector jack.	74
Fotografia 45 – Dissipadores de temperatura – visão frontal.	75
Fotografia 46 – Dissipadores de temperatura – visão lateral.	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de conversão tensão x temperatura.	92
Gráfico 2 – Volume: 1L. Coleta: 31/01/2014.	94
Gráfico 3 – Volume: 2L. Coleta: 10/01/2014.	95
Gráfico 4 – Volume: 3L. Coleta: 17/01/2014.	95
Gráfico 5 – Volume: 4L. Coleta: 18/01/2014.	96
Gráfico 6 – Volume: 5L. Coleta: 19/01/2014.	97
Gráfico 7 – Volume: 6L. Coleta: 20/01/2014.	97
Gráfico 8 – Volume: 7L. Coleta: 21/01/2014.	98
Gráfico 9 – Volume: 8L. Coleta: 22/01/2014.	99
Gráfico 10 – Volume: 9L. Coleta: 27/01/2014.....	99
Gráfico 11 – Volume: 10L. Coleta: 28/01/2014.....	100
Gráfico 12 – Volume: 10L. Coleta: 06/01/2014.....	103
Gráfico 13 – Volume: 10L. Coleta: 30/12/2014.....	105
Gráfico 14 – Volume: 2L. Coleta: 15/01/2014.....	106
Gráfico 15 – Volume: 5L. Coleta: 19/01/2014. Curva de tendência.....	107
Gráfico 16 – Volume: 10L. Coleta: 28/01/2014. Curva de tendência.....	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Conexão dos cabos dos eletrodutos.	38
Quadro 2 – Características do circuito de amplificação do sinal do termopar.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de acionamento das bobinas.....	54
Tabela 2 – Análise da potência em diversos intervalos de tempo.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS

CSP	Concentrated Solar Power
MC	Módulo Controlador
MP	Módulo Principal
PCI	Placa de Circuito Impresso
SD	Security Digital
SDHC	Security Digital High Capacity
PVC	Policloreto de Vinila
LED	Light Emitter Diode
GND	Ground
TTL	Transistor-Transistor Logical
LDR	Light Dependent Resistor
CI	Circuito integrado
RTC	Real Time Clock
IHM	Interface Homem-Máquina
MCLR	Master Clear
ADC	Analogic to Digital Converter

LISTA DE SÍMBOLOS

θ_S	Ângulo de rotação do sol
ϕ_S	Ângulo de inclinação do sol
θ_E	Ângulo de rotação do espelho
ϕ_E	Ângulo de inclinação do espelho
Q	Quantidade de calor
m	Massa
c	Calor específico
ΔT	Variação de temperatura
P	Potência
Δt	Variação de tempo
\vec{i}	Vetor unitário na direção do eixo x
\vec{j}	Vetor unitário na direção do eixo y
\vec{k}	Vetor unitário na direção do eixo z

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 SISTEMAS CONCENTRADORES DE RAIOS SOLARES.....	18
1.2 PROPOSTA	21
1.3 OBJETIVOS E ESCOPO DO PROJETO	21
2 FUNCIONAMENTO GERAL DO SISTEMA	22
2.1 ESTRUTURA GERAL DE FUNCIONAMENTO	22
2.2 ESTRUTURA FÍSICA.....	23
2.2.1 Estrutura mecânica dos espelhos.....	24
2.2.2 Seguidor Solar	31
2.2.3 CALDEIRA.....	35
2.2.4 ESPAÇO FÍSICO UTILIZADO	37
2.2.5 Quadro das PCs	41
2.2.6 Quadro das fontes	45
3 MÓDULO PRINCIPAL.....	47
3.1 ENTRADA DO CIRCUITO	47
3.2 CARTÃO SD	48
3.3 DISPLAY LCD.....	49
3.4 INTERFACE RS485.....	50
3.5 CONTROLE DO MOTOR DE PASSO	51
3.6 SENSORIAMENTO.....	54
3.6.1 Seguidor Solar	55
3.6.2 Temperatura	56
3.7 MICROCONTROLADORES	59
3.7.1 Microcontrolador 1	60
3.7.2 Microcontrolador 2	61
3.8 GRAVAÇÃO "IN CIRCUIT"	61
3.9 LAYOUT DO MÓDULO PRINCIPAL.....	62
4 MÓDULO CONTROLADOR.....	68
4.1 ENTRADA DO CIRCUITO	68
4.2 MICROCONTROLADOR	68
4.3 LAYOUT DO MÓDULO CONTROLADOR.....	69
5 FIRMWARE	76
5.1 ALGORITMO PARA O SEGUIDOR SOLAR.....	76
5.2 CÁLCULOS DE MOVIMENTO DOS ESPELHOS.....	82
5.3 COMUNICAÇÃO RS485.....	88
5.4 SISTEMA DE ARQUIVOS - SD CARD	90

5.5 SENSORIAMENTO TERMOPAR	91
6 RESULTADOS	93
6.1 VARIANDO O VOLUME DE 1 LITRO ATÉ 10 LITROS	93
6.2 CÁLCULO DE POTÊNCIA.....	101
6.3 OUTRAS ANÁLISES.....	104
7 CONCLUSÃO.....	109
REFERÊNCIAS.....	111
APÊNDICE A – ESTRUTURA MECÂNICA MENOR.....	114
APÊNDICE B – ESTRUTURA MECÂNICA MAIOR.....	115
APÊNDICE C – DETALHES DA PARTE SUPERIOR.....	116
APÊNDICE D – DEMAIS DETALHES.....	117
APÊNDICE E – MÓDULO PRINCIPAL, PARTE I.....	118
APÊNDICE F – MÓDULO PRINCIPAL, PARTE II.....	119
APÊNDICE G – MÓDULO CONTROLADOR.....	120

1 INTRODUÇÃO

Com as constantes crises energéticas atuais e com a visão sustentável crescente nas empresas, o desenvolvimento de tecnologias para o aproveitamento de energias renováveis tem aumentado. Várias destas tecnologias já se encontram presentes no mercado e são utilizadas tanto na indústria quanto em aplicações localizadas (rural e residencial).

O uso de energias renováveis pode em muitos casos levar à redução de custos, já que o preço de combustíveis fósseis, por exemplo, tem aumentado constantemente. Além disso, atualmente é importante para as empresas, devido aos incentivos fiscais, e até mesmo para marketing, desenvolver programas de redução de impacto ambiental.

Os governos têm também incentivado o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis através das empresas, dos programas de desenvolvimento tecnológicos e das universidades.

Quanto ao desenvolvimento acadêmico, não existe dúvida de que aquilo que se busca é que os novos profissionais tenham esta visão e criem soluções pensando também nos aspectos ambientais.

O fato é que, seja por características fiscais, ambientais ou comerciais, a utilização de energias renováveis é tida cada vez mais como um diferencial entre as demais tecnologias existentes.

Nesse contexto, uma das fontes energéticas tidas como promissoras para o futuro é o próprio Sol, pois, além de se tratar de uma fonte abundante no planeta, possui pequeno impacto ecológico comparado aos tipos de geração existentes atualmente.

A utilização da energia solar já está presente em tecnologias como os painéis fotovoltaicos (YAN; ZHOU; LU, 2009), aquecimento de água utilizando coletores convencionais e também geração de energia elétrica através de sistemas concentradores de raios solares.

1.1 SISTEMAS CONCENTRADORES DE RAIOS SOLARES

Para a geração de energia elétrica existem ao menos quatro tipos diferentes de sistemas concentradores solares. Um deles é conhecido como “Solar Trough System”, no qual são utilizadas "calhas" parabólicas que fazem com que os raios solares sejam concentrados ao longo de um tubo que passa pelo foco das calhas refletoras, conforme mostrado na Fotografia 1.



**Fotografia 1 - Concentrador solar parabólico, Califórnia - EUA.
Fonte: Desertec-UK (2013).**

Outro tipo de princípio semelhante é o "Fresnel System", no qual os espelhos direcionam toda a luz para um único tubo mais acima dos espelhos, conforme mostrado na Fotografia 2.



**Fotografia 2 - Concentrador tipo "Fresnel", Liddell - Austrália.
Fonte: Desertec-UK (2013).**

Existe também o "Dish Stirling System", no qual a luz solar é direcionada através de uma superfície côncava para um único ponto, no qual está localizado um sistema conhecido como "Stirling engine", que converte a energia térmica em cinética. Um exemplo é mostrado na Fotografia 3.



**Fotografia 3 - Dish Stirling System, Albuquerque - Novo México.
Fonte: Desertec-UK (2013).**

O último é conhecido como "Solar Tower System". São sistemas que utilizam as chamadas "Torres de Potência" (DUNN; HEARPS; WRIGHT, 2011). Nestes sistemas, os raios solares são direcionados por centenas ou milhares de espelhos planos para o topo de uma torre que contém uma caldeira, assim, o fluido é aquecido formando vapor que é utilizado nas turbinas geradoras de energia elétrica. A Fotografia 4 mostra um sistema de Torre de Potência instalado na Califórnia (EUA).



**Fotografia 4 - Torre de potência de Ivanpah, Califórnia - EUA.
Fonte: BrightSource Energy (2013).**

O primeiro caso é o que possui a tecnologia mais desenvolvida e domina o mercado entre os demais, representando 95% das instalações em operação até o fim de 2011. O segundo e terceiro caso ainda são tecnologias em desenvolvimento e este possui diversas instalações comerciais já desenvolvidas ao redor do mundo (REN21, 2013, p. 44).

Apesar de ser uma tecnologia que iniciou seu desenvolvimento na década de 70 (LODI, 2011, p. 16), os países que dominam o mercado com relação ao potencial de geração são Espanha e EUA, sendo que o primeiro possui um potencial de 1950 MW e o segundo de 507 MW, em operação até 2013 (REN21, 2013, p. 44).

Neste trabalho o foco está nos sistemas CSP de torre de potência, que são sistemas de grande escala e com capacidade de geração considerável. O projeto de Ivanpah, mostrado na Fotografia 4, por exemplo, que está sendo construído no deserto de Mojave - Califórnia, deverá ter capacidade total de geração de 377 MW, fornecendo energia suficiente para suprir 140.000 residências (BRIGHTSOURCE, 2013).

1.2 PROPOSTA

A geração de energia elétrica através dos sistemas CSP já existe desde a década de 70 (LODI, 2011, p. 16), entretanto, o sistema proposto por esse projeto é de pequeno porte e a intenção é realizar o estudo do comportamento da temperatura com a variação do volume de água, possibilitando assim, verificar se este sistema de pequeno porte pode ser aplicado com eficácia, seja na geração de energia elétrica, no aquecimento de água, ou para qualquer outra aplicação.

O sistema proposto utiliza o princípio das torres de potência. São utilizados 10 espelhos de 32 cm x 42 cm, totalizando uma área refletiva de 1,34 m². O recipiente com o fluido (caldeira) possui 32 cm x 42 cm x 10 cm, resultando em um volume máximo de 13,44 L. Nos testes foram utilizados no máximo 10 L de água.

1.3 OBJETIVOS E ESCOPO DO PROJETO

O objetivo do projeto proposto é desenvolver um sistema concentrador solar de pequeno porte, com o controle automatizado dos espelhos, bem como analisar o comportamento da temperatura do mesmo com a variação do volume de água.

Com base neste estudo, projetos futuros poderão ser desenvolvidos, pois, em posse dos resultados, é possível analisar a viabilidade da utilização do sistema para aplicações específicas.

2 FUNCIONAMENTO GERAL DO SISTEMA

Neste projeto optou-se por desenvolver todas as etapas, incluindo projeto de hardware, estruturas mecânicas, firmware e a execução técnica. A seguir estão descritos os componentes do projeto de forma geral.

2.1 ESTRUTURA GERAL DE FUNCIONAMENTO

A intenção durante o desenvolvimento do projeto foi obter um sistema automatizado. Para isso foram pensados dois tipos diferentes de módulos microprogramados: Módulo Principal e Módulo Controlador.

O Módulo Principal (MP) possui as seguintes funções:

- Realizar o sensoriamento de temperatura;
- Realizar o sensoriamento da posição solar;
- Salvar os dados de temperatura;
- Realizar os cálculos de posicionamento para cada um dos espelhos;
- Enviar a informação de posição para cada espelho.

O Módulo Controlador (MC), por sua vez:

- Controlar os motores para posicionamento do espelho;

Haverá no sistema 1 MP e 10 MCs. Cada módulo controlador movimenta um único espelho e é independente dos demais, permitindo assim a inserção ou retirada dos espelhos sem afetar os demais.

O princípio de funcionamento é basicamente o seguinte: O MP possui um sensor chamado de "Seguidor Solar" que encontra as coordenadas angulares da posição solar; ao encontrar estas coordenadas, o MP calcula para cada um dos espelhos, com base nas posições dos mesmos, quais devem ser as coordenadas angulares dos espelhos para que a luz seja toda refletida para a caldeira; então, após isto, os dados são enviados por rede para os MCs, os quais ao receberem as informações movimentam os espelhos para as respectivas posições, fazendo assim com que a maior intensidade solar esteja sempre focada na caldeira. Além disso, simultaneamente, o MP realiza a medição da temperatura dentro da caldeira,

salvando a mesma periodicamente (a cada três minutos) em um cartão de memória SDHC. Ao fim do teste, os dados de temperatura podem ser repassados ao computador e curvas de temperatura são geradas, possibilitando então a análise do comportamento da temperatura neste sistema.

O esquema da Figura 1 ilustra quais as funções de cada módulo.

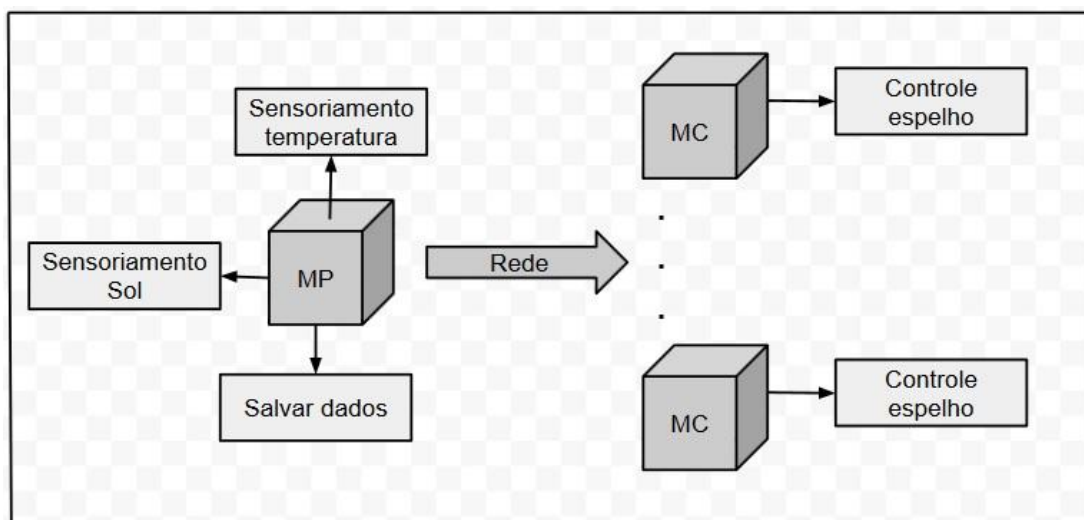


Figura 1 - Esquema geral de funcionamento.
Fonte: Autoria própria.

2.2 ESTRUTURA FÍSICA

As estruturas mecânicas possibilitam aos espelhos e ao seguidor solar realizar movimentos de rotação e também de inclinação através de dois motores de passo que estão localizados em cada estrutura, ou seja, os espelhos têm movimento em dois eixos.

Além disso, a localização das placas de controle e aquisição de dados, assim como o local de passagem dos cabos foram projetados de forma a dar robustez ao sistema e facilitar possíveis manutenções.

2.2.1 Estrutura mecânica dos espelhos¹

A estrutura mecânica pode ser dividida em duas partes: inferior e superior.

A parte inferior é mostrada na Figura 2. Nela está alocado o motor de passo que realiza o movimento de rotação da estrutura.

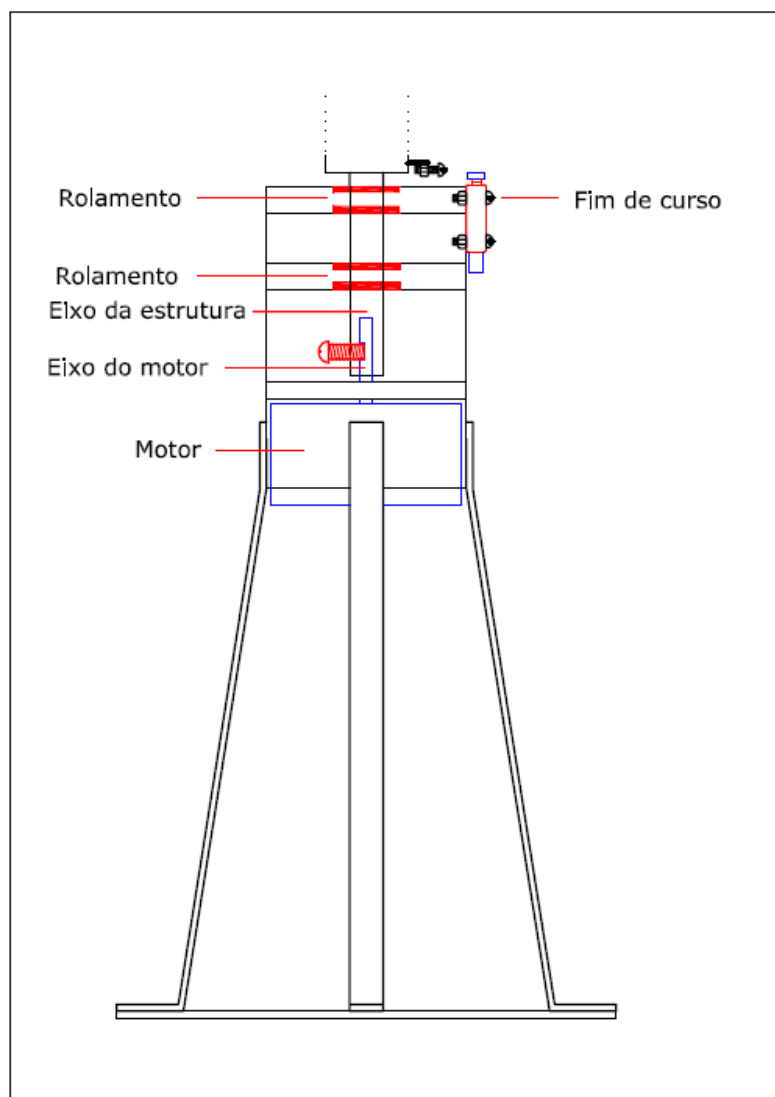


Figura 2 - Parte inferior da estrutura.
Fonte: Autoria própria.

¹ As figuras que constam neste tópico são para facilidade de compreensão das estruturas. O projeto detalhado das estruturas contendo as medidas reais consta nos apêndices A, B, C e D.

Para diminuir o esforço no eixo do motor e dar suporte ao movimento, existem dois rolamentos separados entre si de 15 mm e, para a fixação da estrutura no piso, foram colocadas quatro hastes soldadas em uma base quadrada de 15 x 15 cm.

Além disso, tanto na parte superior quanto na parte inferior há um sensor fim de curso que serve como ponto de referência para início dos movimentos. Esta posição coincide com a limitação mecânica imposta pela própria estrutura. Entretanto, para possibilitar a realização de um ajuste fino foi soldada uma porca na estrutura e, um parafuso, possibilita ajustar qual a referência exata no chaveamento dos sensores fim de curso.

A parte superior é mostrada na Figura 3. Nela está alocado o motor de passo que realiza o movimento de inclinação dos espelhos. Também há dois rolamentos que dão suporte ao eixo.

Existe uma haste que eleva a parte superior da inferior. Esta haste possui duas configurações, sendo que uma é maior e outra menor. Isto foi feito, pois, cinco das estruturas são posicionadas na parte de trás e as outras na parte da frente. Assim, se ambas tivessem o mesmo tamanho, as da frente impediriam que as outras refletissem o Sol para a caldeira. Outra diferença entre as duas configurações é que para as estruturas maiores a haste é reforçada (dupla).

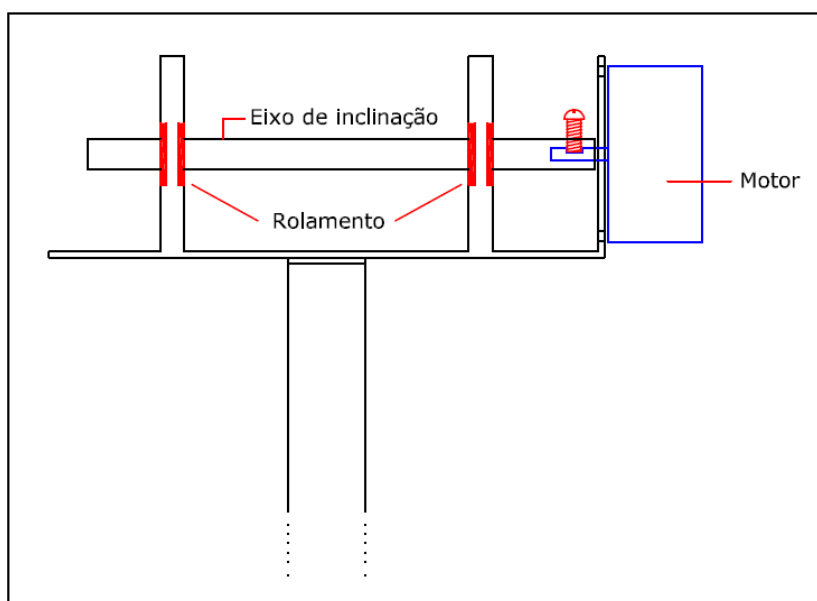


Figura 3 - Parte superior da estrutura.
Fonte: Autoria própria.

Para a fixação dos espelhos foi soldada uma chapa metálica 10 x 15 cm junto ao eixo da parte superior. Então o espelho, que mede 32 x 42 cm, foi colado nesta chapa, com fita dupla face de uso automotivo. Foi também soldado um contrapeso no eixo para diminuir o torque requerido no movimento. A Figura 4 mostra o detalhe desta chapa juntamente ao contrapeso e o sensor fim de curso da parte superior.

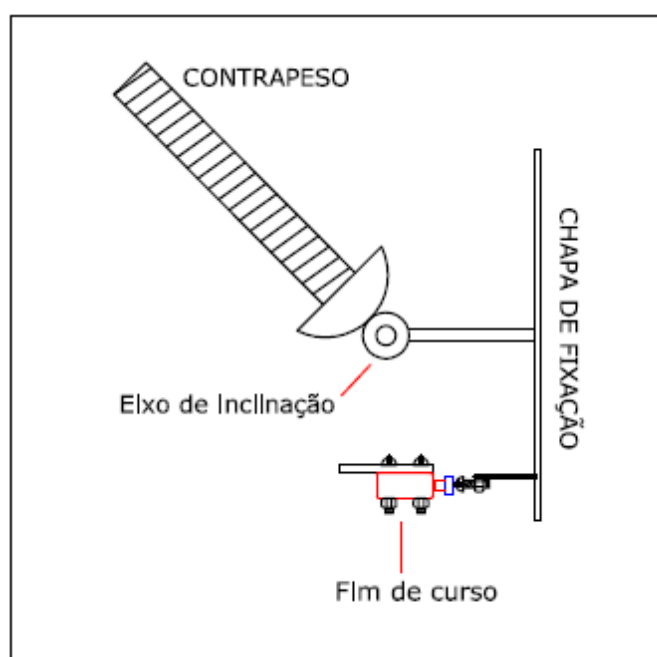


Figura 4 - Detalhe de fixação do espelho.
Fonte: Autoria própria.

Para a alimentação dos motores, os cabos foram fixados com abraçadeiras de nylon e, em suas extremidades, foram prensados terminais. Além disso, em uma das hastes há uma barra de 12 conectores de PVC, 2,5 mm², para a conexão dos cabos da estrutura com os cabos que chegam das placas de controle.

Os projetos das estruturas citadas contendo todas as medidas são apresentados nos APÊNDICES A, B, C e D.

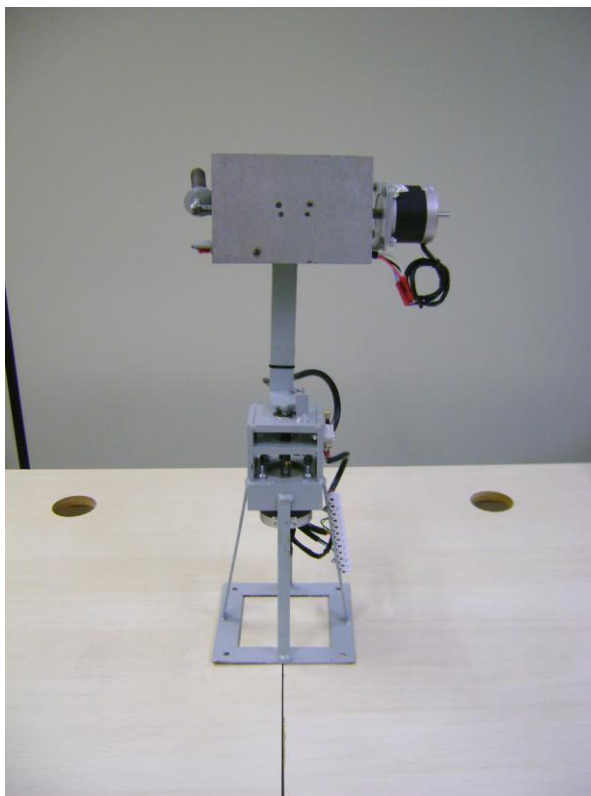
As Fotografias 5 - 12 mostram como ficaram as estruturas depois de prontas.



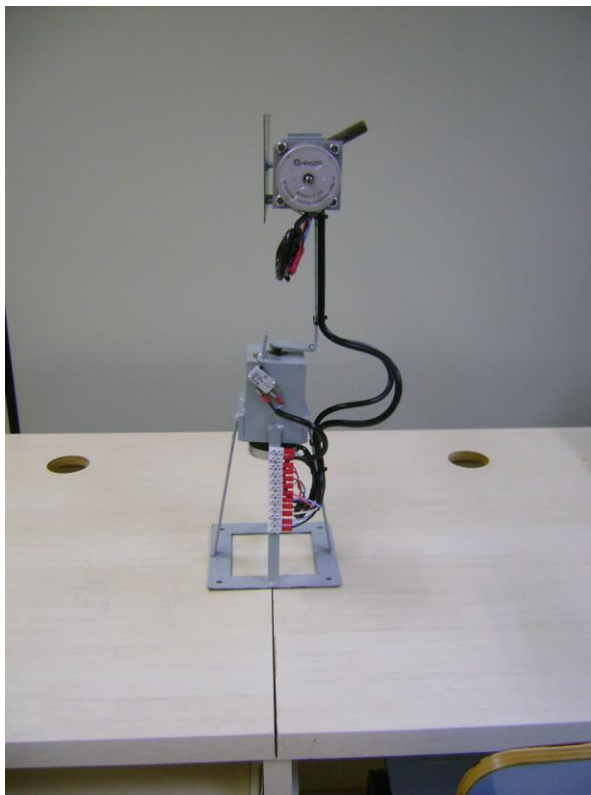
Fotografia 5 - Estrutura espelho maior - Visão frontal.
Fonte: Autoria própria.



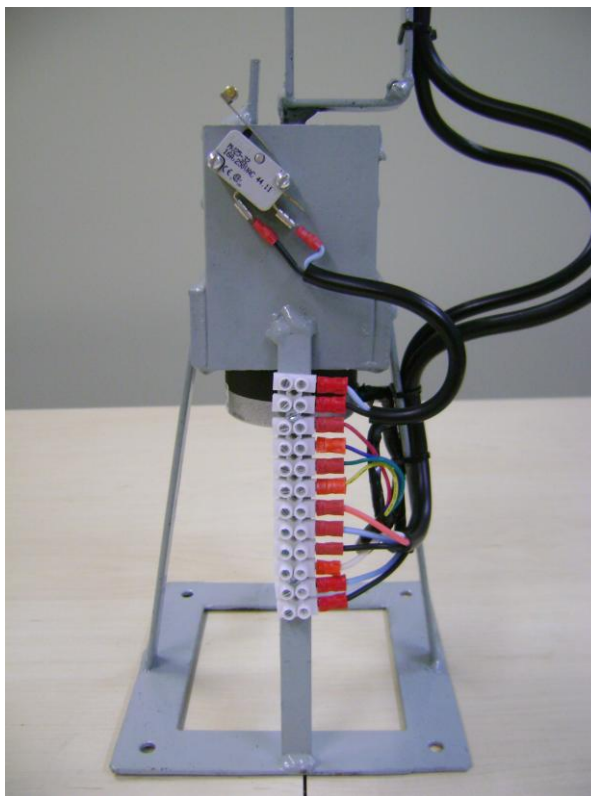
Fotografia 6 - Estrutura espelho maior - Visão lateral.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 7 - Estrutura espelho menor - Visão frontal.
Fonte: Autoria própria.



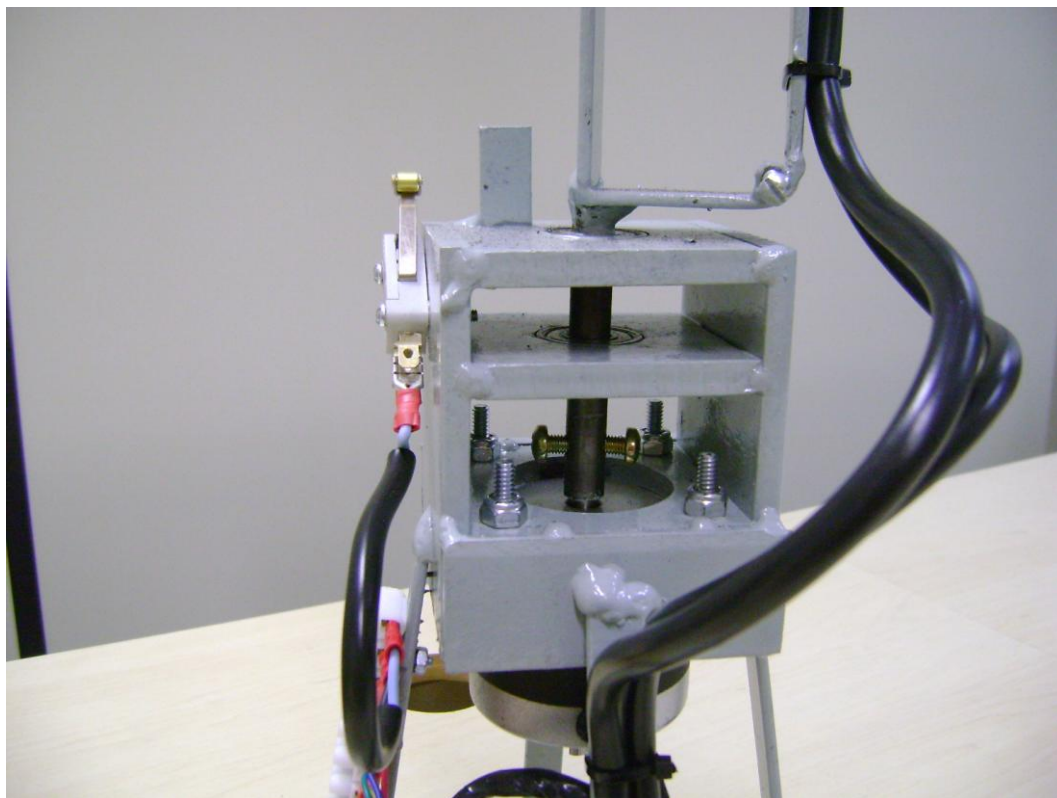
Fotografia 8 - Estrutura espelho menor - Visão lateral.
Fonte: Autoria própria.



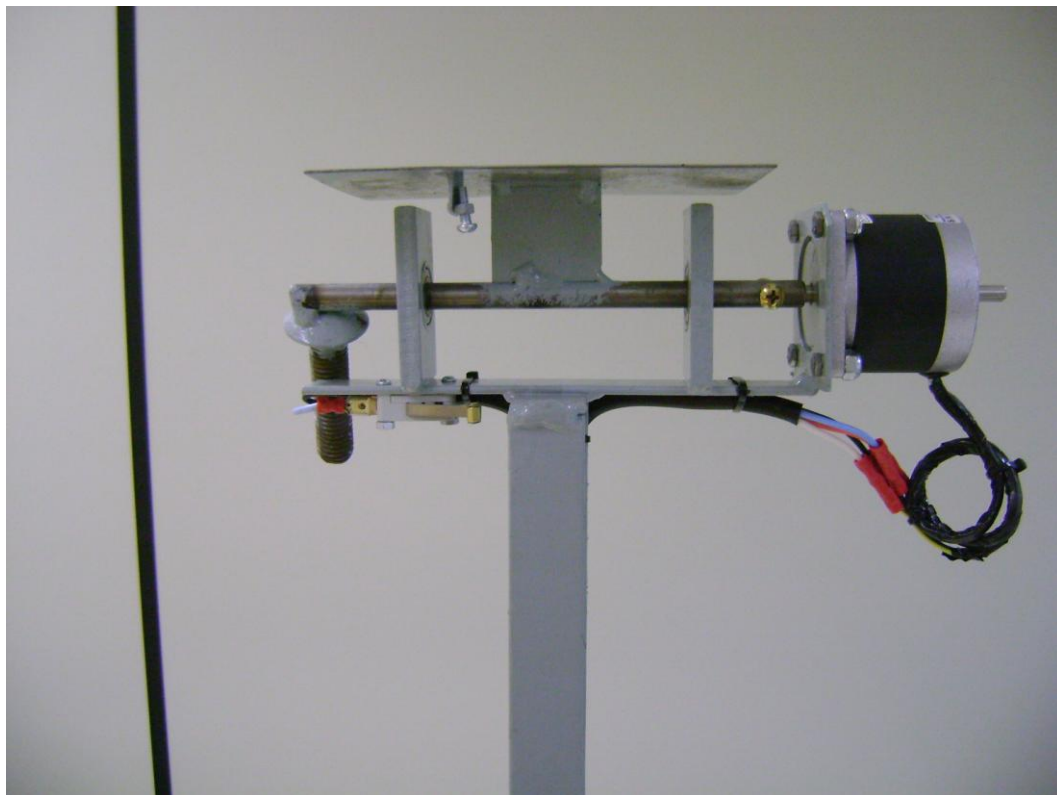
Fotografia 9 - Detalhe da barra de conectores e fim de curso.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 10 - Detalhe do contrapeso.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 11 - Sustentação do motor - Parte interior.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 12 - Sustentação do motor - Parte superior.
Fonte: Autoria própria.

2.2.2 Seguidor Solar

Como a Terra muda sua inclinação em relação ao Sol durante o ano, o ângulo de incidência da radiação solar também muda, além da variação da posição solar ao longo do dia. Assim, foi desenvolvido um sensor que verifica essa variação da posição do Sol e posiciona os espelhos na posição mais adequada para refletir os raios incidentes, independentemente da hora do dia e do período do ano.

Existem rastreadores solares de diferentes tipos já desenvolvidos. O uso mais comum para estes sensores são na melhoria da eficiência em painéis fotovoltaicos, como apresentado em (OLIVEIRA, 2007), (CLIFFORD; EASTWOOD, 2004), (POULEK; LIBRA, 1997) e (RIBEIRO; PRADO; GONÇALVES, 2012).

O rastreador desenvolvido neste projeto aproveita o conceito apresentado em (VAL, 2013) e é composto por uma estrutura de PVC, dois motores de passo e quatro LDRs (*Light Dependent Resistor*). A Figura 5 mostra como são alocados os LDRs.

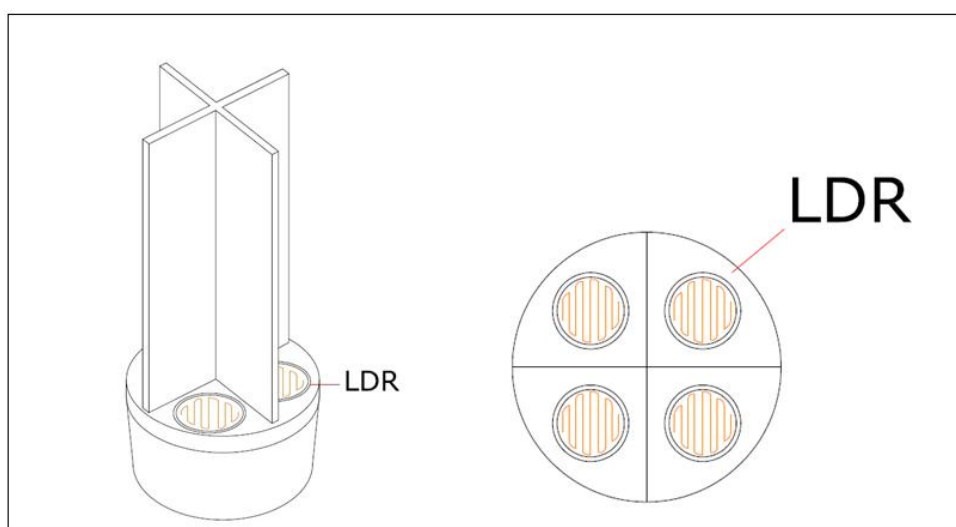


Figura 5 - Seguidor solar. Vista 3D e superior.
Fonte: Autoria própria.

O princípio de funcionamento é bastante simples. Um motor de passo realiza o movimento de inclinação do seguidor solar e outro realiza o movimento de rotação. Dessa forma, se os quatro LDRs não estiverem com a mesma faixa de luminosidade significa que o sensor não está posicionado na direção dos raios solares, logo, os

motores irão se movimentar seguindo um algoritmo² baseado na intensidade luminosa de cada LDR, fazendo com que a estrutura se mova para a posição do Sol. Ao fim, quando os quatro LDRs estiverem com uma faixa de diferença considerada aceitável, significa que o sensor encontrou a posição solar. Logo, a informação exata de quantos passos (ângulo) cada motor girou é conhecida e, conseqüentemente, a posição angular do Sol também.

Para controlar esta estrutura com os LDRs é preciso também uma mecânica que possibilite movimento em dois eixos. Assim, a estrutura mecânica do seguidor pode também ser dividida em duas partes principais: inferior e superior.

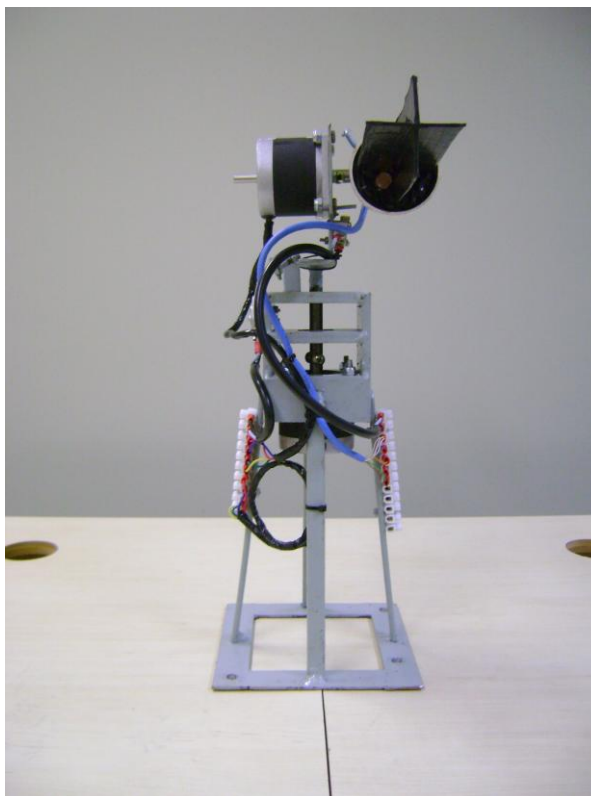
A parte inferior é igual à das estruturas dos espelhos. A diferença é apenas na parte superior, que foi adaptada para o seguidor solar e por ser mais leve não necessita de contrapeso.

Diferentemente das outras estruturas, o seguidor tem duas barras de conectores de PVC, 2,5 mm², e não apenas uma, pois, além das conexões dos motores e dos sensores fim de curso, o seguidor possui também as conexões com os LDRs.

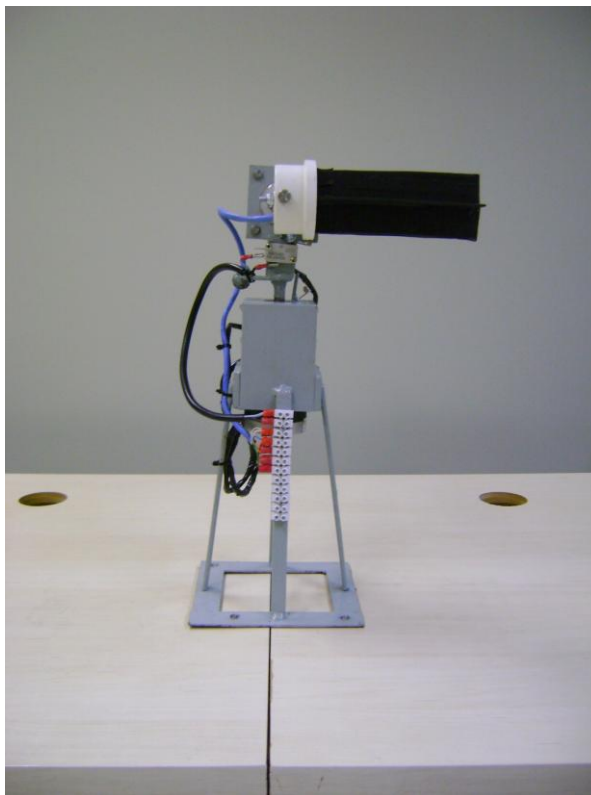
Assim como nas estruturas dos espelhos, para a alimentação dos motores, os cabos foram fixados com abraçadeiras de nylon e em suas extremidades foram prensados terminais.

As Fotografias 13 - 16 mostram como ficou a estrutura do seguidor solar depois de concluída.

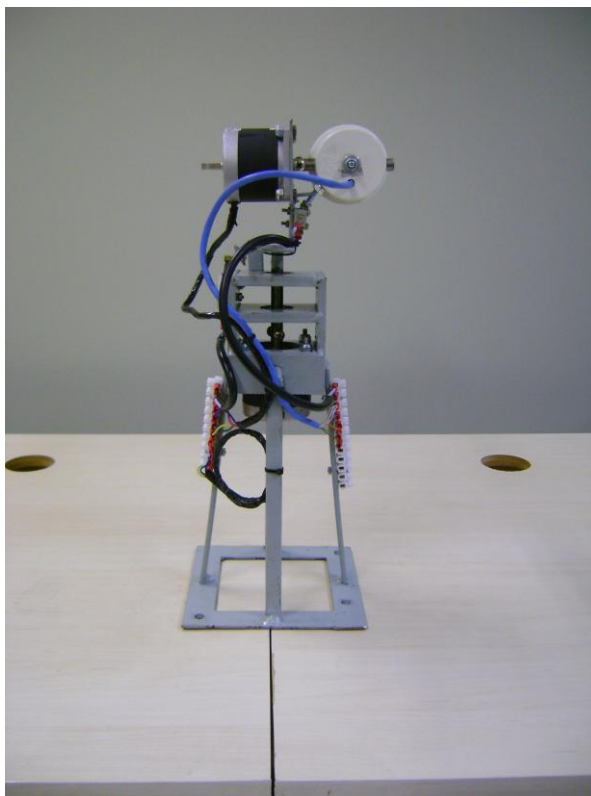
² O detalhamento do algoritmo de funcionamento do seguidor solar é feito na seção que discute o firmware.



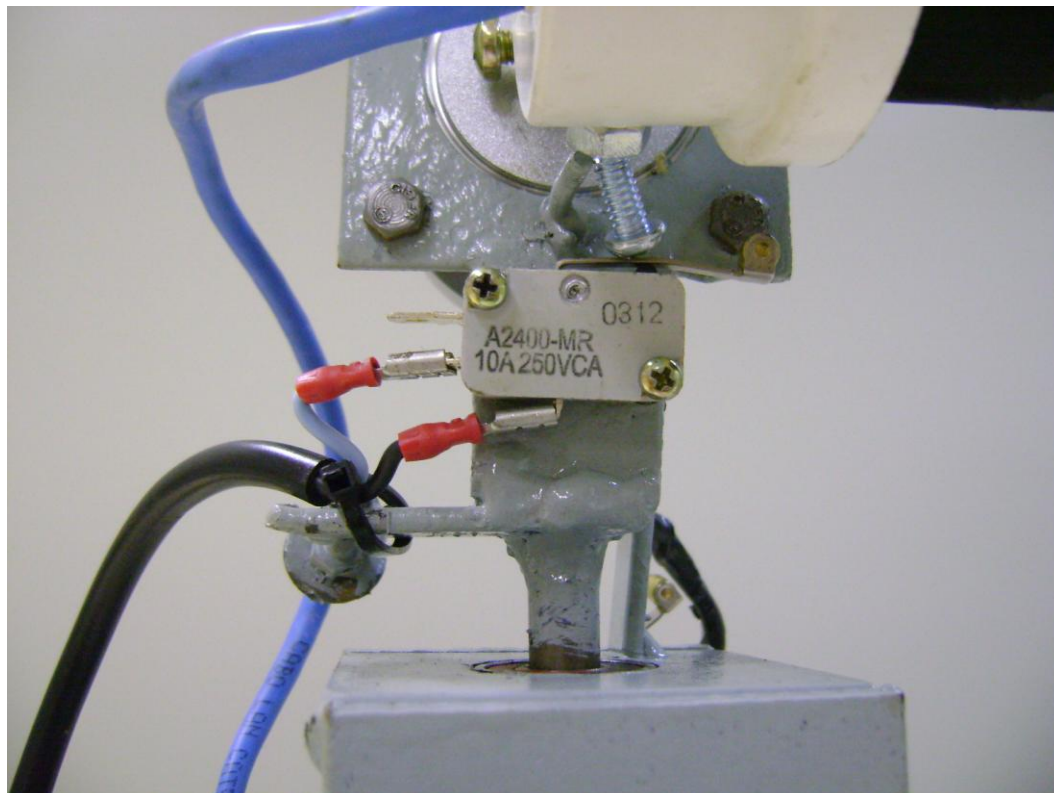
Fotografia 13 - Estrutura do Seguidor Solar - Visão frontal.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 14 - Estrutura do Seguidor Solar - Visão lateral.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 15 - Estrutura do Seguidor Solar - Visão traseira.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 16 - Detalhe do fim de curso - inclinação.
Fonte: Autoria própria.

2.2.3 CALDEIRA

A caldeira utilizada foi construída em aço carbono, chapa 16 AWG. Suas dimensões são 42 x 32 x 10 cm, sendo que está apoiada em uma base metálica de 80 cm de altura que é fixada no concreto.

Nela existe um tampão por onde se adiciona ou retira a água, uma rosca fêmea BSP para fixação do termopar além de uma válvula de alívio de pressão de bronze, com mola $\frac{1}{2}$ e para pressão de 145 psi.

O reservatório possui capacidade de até 13,44 litros de água.

As Fotografias 17 - 19 mostram a caldeira e também a estrutura de sustentação.



**Fotografia 17 – Base da estrutura de sustentação da caldeira.
Fonte: Autoria própria.**



Fotografia 18 – Topo da estrutura de sustentação da caldeira.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 19 – Caldeira.
Fonte: Autoria própria.

2.2.4 ESPAÇO FÍSICO UTILIZADO

Para a execução deste projeto foi construído um piso de concreto com área de 9 m², com dimensões 3 m x 3 m. Nesta base foram alocadas:

- Todas as estruturas mecânicas;
- Uma caixa de passagem 30 x 30 x 30 cm embutida no piso;
- Um quadro de comando 40 x 50 x 20 cm para as PCIs (Placas de circuito impresso);
- Um quadro 40 x 40 x 12 cm para a instalação das fontes de alimentação;
- Eletrodutos flexíveis de PVC com diâmetro 1";
- Três eletrodutos de ferro galvanizado com diâmetro 1.1/4";
- Reservatório (caldeira) de dimensões 42 x 32 x 10 cm.

A distribuição espacial de cada um dos itens é mostrada na Figura 6.

As três tubulações de ferro galvanizado, além de servirem para a passagem dos cabos até a caixa de passagem no piso, são também utilizadas para sustentação das caixas das PCIs e das fontes.

A caixa das fontes é sustentada pelos tubos de ferro galvanizado através de seis abraçadeiras tipo "D" de diâmetros 1.1/4", sendo que a ligação entre os dois quadros é feita por dois eletrodutos de PCV de diâmetro 1.1/4".

Da caixa de passagem 30 x 30 x 30 cm saem 12 tubulações, sendo todas de eletroduto flexível de PVC com diâmetro de 1". Dez destas tubulações vão até a posição das estruturas mecânicas dos espelhos, uma vai até a base do reservatório para a passagem do cabo do termopar e a outra sai da base de concreto para receber a alimentação de energia 127 VAC.

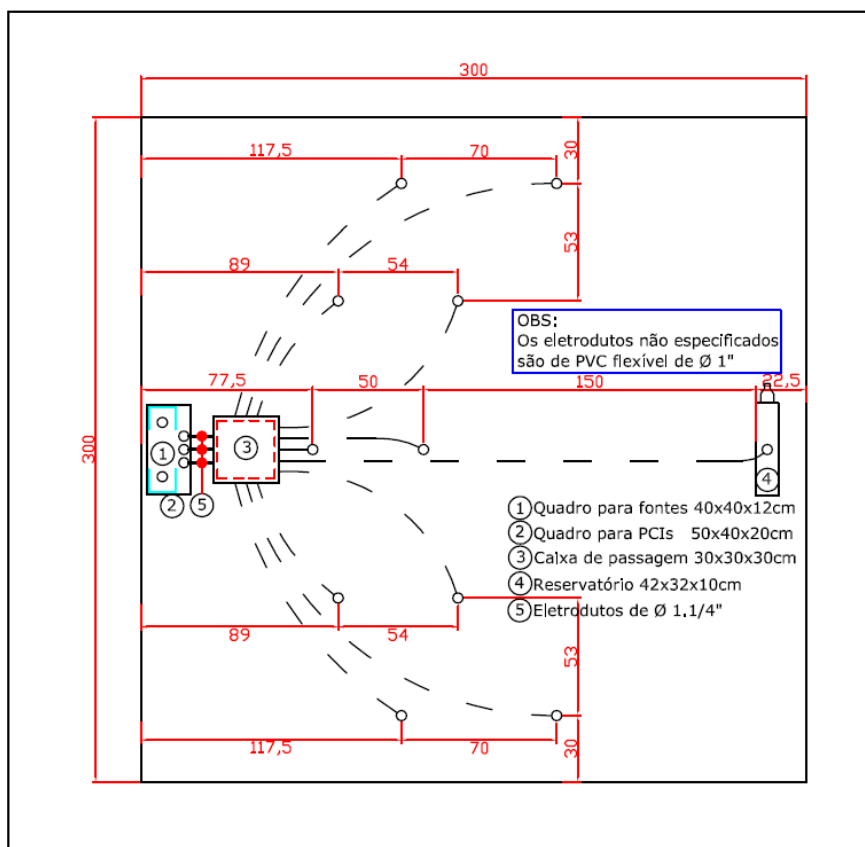


Figura 6 - Alocação espacial dos objetos.
Fonte: Autoria própria.

Em cada eletroduto que vai até as estruturas mecânicas há um cabo 12 x 1,0 mm². Este cabo é numerado de 1 a 12 e segue o Quadro 1, que mostra a sequência de ligação para cada estrutura.

Numeração do cabo	Conexão
1 até 4	Motor 1
5 até 8	Motor 2
9 e 10	Sensor 1
11 e 12	Sensor 2

Quadro 1 - Conexão dos cabos dos eletrodutos.
Fonte: Autoria própria.

Onde *Motor 1* se refere ao motor de rotação, *Motor 2* se refere ao motor de inclinação, *Sensor 1* se refere ao sensor fim de curso do movimento de rotação e *Sensor 2* ao sensor fim de curso do movimento de inclinação.

As Fotografias de 20 - 23 mostram o resultado final.



Fotografia 20 - Base em construção.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 21 - Base finalizada.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 22 - Distribuição espacial - Vista do recipiente.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 23 - Distribuição espacial - Vista das caixas.
Fonte: Autoria própria.

2.2.5 Quadro das PCIs

O quadro das PCIs tem dimensões 40 x 50 x 20 cm e, em seu interior, estão localizados os 10 módulos controladores e o módulo principal, além de um cooler para ajudar na refrigeração dos dissipadores das PCIs.

Nesta caixa há uma chapa interna metálica ("fundo falso"), onde foram instaladas canaletas perfuradas de 30 x 50 mm e, 50 x 50 mm, para uma melhor acomodação dos cabos e para que os cabos não fiquem aparentes.

Também foram colocados quatro parafusos com porca e contra porca para a fixação de cada uma das PCIs.

A Figura 7 mostra como é a distribuição das placas dentro da caixa.

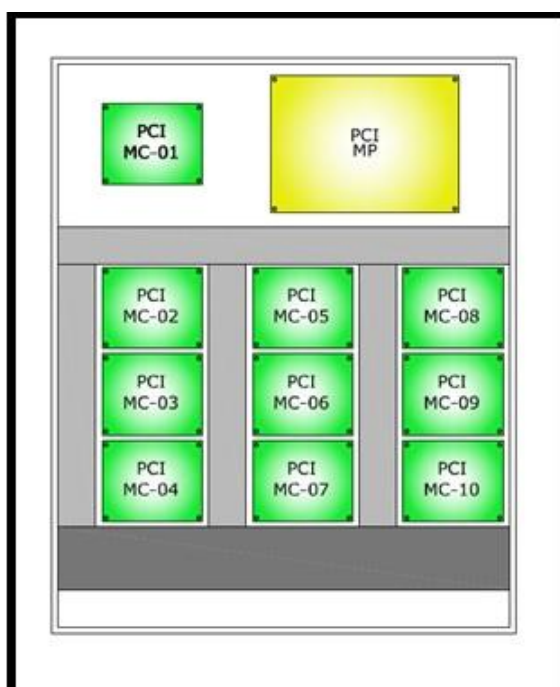
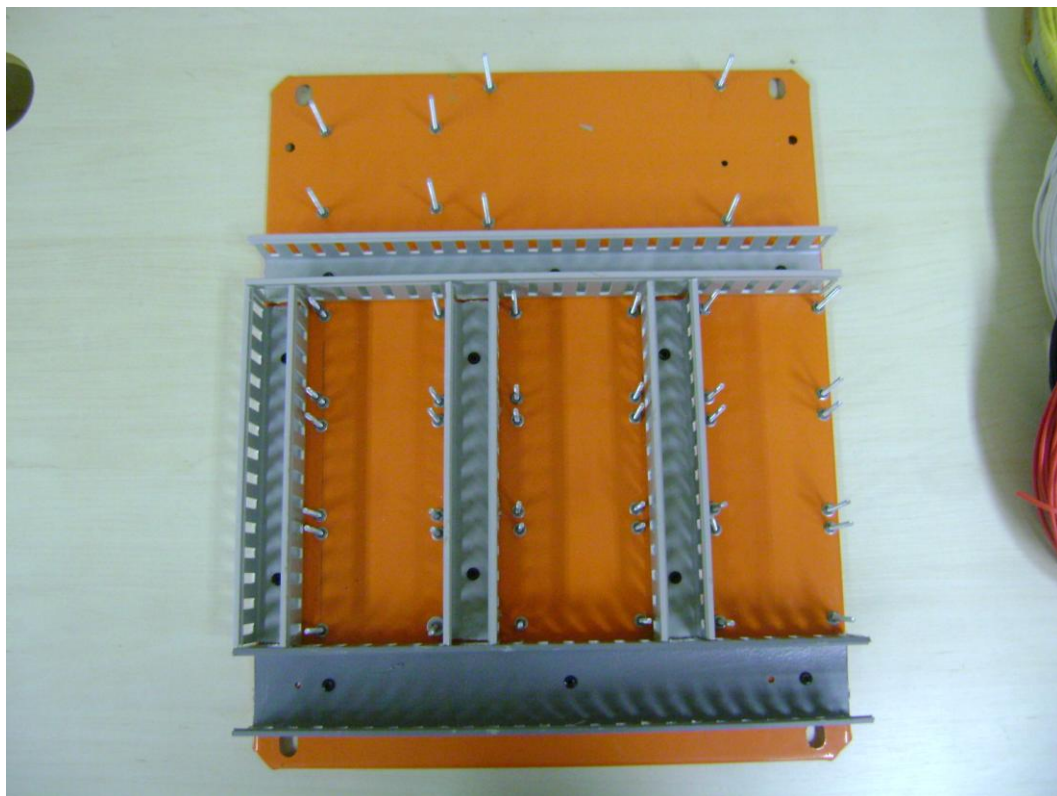
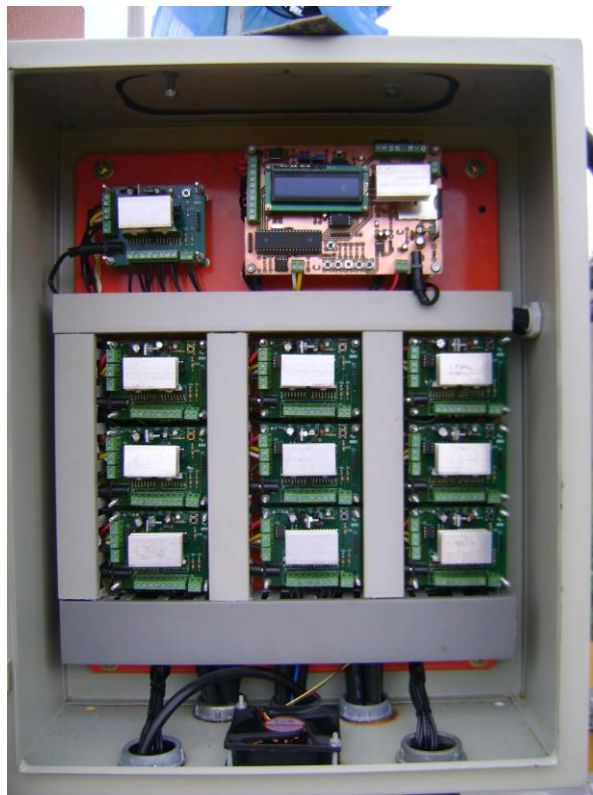


Figura 7 - Caixa das PCIs.
Fonte: Autoria própria.

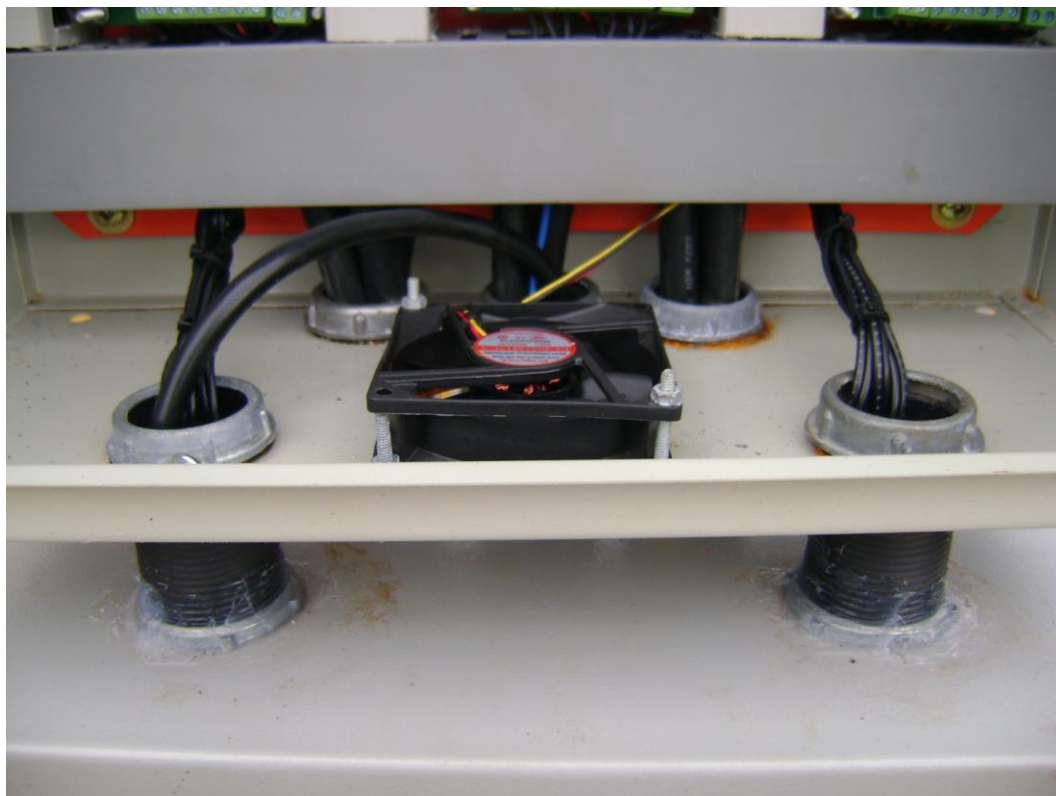
As Fotografias 24 - 29 mostram a caixa das PCIs.



Fotografia 24 - Estrutura de fixação das PCIs, fundo falso.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 25 - PCIs instaladas.
Fonte: Autoria própria.



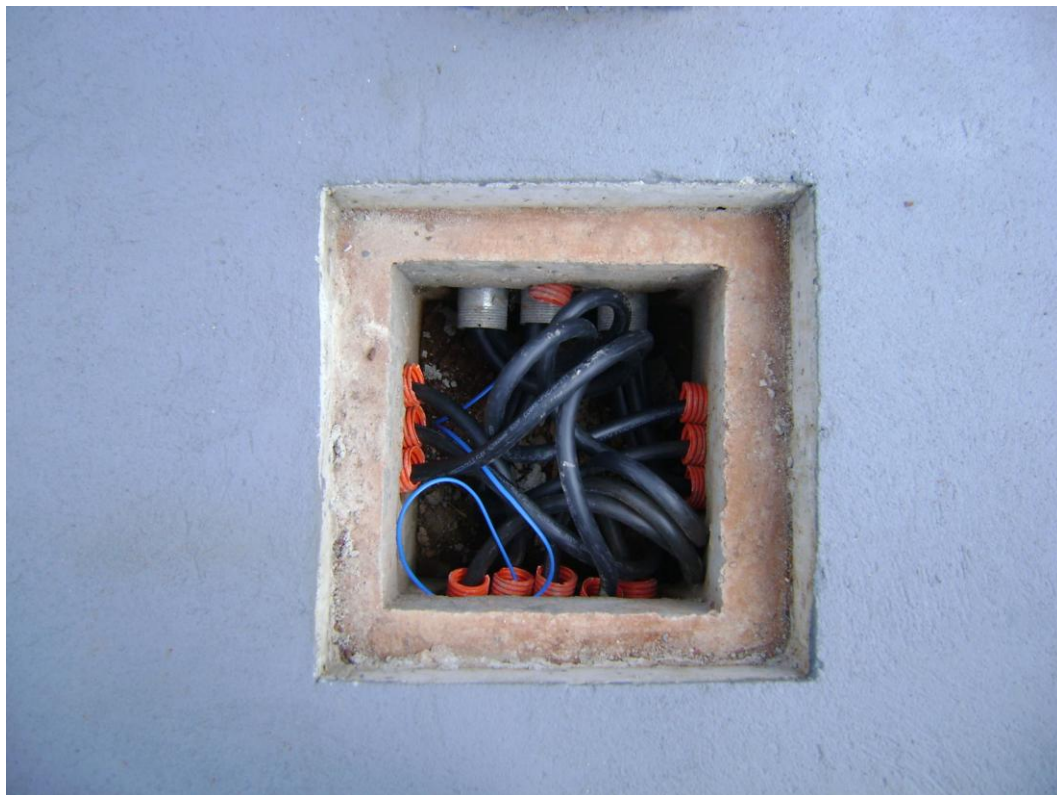
**Fotografia 26 – Detalhe do cooler para refrigeração.
Fonte: Autoria própria.**



**Fotografia 27 - Detalhe da entrada dos cabos do Seguidor Solar.
Fonte: Autoria própria.**



Fotografia 28 – Caixa de passagem antes da instalação.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 29 - Caixa de passagem 30 x 30 x 30 cm após a passagem dos cabos.
Fonte: Autoria própria.

2.2.6 Quadro das fontes

O quadro das fontes tem dimensões 40 x 40 x 12 cm e, em seu interior, estão localizadas 11 fontes de 7,5 V / 4 A, uma fonte de 12 V / 350 mA e uma fonte de 12 V / 1 A.

A fonte de 12 V / 350 mA alimenta exclusivamente o módulo principal. A alimentação separada desta PCI foi necessária como forma de prevenir interferências no sensoriamento do termopar. Esta interferência ocorre, pois, como a tensão gerada pelo termopar é muito baixa, flutuações no GND causam erros de medição. Logo, isolando o GND do MP das demais PCIs este problema é minimizado.

Além disso, a fonte de 1 A é uma fonte chaveada e, nos testes, alimentando o MP com esta fonte, devido à emissões eletromagnéticas, tensões foram induzidas na saída do termopar impedindo o funcionamento correto do mesmo. Já a fonte de 12 V / 350 mA é uma fonte linear e não gerou problemas no sensoriamento.

As fontes de 7,5 V servem para alimentação dos motores de passo, sendo que cada fonte alimenta dois motores.

Nesta caixa existe uma chapa interna (fundo falso) de madeira. Para que as fontes não tivessem contato direto com a madeira foram instalados dois trilhos de 30 x 50 mm cada, através de parafusos. Além disso, os trilhos servem também para uma melhor acomodação das fontes e, como existe um espaço entre as fontes e madeira (devido aos trilhos), a refrigeração é facilitada.

Também foram instaladas três barras de tomadas, sendo que cada barra contém quatro tomadas. Desta forma, cada fonte tem sua própria tomada de ligação. Há também um disjuntor 1 x 10 A, que faz a proteção do circuito e serve como interruptor para ligar/desligar o sistema.

A Fotografia 30 mostra como ficou a caixa das fontes.



**Fotografia 30 - Detalhe da caixa das fontes (40 x 40 x 12 cm).
Fonte: Autoria própria.**

3 MÓDULO PRINCIPAL

Conforme já descrito, o módulo principal deve realizar as seguintes funções: sensoriamento da temperatura, sensoriamento da posição solar, salvar os dados e comunicação com os demais módulos.

Para o sensoriamento da temperatura foi utilizado um sensor termopar de uso industrial. Para o sensoriamento da posição solar foi desenvolvido o "seguidor solar", que funciona como um sensor que fornece as posições angulares do sol. Para o salvamento dos dados foi utilizado um cartão de memória SDHC e, para a comunicação entre os módulos foi utilizada rede RS485.

Nos tópicos seguintes estão descritas todas as partes do esquemático do módulo principal, sendo que o esquemático completo se encontra nos APÊNDICES E, F e G.

3.1 ENTRADA DO CIRCUITO

A Figura 8 mostra o esquemático da entrada.

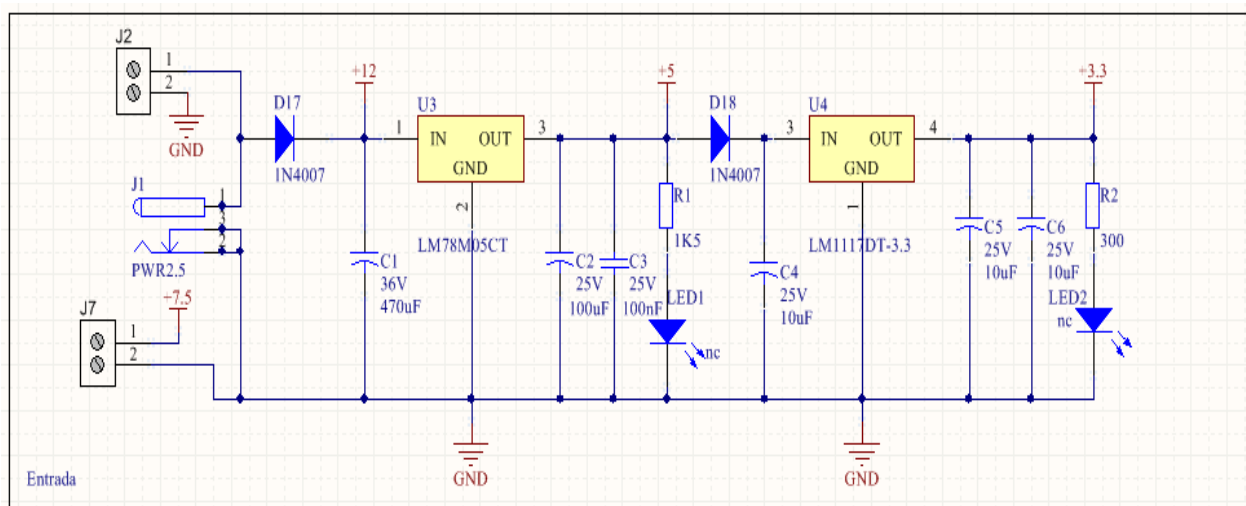


Figura 8 - Esquemático da entrada do MP.
Fonte: Autoria própria.

Quatro níveis de tensão são utilizados neste módulo. O +12 V é utilizado como fonte de alimentação para a PCs. O +3.3 V alimenta o cartão de memória SD, o +5 V alimenta o restante dos CIs e o +7,5 V alimenta os motores de passo.

Existe a possibilidade de entrar com o +12 V diretamente com um conector “jack j4” ou através de um conector KRE. Para a entrada da fonte de +7,5 V é utilizado outro conector KRE.

O diodo D17 serve para proteção contra ligação invertida, o diodo D18 serve também como uma proteção extra e os LEDs são úteis nos casos de funcionamento incorreto do circuito, indicando a ausência de tensão. Os LEDs possuem a indicação “nc” (não conectado), pois não há a necessidade de conectá-los. Mesmo assim, para o circuito final os LEDs foram inseridos.

O CI LM7805 é um regulador de tensão de 5 V / 1.5 A e o LM1117/3.3 um regulador de 3.3 V / 0.8 A.

3.2 CARTÃO SD

A Figura 9 mostra o esquemático para a interface com o cartão SD.

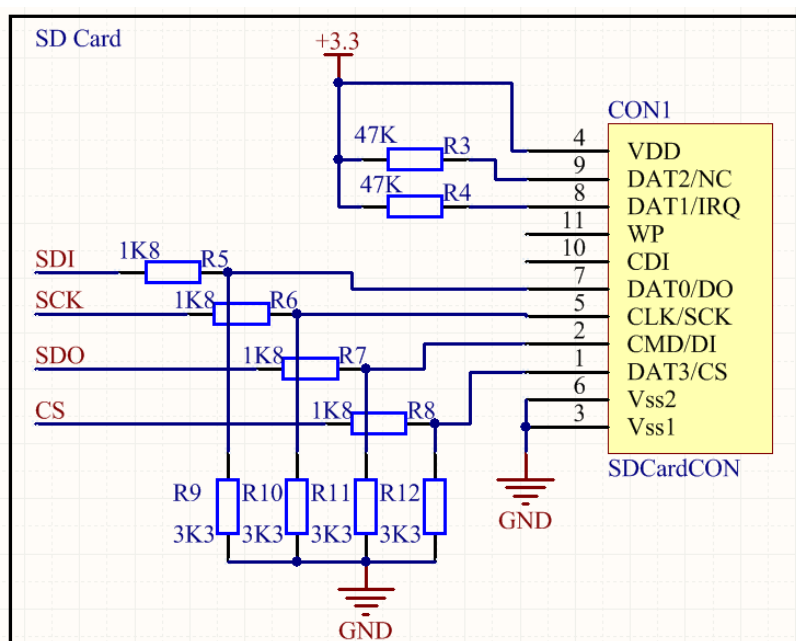


Figura 9 - Esquemático cartão SD.
Fonte: Autoria própria.

A alimentação do cartão SD é feita na tensão de 3.3 V, assim, devido ao microcontrolador trabalhar com 5 V é necessário um circuito divisor de tensão para que ambos possam operar de forma compatível. Associando um resistor de 1K8 e outro de 3K3, partindo da tensão de 5 V do microcontrolador, resultará em aproximadamente 3.24 V no cartão SD, evitando que o cartão seja danificado, pois o mesmo suporta tensões entre 2.7 V e 3.6 V.

O divisor de tensão em alguns casos não é aconselhável, pois distorce os sinais em frequências elevadas (MIYADAIRA, 2009), entretanto, para o caso em questão este não é um fator relevante.

Os resistores R3 e R4 são resistores de *pull-up* necessários para esta configuração do cartão SD.

3.3 DISPLAY LCD

A Figura 10 mostra o esquemático para o display LCD.

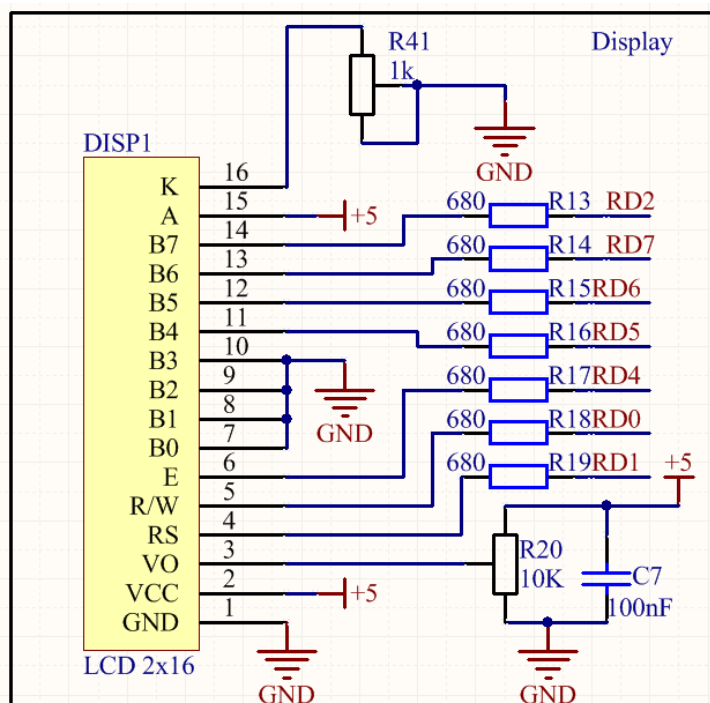


Figura 10 - Esquemático do display LCD.
Fonte: Autoria própria.

O controlador do display LCD utilizado é o HD44780 da HITACHI de 2x16.

É utilizado também o controle por quatro bits para reduzir o número de IOs necessários do microcontrolador.

Os potenciômetros R41 e R20 são do tipo *trimpot* e servem para regular a intensidade do *backlight* e o contraste, respectivamente.

3.4 INTERFACE RS485

A Figura 11 mostra o esquemático para a interface RS485.

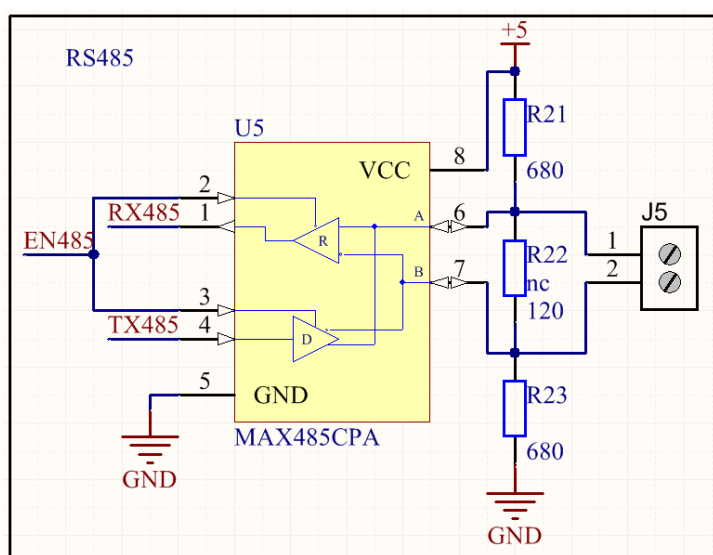


Figura 11 - Esquemático para interface com RS485.
Fonte: Autoria própria.

A rede RS485 é uma das redes mais simples utilizadas atualmente. Este padrão permite múltiplos módulos conectados à rede sendo que o máximo permitido depende da potência que cada dispositivo absorve da rede (NOGUEIRA, 2007).

O padrão RS485 utiliza tensão diferencial entre um par trançado para enviar os dados. A utilização de um par de fios trançados faz com que a rede tenha melhor imunidade ao ruído, pois, tensões induzidas nas linhas de transmissão serão as mesmas para os dois fios do par trançado, fazendo com que a diferença de tensão entre os cabos não se altere.

Neste projeto a topologia da rede utiliza apenas um “mestre” e diversos “escravos”. O mestre é o MP e os escravos os MCs.

No esquemático do MP o CI utilizado é o MAX485 produzido pela MAXIM. Este CI converte o sinal da saída do microcontrolador (TTL, 0 V a 5 V) em níveis de tensão compatíveis para RS485 (-7 à 12 V).

Os pinos 2 e 3 do CI estão conectados entre si. Estes pinos são responsáveis por ativar ou desativar a recepção/transmissão e possuem lógica invertida, ou seja, nível alto no pino 2 desativa a recepção enquanto no pino 3 ativa a transmissão. Assim, ligando ambos juntos a uma saída do microcontrolador é possível configurar o CI para o modo recepção ou transmissão.

Este circuito permite transmissão/recepção no modo *half duplex*, ou seja, não pode enviar e receber dados ao mesmo tempo.

O resistor R22 possui a indicação nc (não conectado). Este resistor serve para atenuar o efeito da reflexão dos sinais no par trançado. É o chamado resistor de terminação. Entretanto, para redes curtas e com baixas taxas de transmissão (taxa ≤ 200 kbps) não é necessária a utilização deste resistor (SOLTERO, 2002, p. 13). Assim, como a rede utilizada neste projeto possui menos de 1 m e taxa de transmissão de 19200 bps, o resistor de terminação não foi utilizado.

Por fim, os resistores R21 e R23 são resistores de polarização (“bias resistor”). A função é fazer com que quando a rede não estiver ativa a diferença de tensão entre os cabos seja inferior a 200 mV, impedindo que algum módulo interprete ruído como uma informação real.

3.5 CONTROLE DO MOTOR DE PASSO

A Figura 12 mostra o esquemático para o controle do motor de passo.

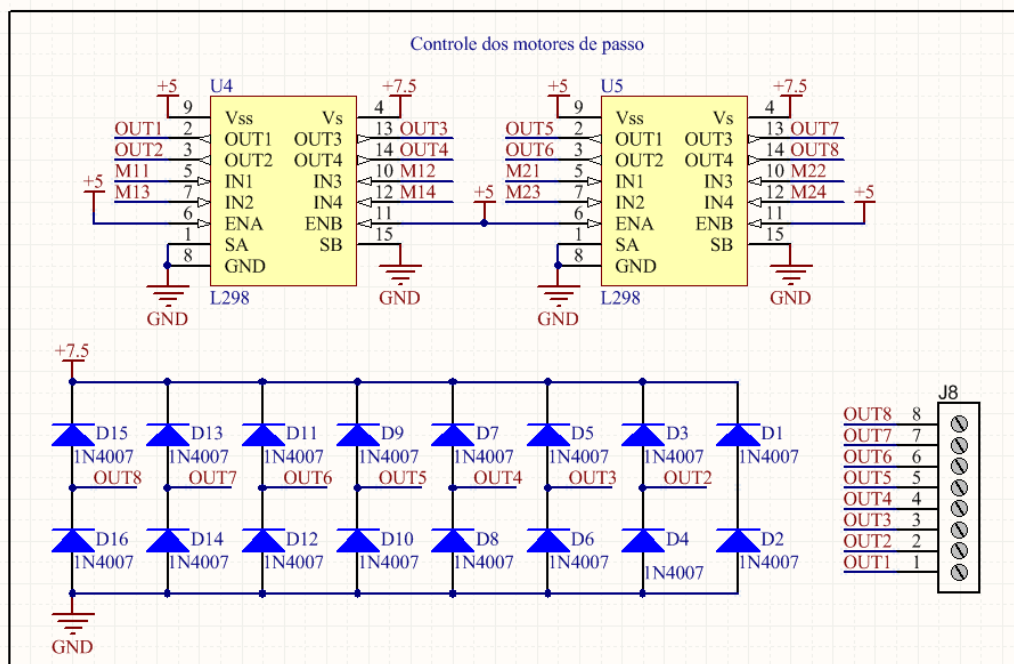


Figura 12 - Esquemático para o controle dos motores de passo.
Fonte: Autoria própria.

O princípio de funcionamento dos motores de passo é determinado pelos incrementos angulares que possuem. Os motores utilizados são os motores K23/4.6F6FL1.8 adquiridos através da empresa Neyoama Automação. Estes motores possuem 200 passos o que possibilita a variação de 1,8 graus por passo totalizando 360 graus, ou seja, uma volta completa. Além disso, podem ser ligados da forma unipolar ou bipolar. No primeiro caso, o torque nominal apresentado nas especificações do motor é de 3,2 kgf.cm, para corrente de 1 A/fase. Já no caso do bipolar, o torque é de 4,6 kgf.cm para corrente de 0,7 A/fase.

Independente da maneira que o motor é ligado o que determina o sentido de sua rotação é a ordem da sequência de pulsos que o *driver* envia para o motor, assim como a sua velocidade depende da frequência com que esses pulsos são gerados.

A configuração unipolar é mais simples de executar, pois não há a necessidade de inversão no sentido da corrente nas bobinas do motor, mas possuem a desvantagem de ter um torque menor em relação a configuração bipolar para o mesmo motor. Como o sistema requer de um torque mais elevado, a forma de ligação escolhida foi a bipolar. Esta configuração consiste na utilização de uma ponte H para cada bobina do motor, o que acarreta em um *driver* mais complexo.

A ponte H é uma configuração de quatro ou seis transistores bipolares que possibilitam a mudança no sentido da corrente na bobina do motor. Uma destas configurações pode ser vista na Figura 13.

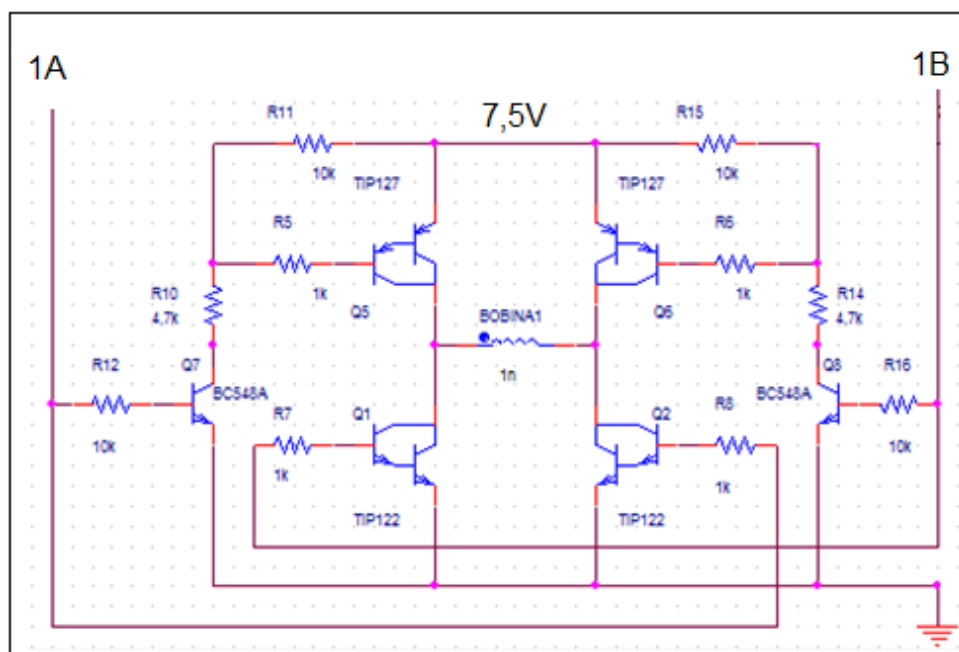


Figura 13 – Ponte H utilizada no circuito de testes.
Fonte: Autoria própria.

Desta forma quando o ponto *1A* está em nível alto (5 V) e *1B* em nível baixo (0 V) a corrente circula pelos transistores Q5 e Q2, quando ocorre a inversão de níveis, ou seja, quando *1A* está em nível baixo e *1B* em nível alto a corrente circula pelos transistores Q6 e Q1, invertendo o sentido da corrente.

Esta configuração foi utilizada para testes, pois nos módulos controladores e no modulo principal foram utilizados o CI L298N que possui duas pontes H. Com isto, em cada uma das PCs há dois L298N, onde um alimenta o motor 1 e o outro alimenta o motor 2. A Figura 14 mostra o esquema interno do CI L298N.

Como mencionado anteriormente, a configuração de ligação do motor de passo é bipolar e, além disso, terá passos completos (*full step*) com duas bobinas energizadas ao mesmo tempo, o que possibilita dobrar o torque se comparado ao motor que mantém apenas uma bobina energizada. A Tabela 1 mostra os níveis lógicos utilizados nas bobinas de cada um dos motores.

Tabela 1 – Tabela de acionamento das bobinas.

Passo completo				
Numero de passos	1A	2A	1B	2B
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1

Fonte: Datasheet AK23/4.6FL1.8, 2013.

Por fim, em cada bobina dos motores de passo foram inseridos diodos de roda-livre, que tem a função de evitar correntes residuais induzidas no circuito, devido à indutância das bobinas, podendo gerar queima de componentes e aquecimento dos motores.

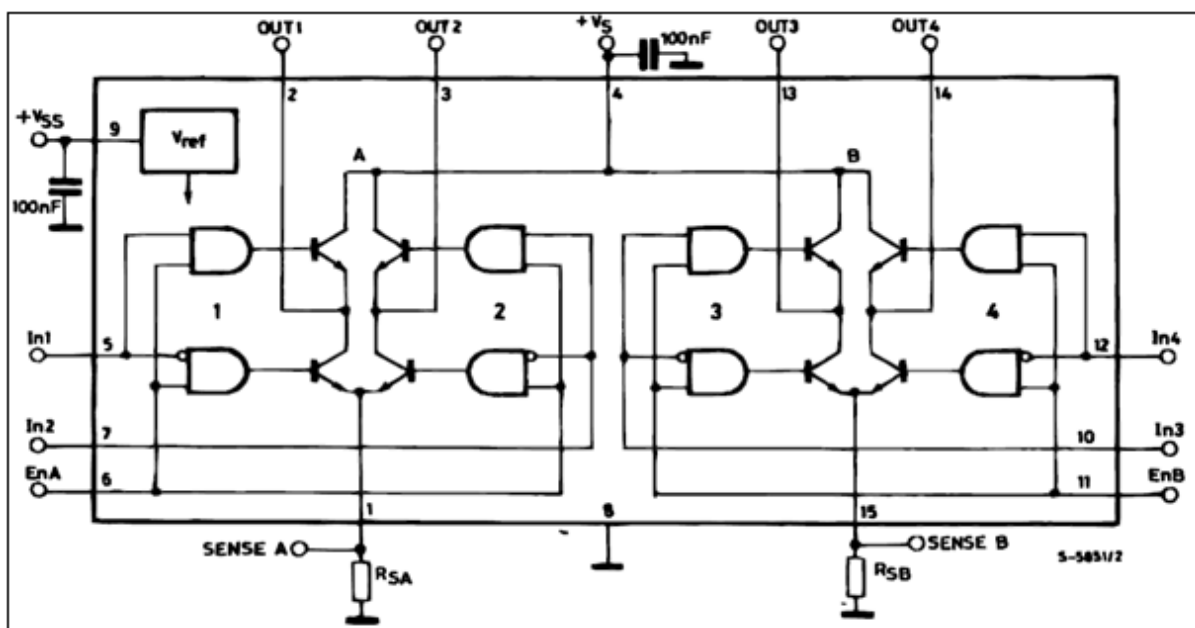


Figura 14 - Esquema interno do CI L298N.

Fonte: Datasheet L298, 2000.

3.6 SENSORIAMENTO

A Figura 15 mostra o esquema para a realização do sensoriamento.

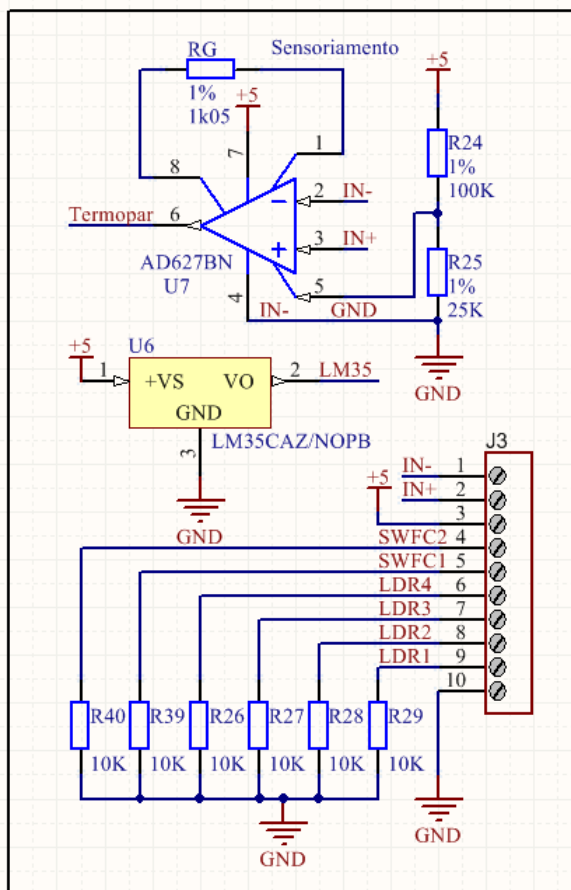


Figura 15 - Esquemático do sensoriamento.
Fonte: Autoria própria.

Notar que as identificações LDR1 até LDR4, SWFC1, SWFC2 e “Termopar” vão diretamente aos pinos do microcontrolador, conforme o APÊNDICE F.

A seguir estão descritas cada uma das partes do sensoriamento.

3.6.1 Seguidor Solar

O sensoriamento utilizado para o seguidor solar utiliza além dos LDRs, os sensores fim de curso. Para cada LDR é feito um divisor de tensão e a amostragem é feita nas entradas analógicas do microcontrolador.

Para cada sensor fim de curso é colocado um resistor de *pull-down*. Os sensores fim de curso servem para dar a referência ao seguidor solar, ou seja, quando o sistema é iniciado o seguidor solar realiza um movimento de retorno até encontrar o sensor de fim de curso de rotação e o de inclinação. Com isto, a

referência de posição é encontrada e o seguidor solar inicia o movimento para encontrar a posição de maior incidência dos raios solares.

3.6.2 Temperatura

O sensor utilizado para a medição de temperatura no recipiente aquecido é um termopar do tipo T, fabricado pela Novus e com as seguintes especificações: tipo T, bitola 14 AWG, haste de 6 x 150 mm, rosca 3/4 NPT, cabo de PVC para 200°C e com 7 m de comprimento.

Este tipo de termopar utiliza liga de Cobre e Constatam e possui faixa de utilização entre -60°C a +370°C com a tensão gerada entre -5,333 mV a 19,027 mV (TERMOPARES, 2013).

Neste projeto, a faixa de temperatura de interesse é entre 0°C e 170°C, com isto, a tensão gerada pelo termopar estará entre 0 mV e 7,666 mV. Nesta faixa de temperatura a curva de “temperatura x tensão” é aproximadamente linear, permitindo, portanto, aplicar o “Método da adição de temperatura” (FRANÇA, 1997) sem inserir grandes erros na medição. Este método de medição é composto pelos seguintes passos:

1. Mede-se a temperatura na junção de referência (sensor LM35);
2. Converte-se a tensão medida no termopar em uma temperatura pela curva característica. Esta temperatura é aproximadamente a diferença de temperatura entre a junção do termopar e a junção de referência (LM35);
3. Adicionam-se as duas temperaturas obtendo assim o resultado da temperatura na junção do termopar.

Este processo é simples, porém, só pode ser aplicado quando a faixa de temperatura de interesse se comporta de forma aproximadamente linear.

Não é possível ao microcontrolador aferir esta faixa de tensão com resolução suficiente, além disso, este sinal é muito suscetível a ruídos, impedindo a medição direta. Assim, um circuito eletrônico é necessário para amplificar a diferença de tensão gerada entre os fios do termopar e, neste caso, foi escolhido o amplificador de instrumentação AD627 da Analog Devices. Este CI é bastante prático para a aplicação em questão, pois atende às necessidades da medição, pode ser

alimentado tanto com fonte simétrica quanto com fonte simples, possui boa rejeição a ruídos e o ganho é ajustável através de um único resistor externo.

O AD627 possui um terminal de referência (V_{ref} – pino 5) que serve para definir o “zero” na saída do amplificador, assim, pode ser utilizado como um offset de tensão na saída.

Para o CI AD627 e também para outros amplificadores, geralmente, as limitações para o ganho máximo a ser atingido são definidas pelo intervalo do sinal de saída. Entretanto, para o caso da utilização de fonte de alimentação simples como é o caso atual, outras limitações são impostas.

Neste caso existe uma interdependência entre os intervalos de tensão dos pinos do amplificador. A explicação detalhada incluindo o circuito em análise é apresentada em (AD627, 2001).

A Figura 16 mostra o esquema simplificado do AD627.

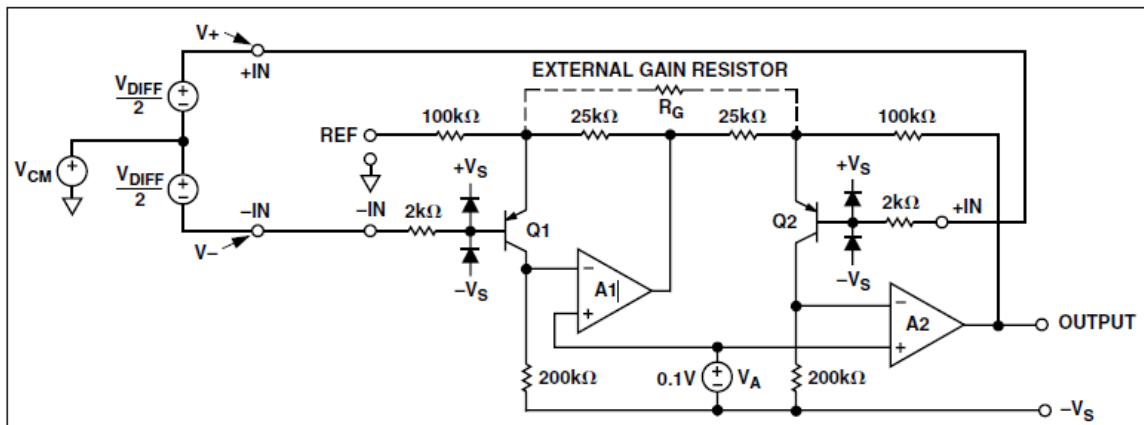


Figura 16 – Esquema interno simplificado do AD627.
Fonte: AD627, 2001.

No esquema, a tensão de saída do amplificador operacional “A1” é função das tensões nos pinos de entrada IN+ e IN-, além dos valores da tensão no pino de referência REF e do resistor de ganho R_G , sendo que a equação é dada pela expressão em (1).

$$V_{A1} = 1,25 \times (V_- + 0,5) - 0,25 \times V_{REF} - (V_+ - V_-) \times 25000/R_G \quad (1)$$

Basicamente, a tensão V_{A1} precisa estar 50 mV acima da alimentação negativa e, 200 mV abaixo da tensão positiva, para qualquer valor do intervalo de tensão possível em IN- e IN+.

Fica evidente pela equação que com o acréscimo de V_{REF} a tensão V_{A1} tende a diminuir e o mesmo ocorre com o aumento da diferença de tensão entre os pinos de entrada IN+ e IN-.

Para a alimentação com fonte simples esta limitação em V_{A1} se torna crítica, pois, o intervalo admissível está entre 50 mV e 4,8 V, que é menor com relação à fonte simétrica (- 4,95 V e 4,8 V).

Em resumo, com a utilização de fonte simples é preciso que ao realizar o projeto seja verificado pela equação (1) se os limites admissíveis para V_{A1} foram satisfeitos para todo o intervalo possível da tensão de entrada em IN+ e IN-.

Para este projeto, a entrada IN- foi conectada diretamente ao GND. Para a tensão V_{REF} é utilizado um divisor de tensão, fazendo a tensão $V_{REF} = 1 V$, ou seja, offset de 1 V na saída. A tensão de saída é dada por:

$$V_{OUT} = V_{REF} + G \times (V_+ - V_-) \quad (2)$$

Assim, como a tensão amostrada está entre 0 mV e 7,666 mV, um ganho de aproximadamente 200 é suficiente, sendo que a saída estará entre 1 V e 2,5332 V.

A equação para o cálculo do ganho é

$$G = 5 + 200k\Omega / Rg \quad (3)$$

Assim, com $Rg = 1,05 k\Omega$, o ganho será $G = 195,48$.

Como a resolução é de aproximadamente 3,22 mV/bit (utilizando 3,3 V como referência e 10 bits do AD) não haverá problema pois a variação do termopar é igual ou superior à aproximadamente 7,8 mV/bit.

Por fim, devido à utilização da fonte de alimentação simples, o circuito deve atender às especificações de V_{A1} . Para as especificações propostas no projeto, o cálculo de verificação com a equação (1) para os limites de diferença de tensão na

entrada entre 0 V e 7,666 mV, fornece um intervalo para V_{A1} fica entre 192,5 mV e 375 mV, o que atende os limites estabelecidos.

A Quadro 2 mostra as características básicas do circuito de amplificação.

Vin	Vref	Fonte	Rg	Ganho	Saída
V- = 0V; V+ = 0mV a 7,666mV	1 V	5 V	1,05 k Ω	195,48	1 V a 2,5 V

Quadro 2 – Características do circuito de amplificação do sinal do termopar.

Fonte: Autoria própria.

Após instalar o termopar na caixa das PCs verificou-se que a interferência eletromagnética do sistema impedia o correto funcionamento do termopar, devido à ausência da malha de aterramento no cabo. Assim, para contornar o problema, a malha de um cabo coaxial de televisão foi retirada e o cabo do termopar foi completamente revestido com esta malha. Então, a malha foi aterrada junto à referência do MP. Este procedimento resolveu o problema da interferência eletromagnética no cabo do termopar.

3.7 MICROCONTROLADORES

No módulo principal são utilizados dois microcontroladores PIC18F4550. Não é utilizado apenas um, pois não teria pinos suficientes além da memória limitada do microcontrolador em questão.

O “microcontrolador 1” é responsável pelas seguintes operações:

- Sensoriamento dos LDRs;
- Controle dos motores do seguidor solar;
- Comunicação RS485.

O “microcontrolador 2” é responsável pelas seguintes operações:

- Sensoriamento da temperatura;
- Interface com o display LCD;
- Gravação no cartão SD.
- Cristal externo de 32.768 kHz para utilizar o TIMER1 do microcontrolador como relógio de tempo real (RTC);

Ambos os microcontroladores possuem as seguintes características:

- *Clock* externo fornecido por cristal de 20 MHz;
- Um switch (SW0) compartilhado entre os dois;
- Dois switches exclusivos para interface IHM (Interface Homem-Máquina)
- Um LED de sinalização e testes;
- Pino de reset no MCLR (*Master Clear*);

3.7.1 Microcontrolador 1

A Figura 17 mostra o esquemático do microcontrolador 1.

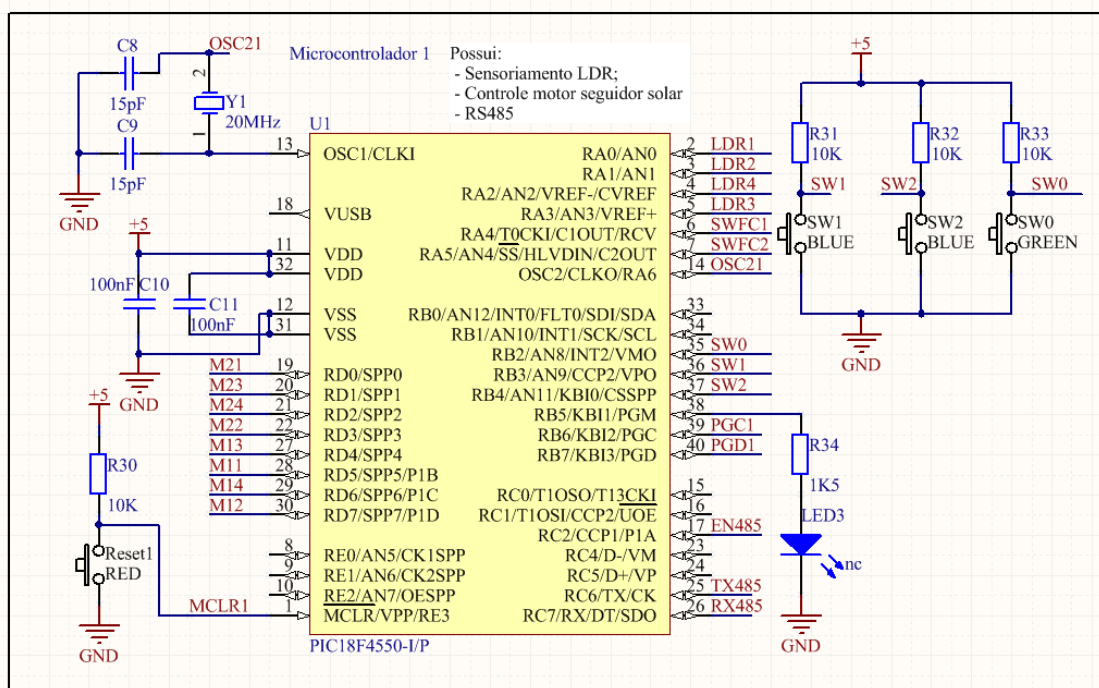


Figura 17 - Esquemático para o microcontrolador 1.
Fonte: Autoria própria.

As conexões que descrevem cada pino foram especificadas nos tópicos acima.

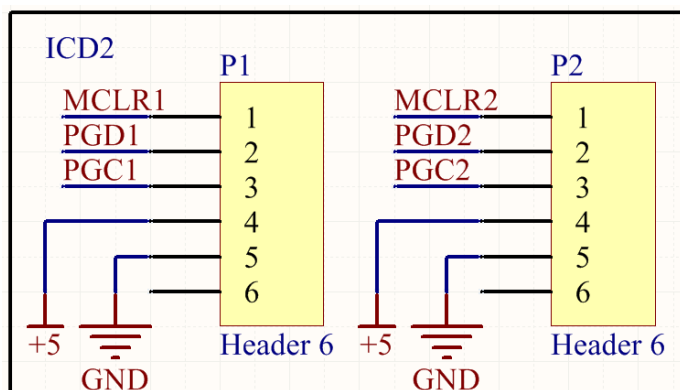


Figura 19 - Esquemático para gravação *in-circuit*.
Fonte: Autoria própria.

São utilizados dois conectores para gravação *in-circuit*, pois no MP existem dois microcontroladores, conforme já descrito.

3.9 LAYOUT DO MÓDULO PRINCIPAL

O layout da placa do módulo principal foi desenvolvido e é mostrado na Figura 20.

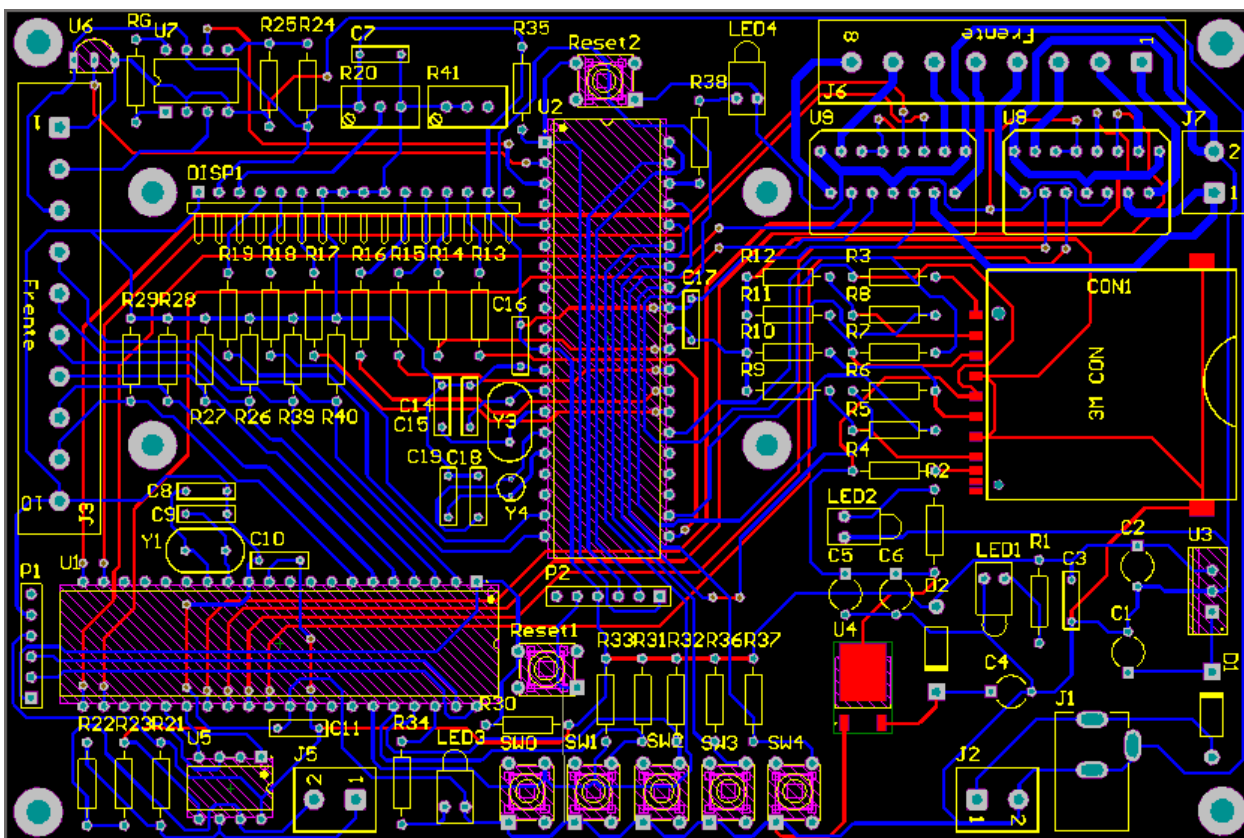
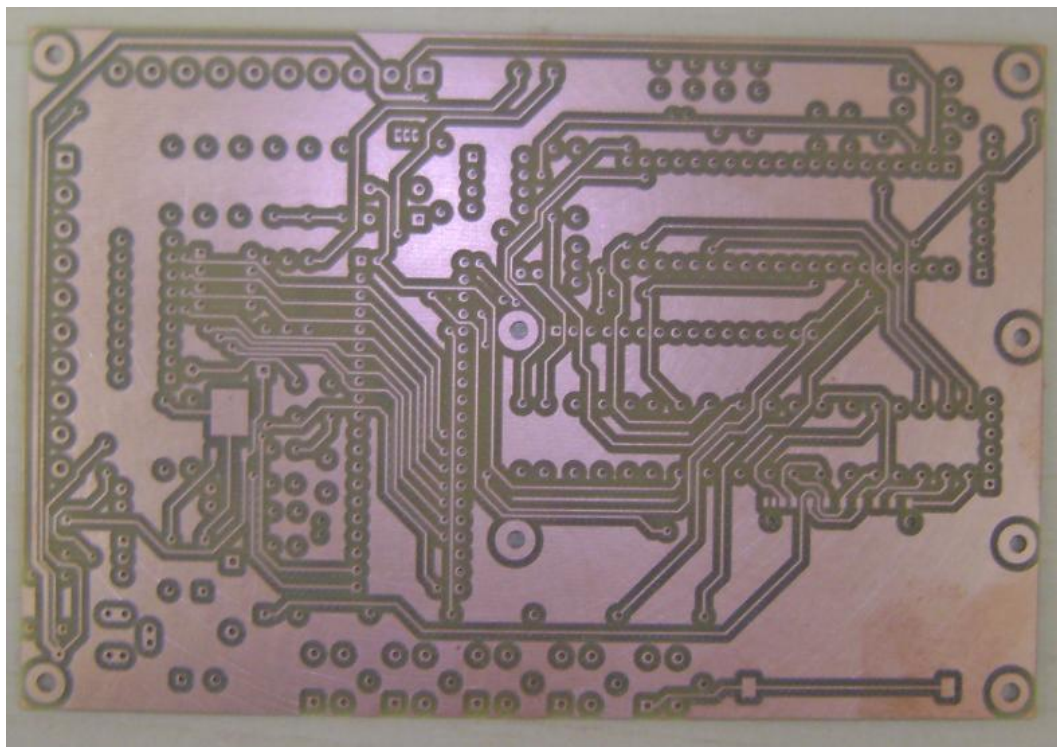


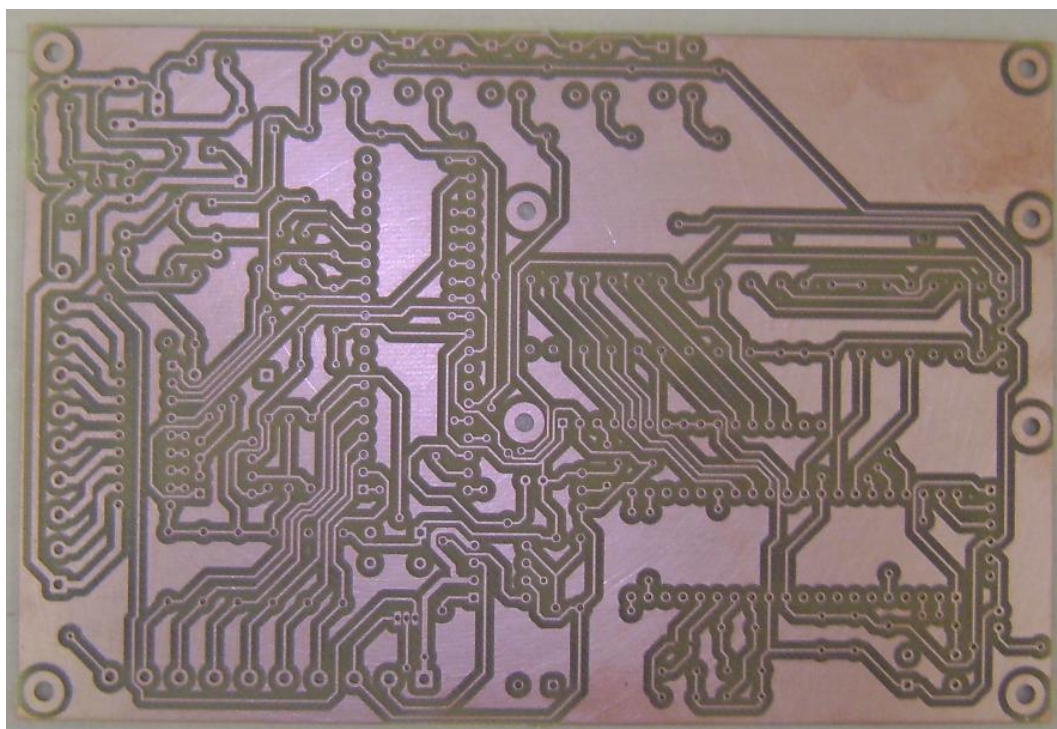
Figura 20 – Layout do módulo principal.
Fonte: Autoria própria.

Os diodos de roda livre não constam neste layout, pois foram instalados na parte de baixo das mesmas, em uma placa separada, economizando espaço na placa.

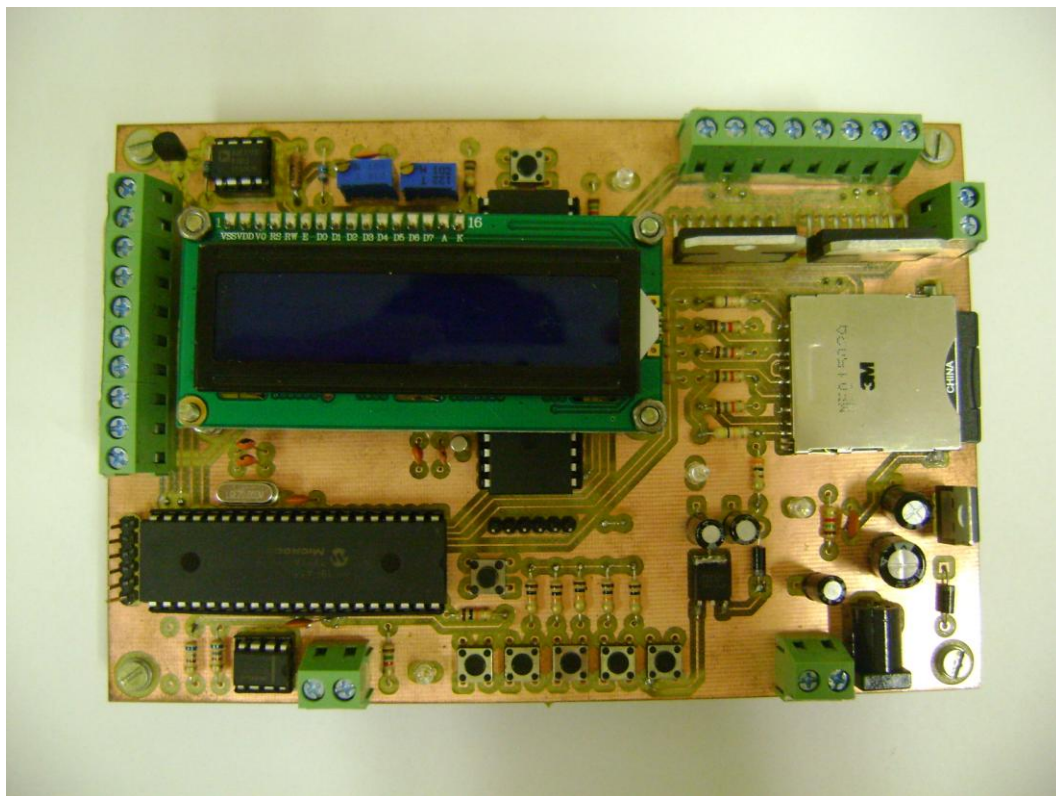
As Fotografias 31 – 37 mostram o resultado final antes e após a soldagem de todos os componentes.



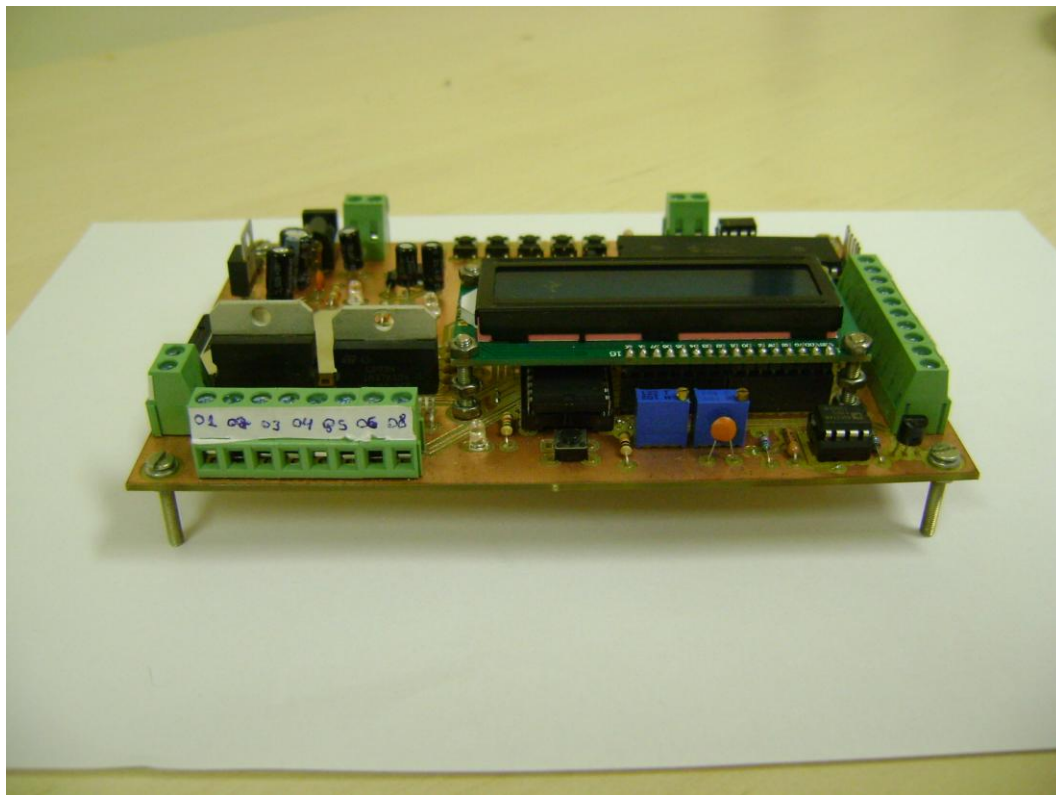
Fotografia 31 – Módulo principal – “top view”.
Fonte: Autoria própria.



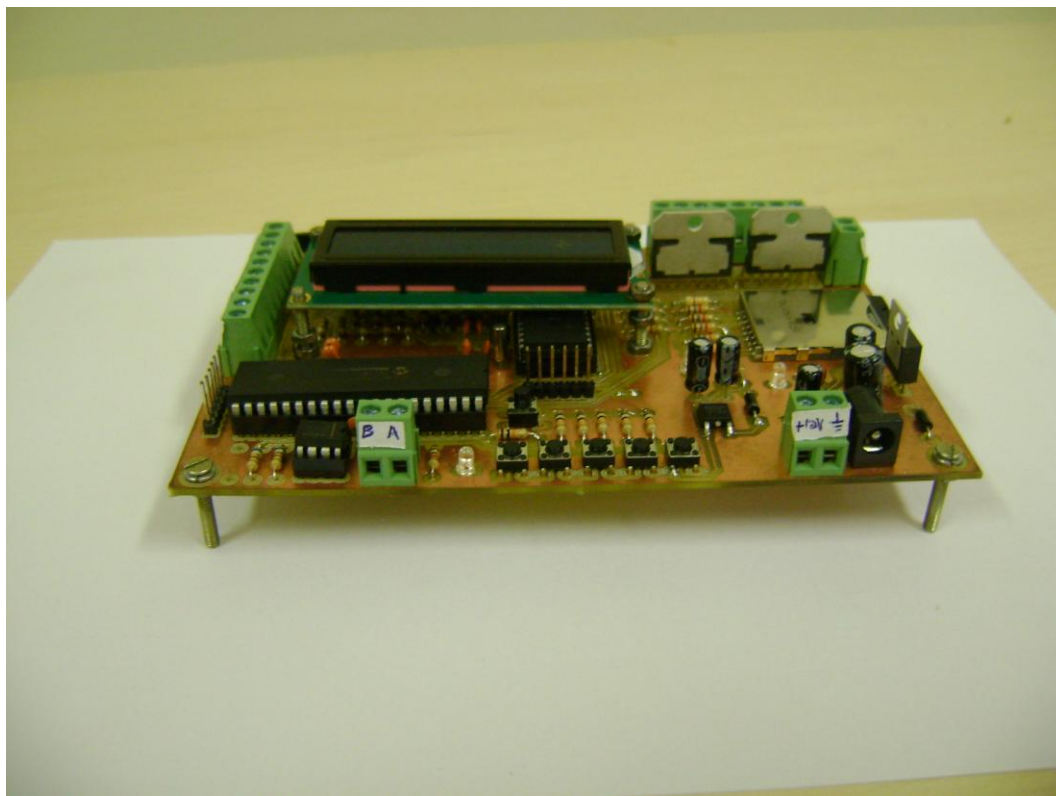
Fotografia 32 – Módulo principal – “bottom view”.
Fonte: Autoria própria.



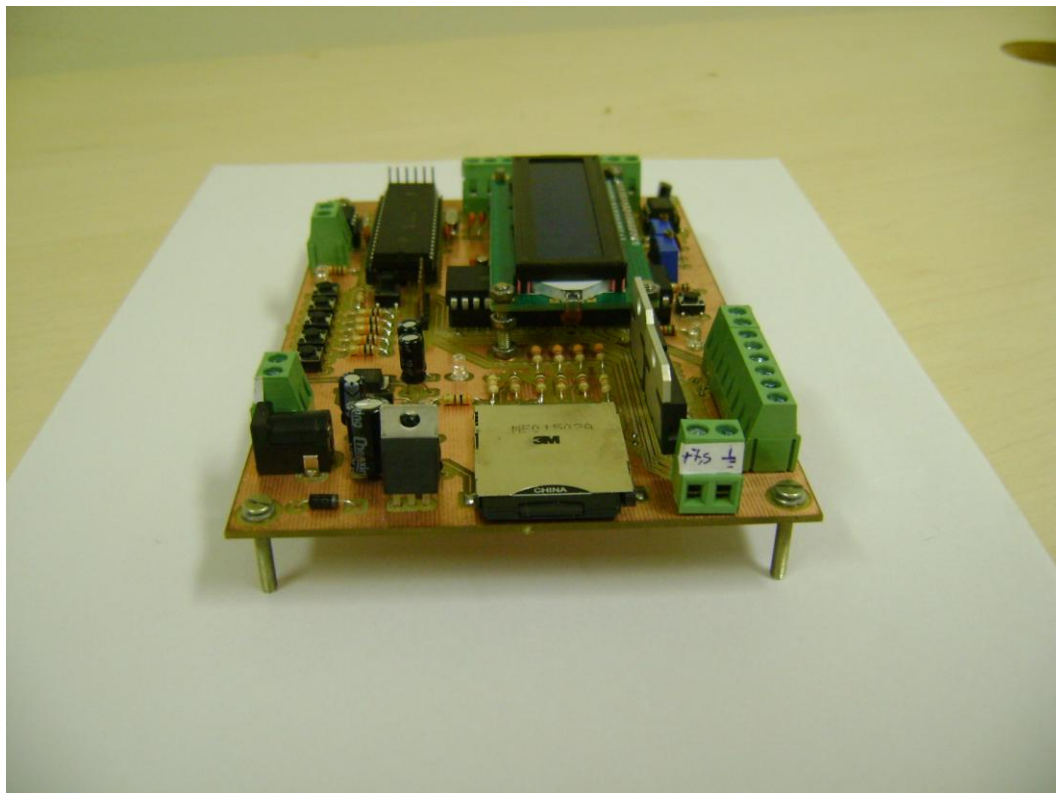
Fotografia 33 – Módulo principal – visão superior.
Fonte: Autoria própria.



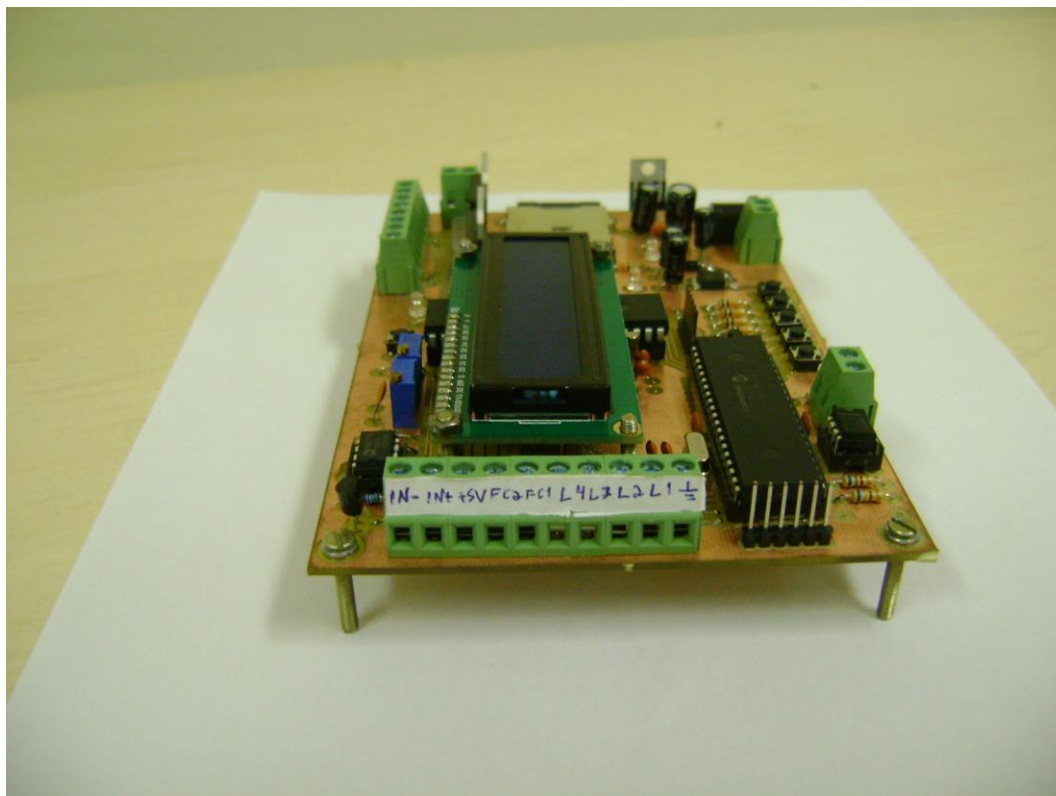
Fotografia 34 – Módulo principal – vista dos conectores de saída dos motores.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 35 – Módulo principal – vista dos conectores de entrada.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 36 – Módulo principal – vista do SD card.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 37 – Módulo principal – vista dos conectores dos sensores.
Fonte: Autoria própria.

A corrente em cada um dos CIs L298N é constante para este circuito e aproximadamente igual a 1,2 A com 7,5 V. Isso gera um aquecimento elevado no CI e, devido a isto, foram instalados dissipadores no mesmo. Os dissipadores são idênticos aos instalados nos módulos controladores e são mostrados nas fotografias do capítulo que trata sobre os módulos controladores, logo a seguir.

4 MÓDULO CONTROLADOR

No esquemático do módulo controlador o hardware de interface RS485 e o controle dos motores de passo são idênticos ao do MP e não serão descritos aqui.

4.1 ENTRADA DO CIRCUITO

A Figura 21 mostra o esquemático da entrada.

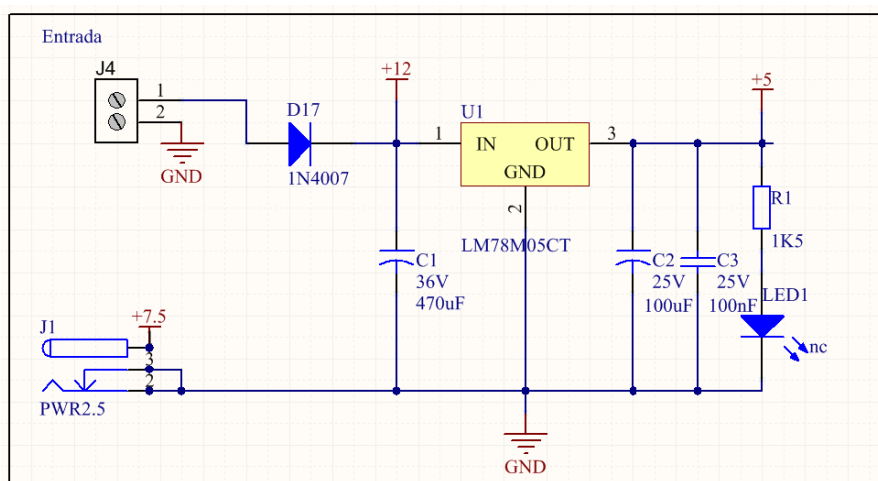


Figura 21 - Esquemático da entrada do MC.
Fonte: Autoria própria.

Trata-se do mesmo caso do módulo principal com a exceção de não possuir o regulador de 3.3 V. Além disso, para o MC a entrada do +12 V é possível apenas pelo conector KRE e a entrada das fontes de +7,5 V é apenas pelo conector “Jack j4”

4.2 MICROCONTROLADOR

A Figura 22 mostra o esquemático do microcontrolador do MC.

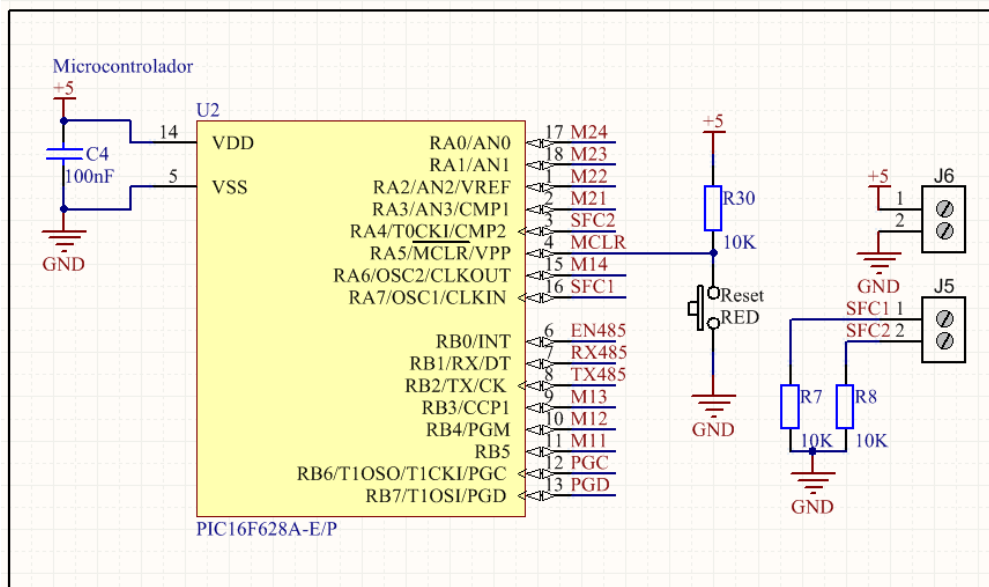


Figura 22 - Esquemático do microcontrolador do MC.

Fonte: Autoria própria.

O microcontrolador utilizado neste módulo é um PIC16F628A. O microcontrolador apenas recebe via RS485 as coordenadas da posição solar e então controla os motores.

Existem dois sensores fim de curso a fim de gerarem a referência do movimento de rotação e de inclinação.

O conector J6 serve para fornecer a referência de tensão aos sensores fim de curso e o GND caso seja necessário para algum teste.

4.3 LAYOUT DO MÓDULO CONTROLADOR

O layout do módulo controlador foi também desenvolvido e é mostrado na Figura 23.

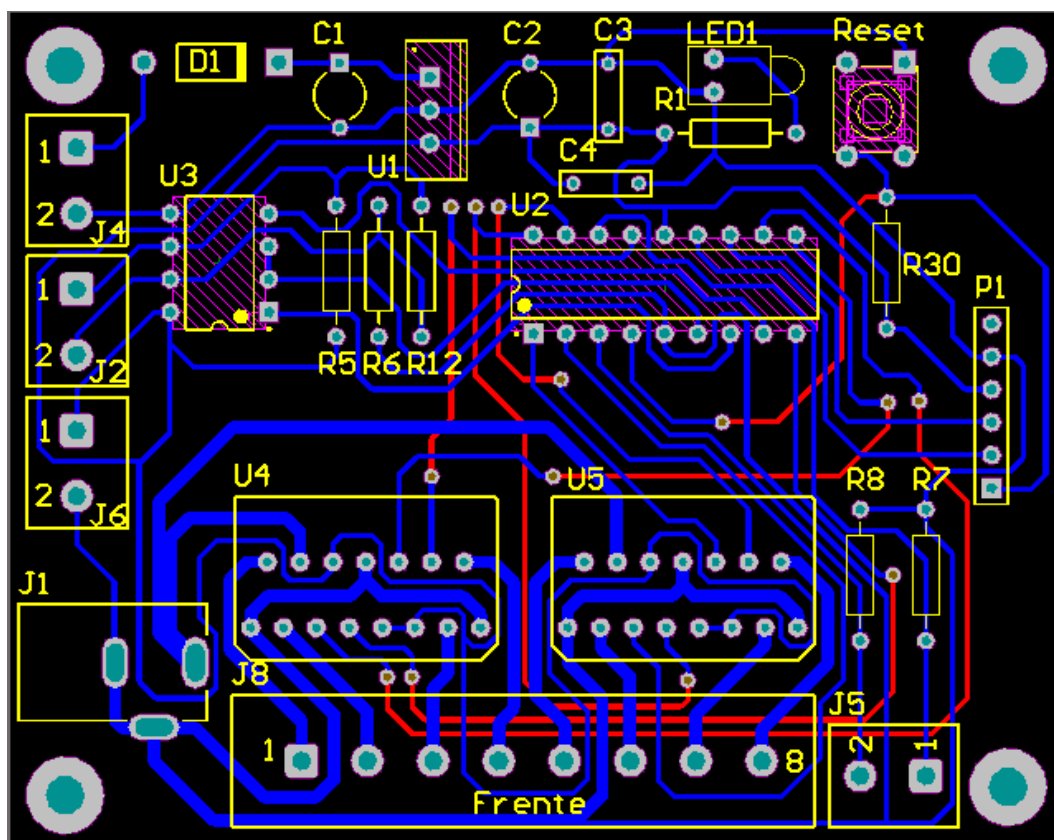
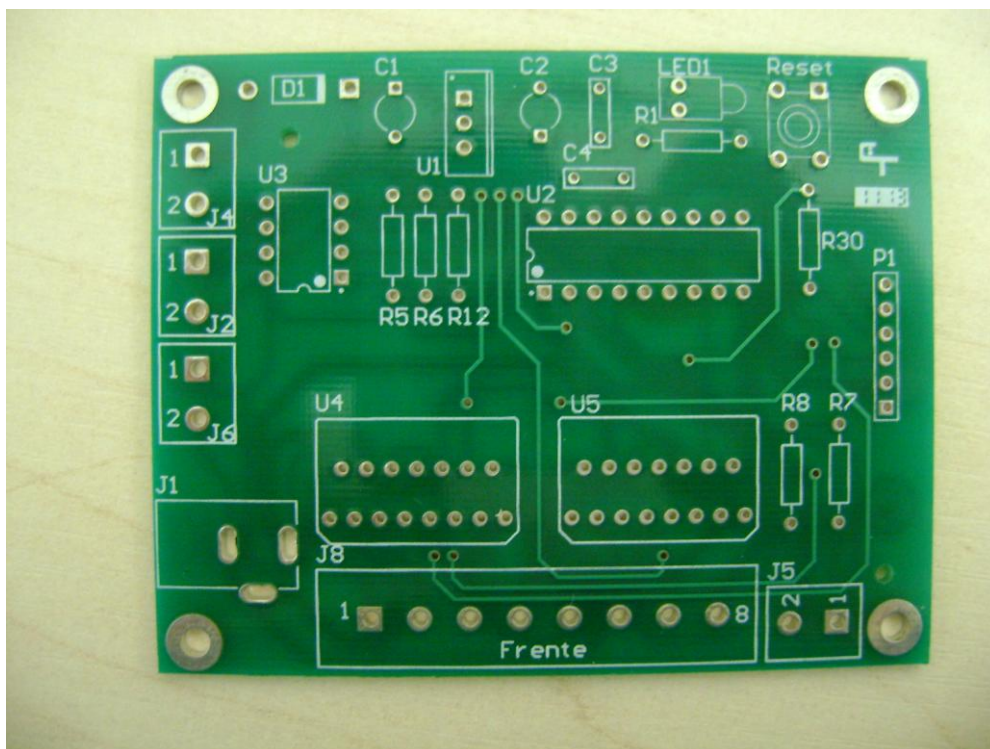


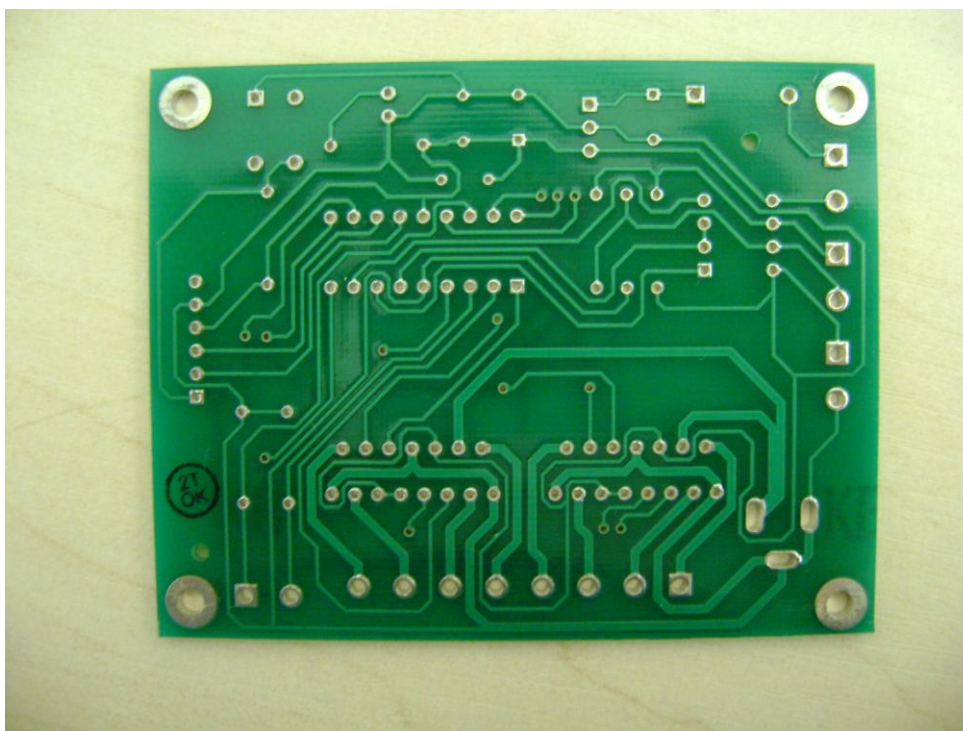
Figura 23 – Layout do módulo controlador.
Fonte: Autoria própria.

Os diodos de roda livre não constam neste layout, pois foram instalados na parte de baixo das mesmas, em uma placa separada, economizando espaço na placa do MC.

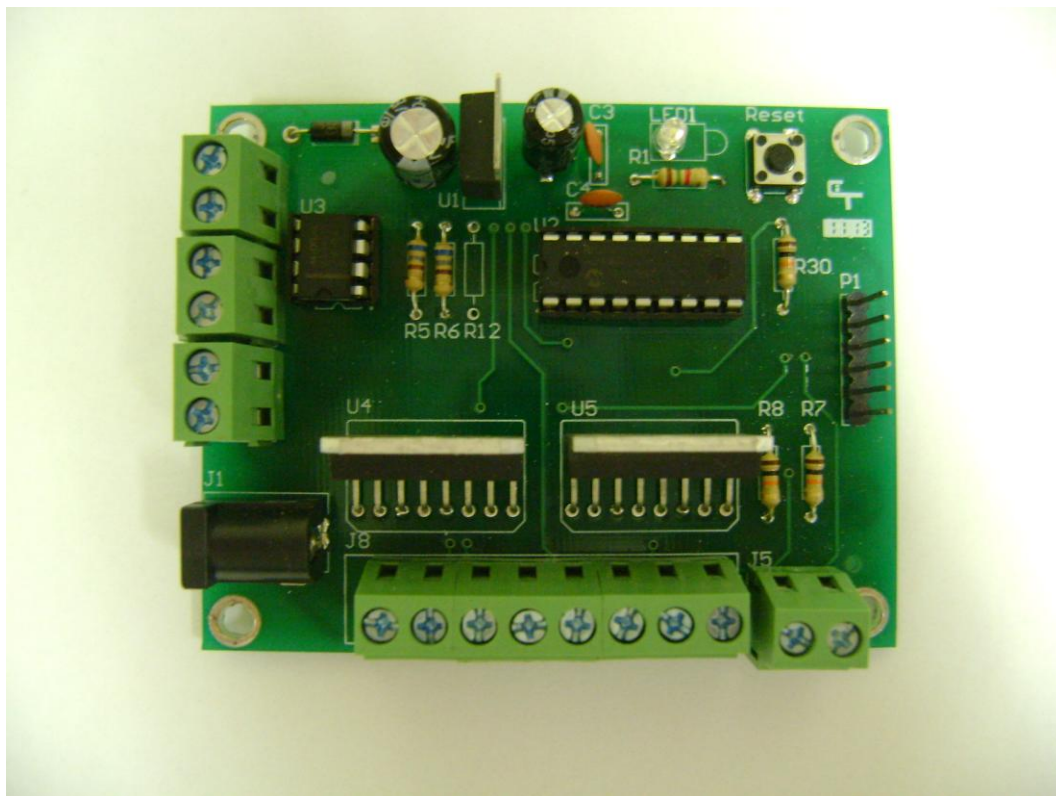
As Fotografias 38 – 44 mostram o resultado final antes e após soldados todos os componentes.



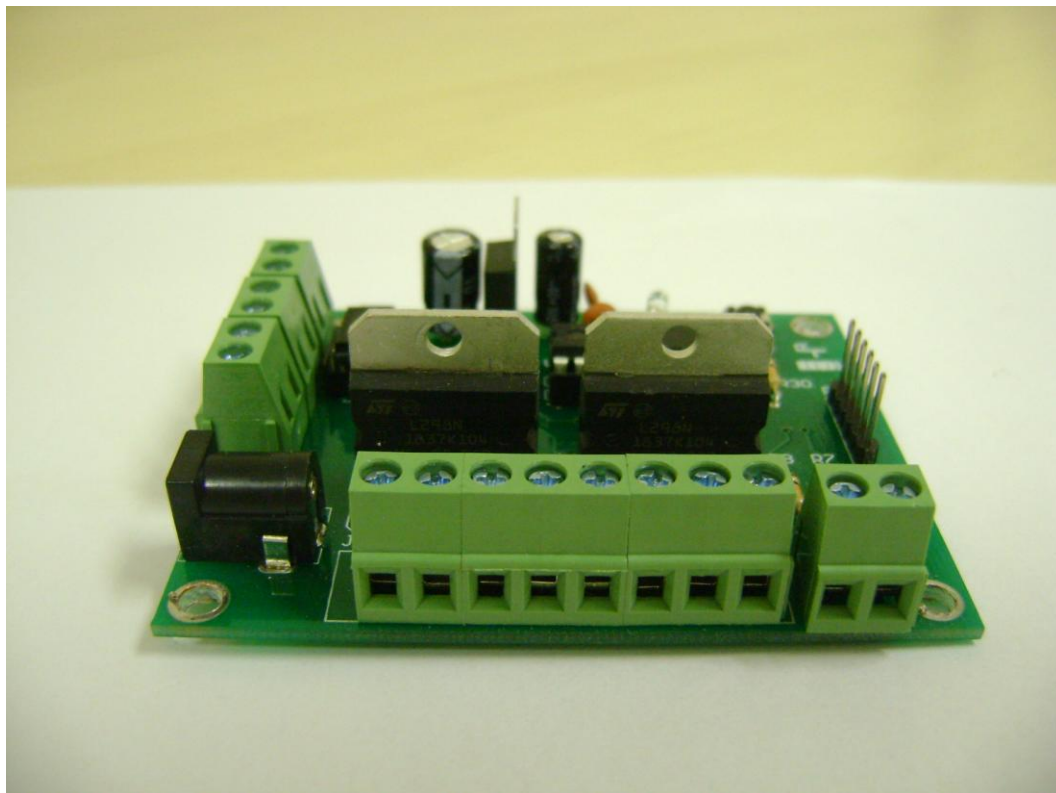
Fotografia 38 – Módulo controlador – “top view”.
Fonte: Autoria própria.



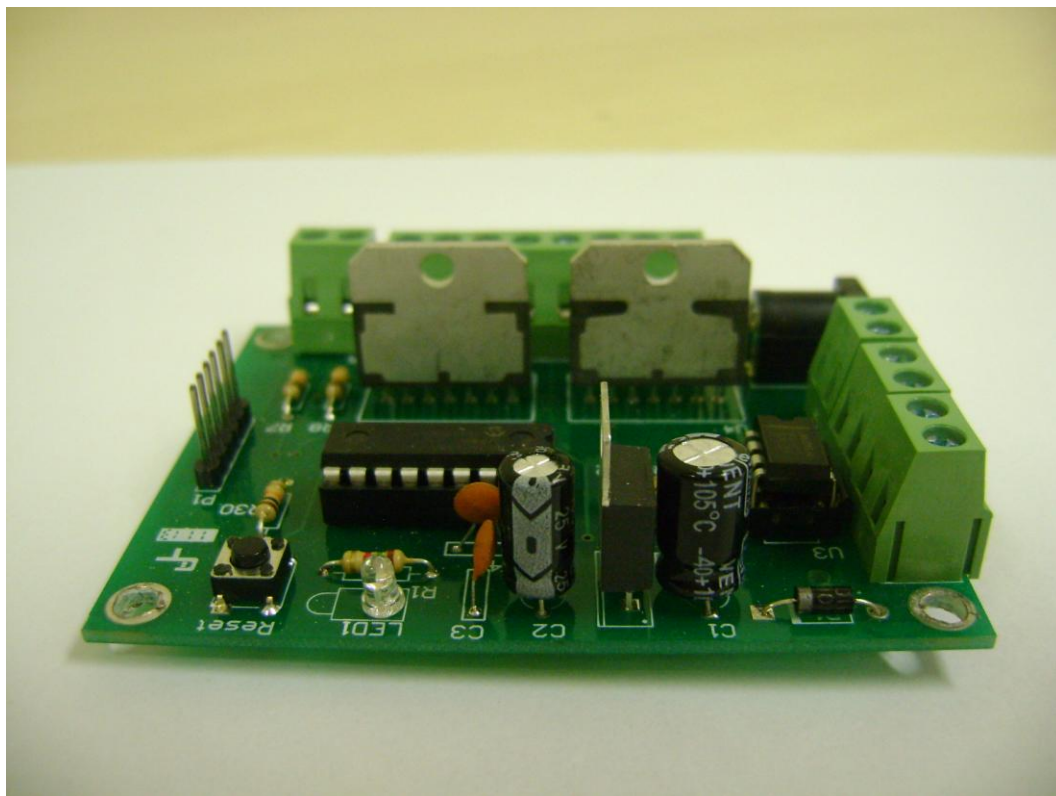
Fotografia 39 – Módulo controlador – “bottom view”.
Fonte: Autoria própria.



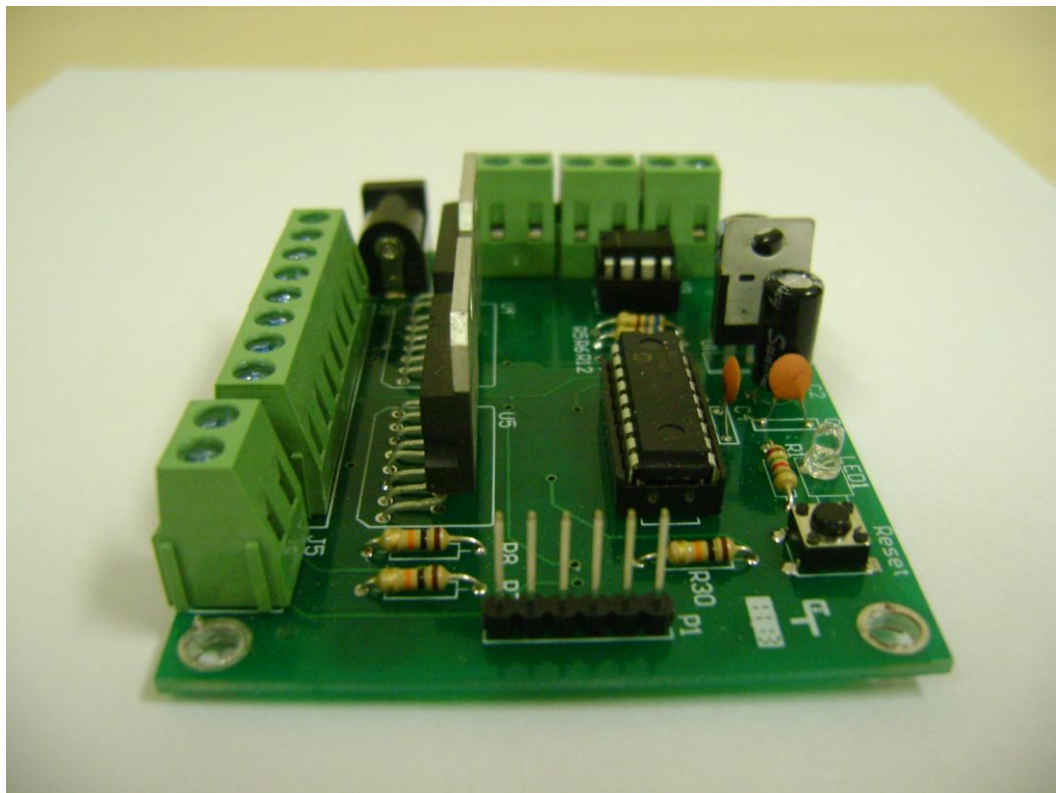
Fotografia 40 – Módulo principal – visão superior.
Fonte: Autoria própria.



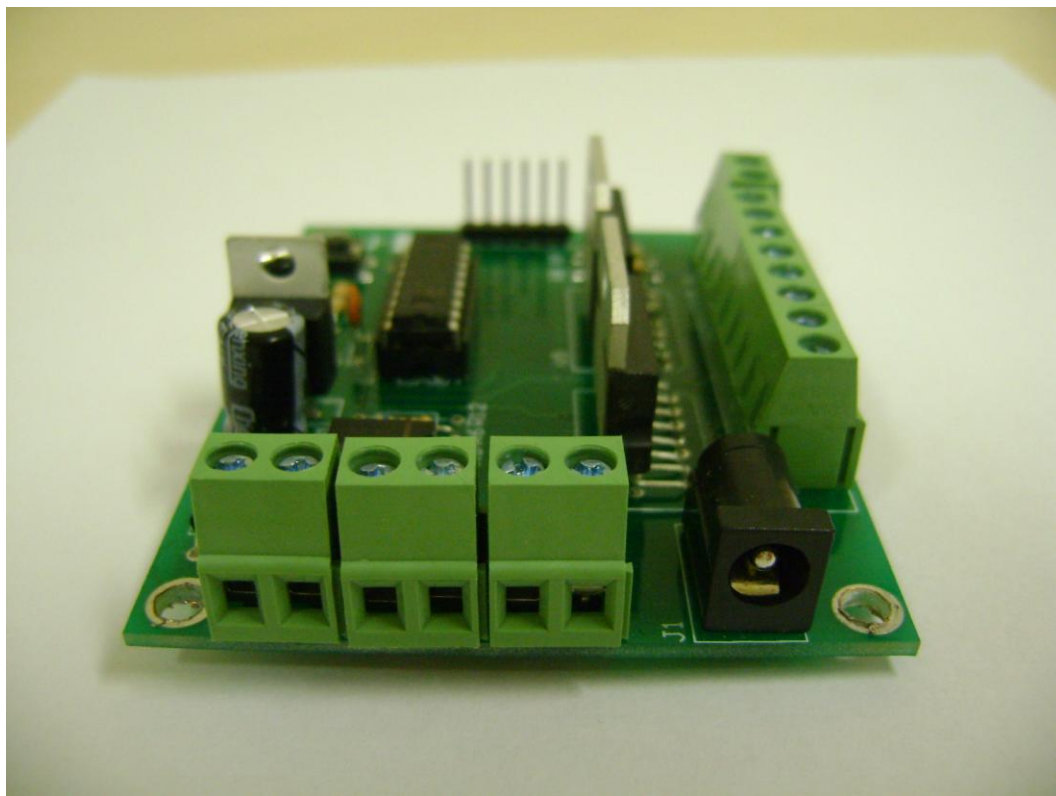
Fotografia 41 – Módulo principal – vista dos conectores de saída dos motores.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 42 – Módulo principal – dos componentes do circuito de entrada.
Fonte: Autoria própria.

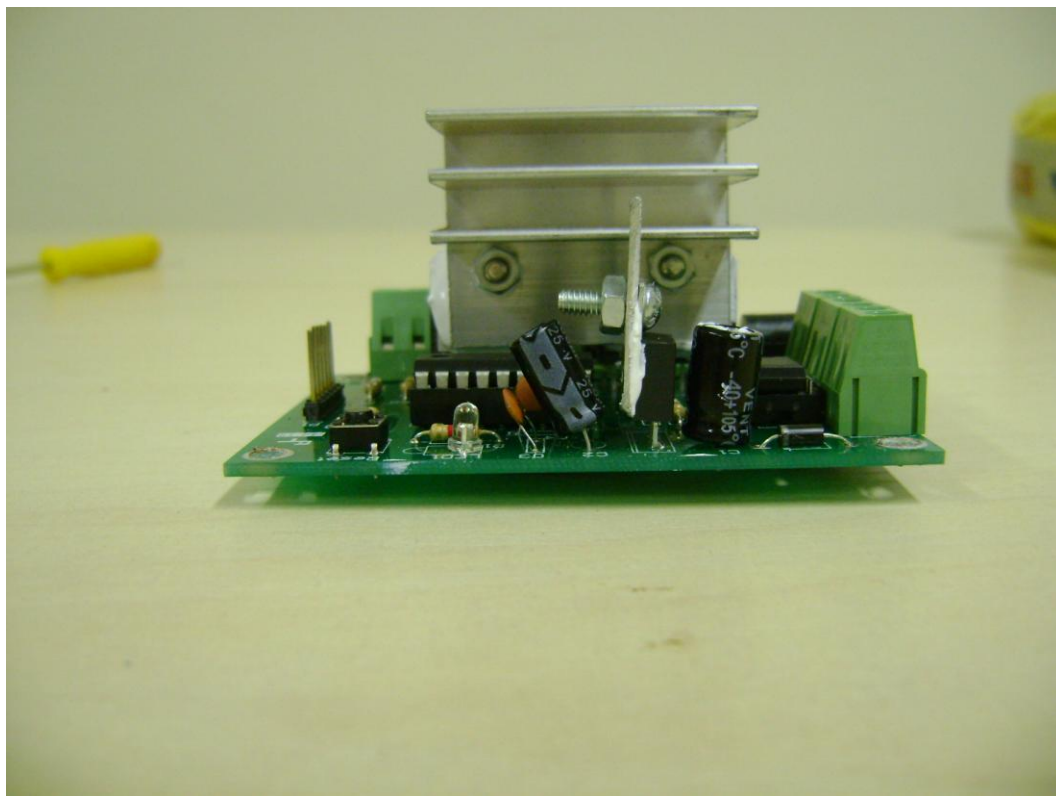


Fotografia 43 – Módulo principal – vista do conector de gravação *in-circuit*.
Fonte: Autoria própria.

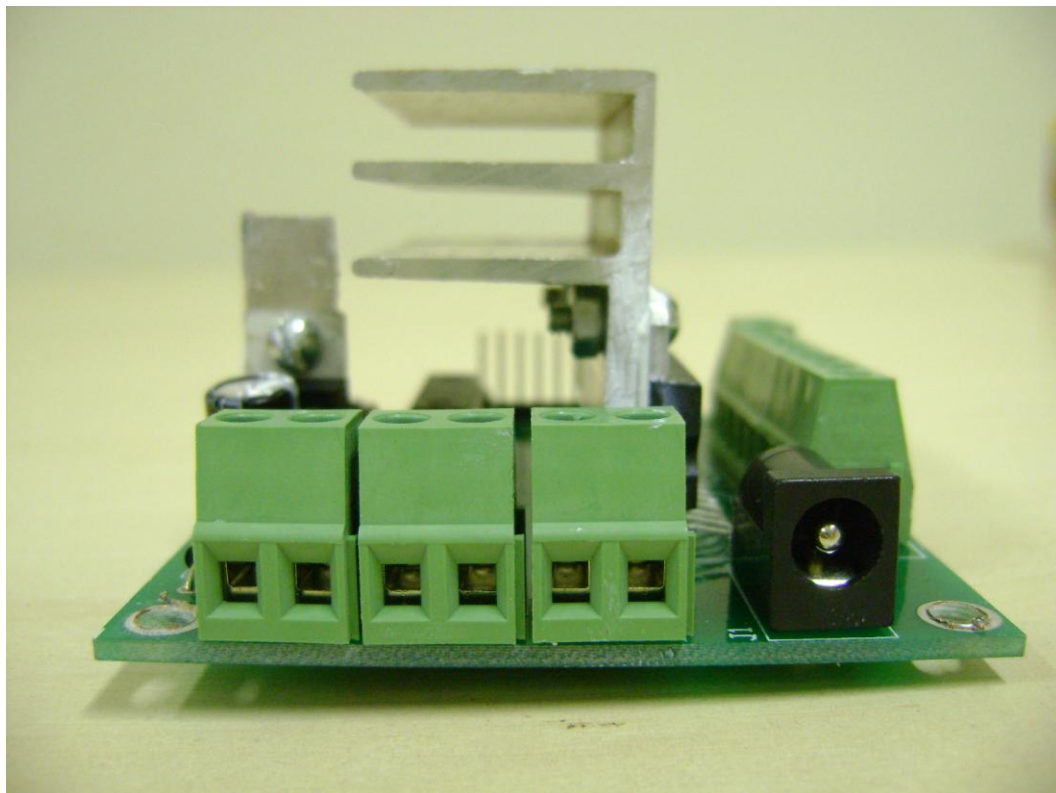


**Fotografia 44 – Módulo principal – vista dos conector jack.
Fonte: Autoria própria.**

Assim como no módulo principal a corrente em cada um dos CIs L298N é constante e aproximadamente igual a 1,2 A com 7,5 V. Isso gera um aquecimento elevado no CI e, devido a isto, foram instalados dissipadores nos CIs L298 conforme as figuras abaixo. Além disso, foi também instalado um dissipador para o regulador de tensão devido ao aquecimento elevado verificado nos testes. Os dissipadores são idênticos para todas as placas incluindo o módulo principal. As Fotografias 45 e 46 mostram como ficou a placa após a instalação dos dissipadores.



Fotografia 45 – Dissipadores de temperatura – visão frontal.
Fonte: Autoria própria.



Fotografia 46 – Dissipadores de temperatura – visão lateral.
Fonte: Autoria própria.

5 FIRMWARE

Conforme já descritos, foram utilizados dois microcontroladores PIC18F4550 no módulo principal e um microcontrolador PIC16F628A em cada módulo controlador.

Para o código do PIC18F4550 utilizou-se o compilador C18, e para o PIC16F628A o compilador Hitech para microcontroladores da família PIC16, sendo que foram utilizadas as versões livres fornecidas pela Microchip.

5.1 ALGORITMO PARA O SEGUIDOR SOLAR

Para o seguidor solar foi necessário desenvolver uma lógica que faça relação entre as diferenças apresentadas pelos quatro LDRs, permitindo que o seguidor encontre a posição solar, porém, sem que o seu movimento seja aleatório, seguindo um algoritmo definido.

Para compreender como foi feito o algoritmo do seguidor solar deve-se primeiramente definir quais são as coordenadas do espaço tridimensional a serem consideradas. Neste trabalho, as coordenadas são definidas como X, Y e Z e foram consideradas conforme na Figura 24, onde a coordenada Z está "saindo" da página.

Além disso, definiu-se o ângulo de rotação como representado pela letra grega θ e o ângulo de inclinação como a letra grega ϕ , conforme mostrado na Figura 25.

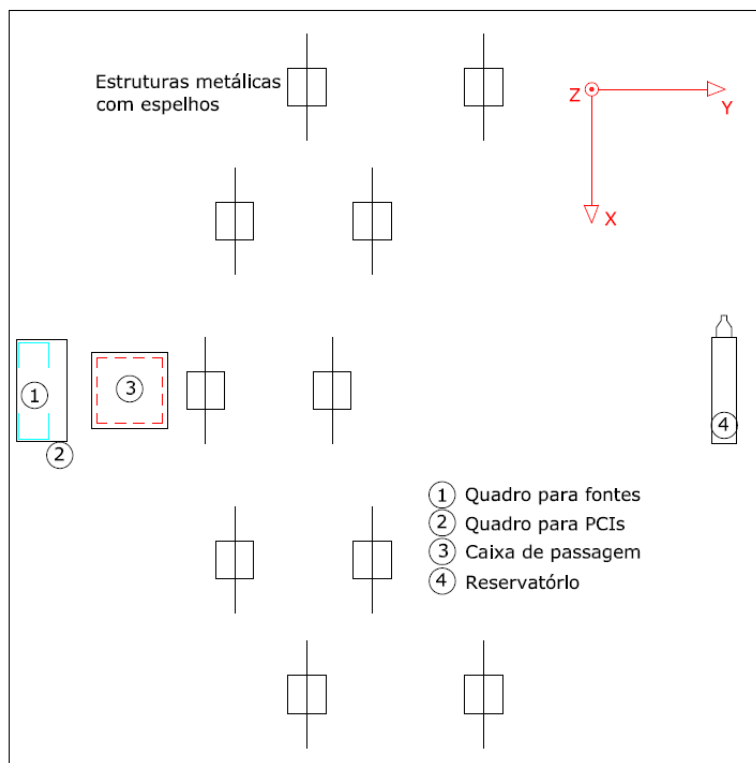


Figura 24 - Definição das coordenadas X, Y e Z.
Fonte: Autoria própria.

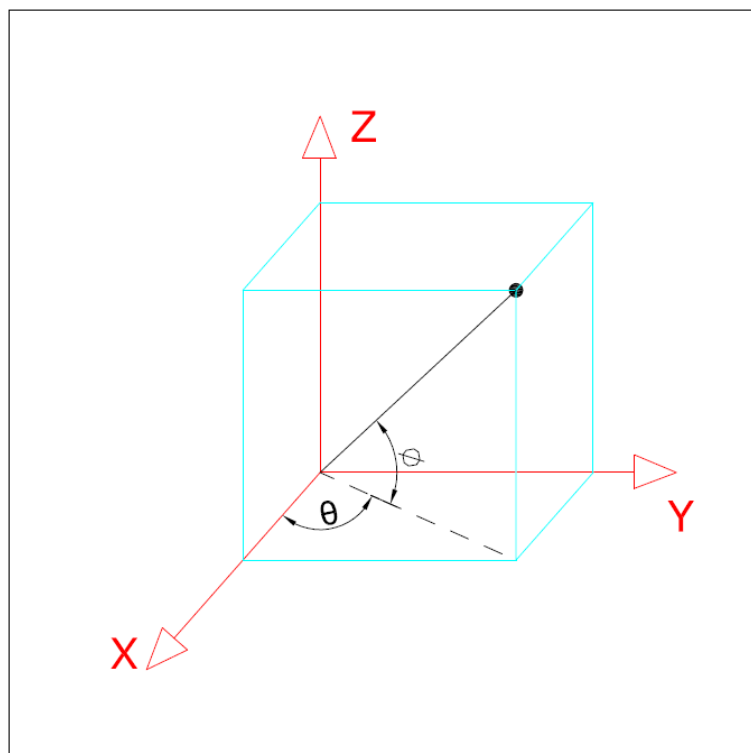


Figura 25 - Definição dos ângulos θ e ϕ .
Fonte: Autoria própria.

O seguidor está instalado sobre a caixa das PCIs e é sustentado pelos três tubos de ferro galvanizado que sustentam também a caixa das PCIs e das fontes.

O seguidor solar possui uma limitação mecânica de rotação que o impede de girar mais que aproximadamente 270° . Devido a isso, o seguidor solar não possui um movimento de rotação completo e, portanto, não pode encontrar o sol se o mesmo estiver em sua "região morta", ou seja, a região de rotação que não pode alcançar. Devido a isto, o seguidor solar foi instalado de forma que em todas as estações do ano o sol esteja sempre dentro da faixa de movimentação do seguidor. Para isso, o seguidor foi instalado com um ângulo de rotação de -27° com relação ao eixo x, conforme mostra a Figura 26.

Com este offset no ângulo de rotação o sol se encontrará sempre em uma posição dentro dos limites do seguidor, considerando o local de instalação do sistema.

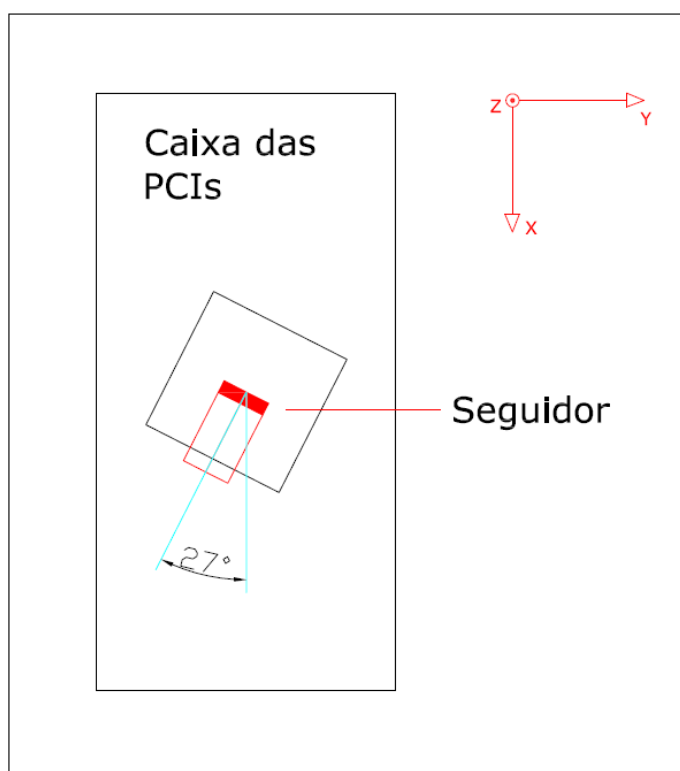


Figura 26 – Offset de ângulo do seguidor solar.
Fonte: Autoria própria.

Assim, o seguidor solar na sua posição inicial, ou seja, quando ambos os sensores fim de curso forem ativados, terá -27° de rotação e 0° de inclinação.

Outra definição importante a ser feita é a identificação de cada um dos LDRs assim como qual a posição correta de cada um. Para isto, definiu-se cada LDR conforme mostrado na Figura 27, sendo esta a vista frontal do seguidor solar quando o mesmo se encontra na referência.



Figura 27 – Posição dos LDRs no seguidor solar.
Fonte: Autoria própria.

Também se definiu que o motor de rotação do seguidor solar, que realiza o movimento em θ é chamado de "*Motor 1*" e o de inclinação, que realiza movimento em ϕ , é chamado de "*Motor 2*". Por fim, quanto ao sentido de rotação de cada motor têm-se:

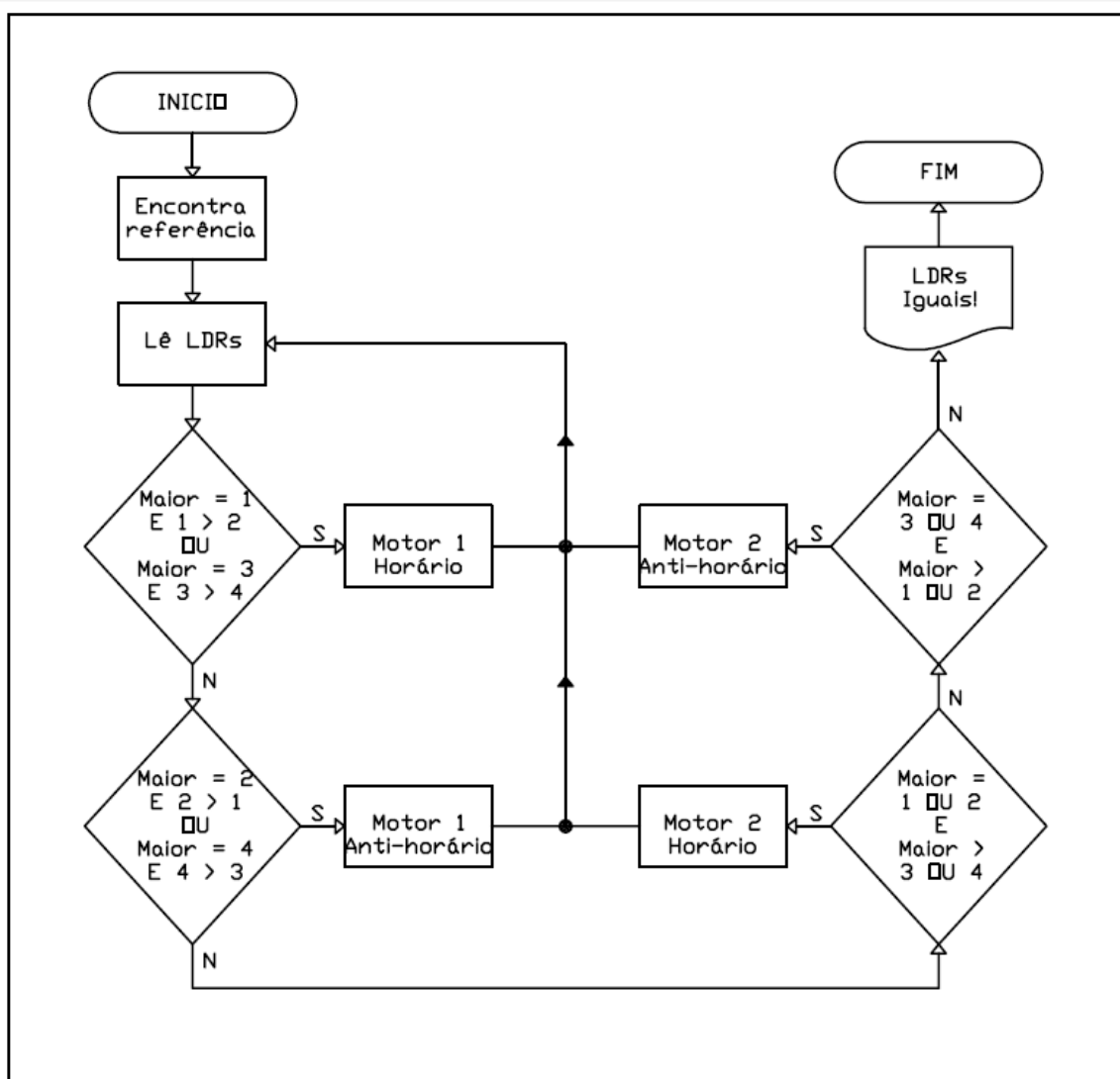
- Para o motor 1:
 - Sentido horário: diminui o módulo de θ ;
 - Sentido anti-horário: aumenta o módulo de θ .
- Para o motor 2:
 - Sentido horário: diminui o módulo de ϕ ;
 - Sentido anti-horário: aumenta o módulo de ϕ .

Realizadas tais definições, é possível compreender qual a lógica do algoritmo do seguidor. O princípio é encontrar uma posição para qual a luminosidade em ambos os LDRs seja considerada a mesma, dentro de uma tolerância devido às

variações intrínsecas dos próprios sensores. O Fluxograma 1 mostra quais os procedimentos do algoritmo do seguidor solar de forma simplificada. Deve ser considerado para compreensão do fluxograma que:

- *Maior*: É o LDR com a maior intensidade luminosa;
- 1, 2, 3 e 4: São os LDRs 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

Esta simplificação no texto foi feita apenas por questão de espaço.



Fluxograma 1 - Fluxograma do algoritmo - Seguidor Solar.
Fonte: Autoria própria.

Seguindo o fluxograma, a primeira ação a ser realizada é encontrar a posição de referência do seguidor e, então, se inicia o procedimento para encontrar a posição solar.

Os LDRs possuem sua resistência elétrica inversamente proporcional à intensidade luminosa. Assim, quanto maior a luminosidade maior será a tensão medida na porta analógica do microcontrolador. Então, após realizar a leitura dos LDRs, sabe-se que o LDR com maior intensidade luminosa incidente é o de maior valor do ADC.

Então, ao encontrar o maior valor de luminosidade são realizadas as comparações. Pelo fluxograma percebe-se que a prioridade é encontrar o ângulo de rotação do sol e, depois, o ângulo de inclinação. Para isso, deve-se primeiramente encontrar o ponto no qual o LDR3 e o LDR4, ou, o LDR1 e o LDR2 possuam a mesma intensidade luminosa e sejam os LDRs com a maior intensidade luminosa. Esta condição garante que o ângulo de rotação do sol foi encontrado.

Depois, deve-se encontrar a posição de inclinação do sol. Para isso, deve-se trabalhar com o motor 2 até que o ponto de equilíbrio entre os LDRs seja atingido.

Conforme pode ser analisado no fluxograma o processo é dinâmico e dá prioridade ao movimento de rotação, pois, esta verificação é realizada primeiro.

Assim, ao término, tanto o ângulo θ quanto o ϕ , são conhecidos, pois são dados pelo número de passos que os motores 1 e 2 realizaram, respectivamente.

Um ponto importante são as limitações mecânicas do seguidor. A seguir estão descritas quais estas limitações e como o problema é contornado:

- O motor 1 precisa girar com um ângulo negativo: Isto não é possível pois o motor não pode ultrapassar o limite do sensor fim de curso. Neste caso o motor gira com um ângulo de 270° .
- O motor 2 precisa girar com um ângulo negativo: Isto não é possível pois o motor não pode ultrapassar o limite do sensor fim de curso. Neste caso o motor gira com um ângulo de 180° .
- O motor 1 precisa girar com um ângulo maior que 270° : Isto não é possível devido à limitação mecânicas. Neste caso o motor volta para a referência.
- O motor 2 precisa girar com um ângulo maior que 180° : Isto não é possível devido à limitação mecânicas. Neste caso o motor volta para a referência.

Sempre que uma destas ações de contorno é feita o processo de rastreamento do sol continua normalmente. Também, ao encontrar a posição solar, o seguidor possui um intervalo de 3 minutos para iniciar novo rastreamento. Este tempo é o suficiente para acompanhar a movimentação do sol.

Ao iniciar o processo de rastreamento, se o seguidor não encontrar a posição solar em 3 minutos o processo é encerrado e retomado novamente após mais 3 minutos. Isto se dá, pois, nuvens podem impedir os raios solares periodicamente.

5.2 CÁLCULOS DE MOVIMENTO DOS ESPELHOS

Para que possa refletir a luz que incide em sua superfície, os espelhos possuem uma superfície geralmente metálica de prata ou alumínio bem polida em um lado do vidro. Isto faz com que toda a incidência de luz que toca sua superfície seja redirecionada.

Em um espelho plano o raio incidente, o raio refletido e a reta normal que é perpendicular ao espelho no ponto onde o raio atinge a superfície são coplanares, ou seja, estão no mesmo plano. Além disso, a lei da reflexão diz que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão em relação à reta normal à superfície (HALLIDAY, RESNICK, WALKER, 2009, p. 17-18). Isto é ilustrado na Figura 28.

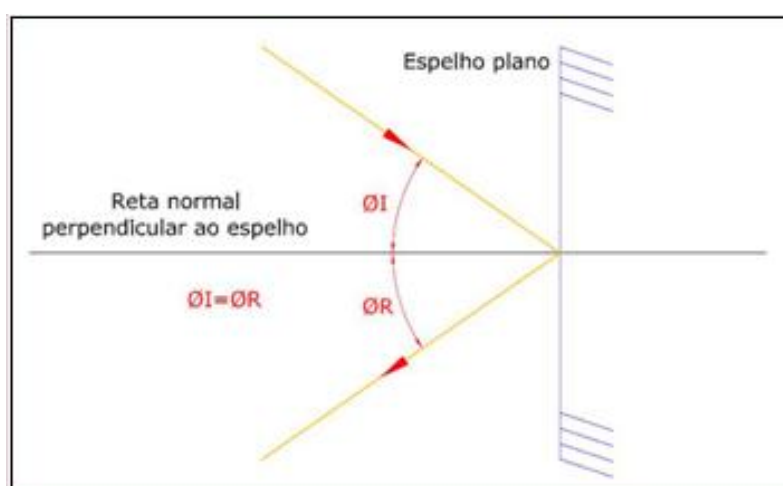


Figura 28 – Ângulos de incidência e reflexão em um espelho plano.
Fonte: Autoria própria.

Cada espelho é posicionado em um local diferente no espaço e, por isso, precisa existir uma equação geral que leve em consideração a posição do espelho para refletir o sol sempre para o mesmo local.

Para compreender como foi realizado o equacionamento, deve ser considerado um plano em que estejam contidos os pontos A , B e C , conforme a Figura 29. Neste plano, o ponto A representa o sol, o ponto B representa o centro do espelho e o ponto C representa o centro da caldeira. A reta que passa na bissetriz entre os segmentos AB e CB representa a reta normal ao espelho.

Como o sol está muito mais distante do espelho que o recipiente, pode-se considerar que existem infinitas retas paralelas ao segmento AB que tocam o espelho e, assim, se o centro do espelho refletir o sol para o recipiente, é o suficiente para que o mesmo ocorra para o restante do espelho, pois o efeito é exatamente o mesmo. Além disso, devido a esta distância elevada também se pode considerar que o segmento AB , que é encontrado pelo seguidor solar, é o mesmo para todos os espelhos, ou seja, pode-se considerar que o sol emite raios paralelos para todos os espelhos. Isto explica o motivo de ser utilizado apenas um seguidor solar e não ser necessário um para cada espelho.

É importante citar que o que se pode garantir é que o raio que incide no centro do espelho seja direcionado para o centro da caldeira. Entretanto, como o movimento do espelho é limitado a dois eixos sempre existirão momentos em que parte da luminosidade das bordas do espelho será perdida. Além disso, existe também a limitação de resolução do motor de passo que neste caso é de $1,8^\circ$.

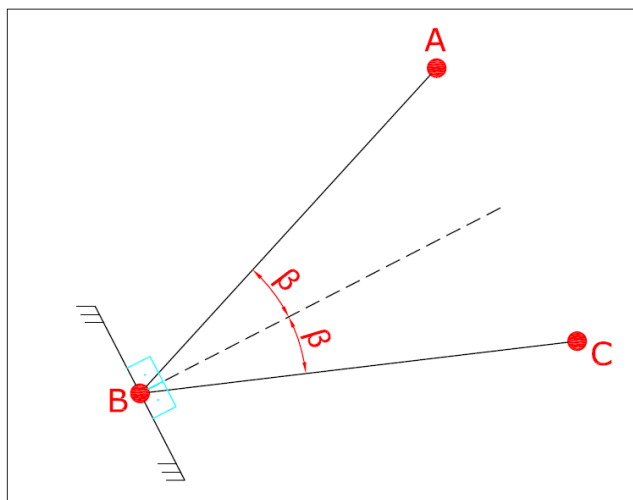


Figura 29 – Raios incidentes em um espelho plano.
Fonte: Autoria própria.

Com isso, podem-se considerar os segmentos AB e BC como vetores. Como o vetor da reta \overrightarrow{AB} é dado pelo seguidor solar e o vetor \overrightarrow{BC} é constante, é possível encontrar qual o vetor normal ao espelho e, conseqüentemente, encontrar quais os ângulos θ e ϕ para o respectivo espelho.

Outra consideração que pode ser feita sem prejuízos ao modelo matemático é que o vetor \overrightarrow{AB} possui o mesmo módulo que o vetor \overrightarrow{BC} . Isto pode ser feito também devido à distância entre o espelho e o sol ser maior que a distância entre o espelho e a caldeira, ou seja, o ponto A é o ponto que passa pela reta entre o sol e o espelho e, possui a mesma distância até o espelho que a caldeira possui.

Assim, como o triângulo formado pelos pontos ABC é um triângulo isósceles, o vetor normal ao espelho é dado pela soma vetorial dos vetores \overrightarrow{AB} e \overrightarrow{BC} , conforme mostra a Figura 30.

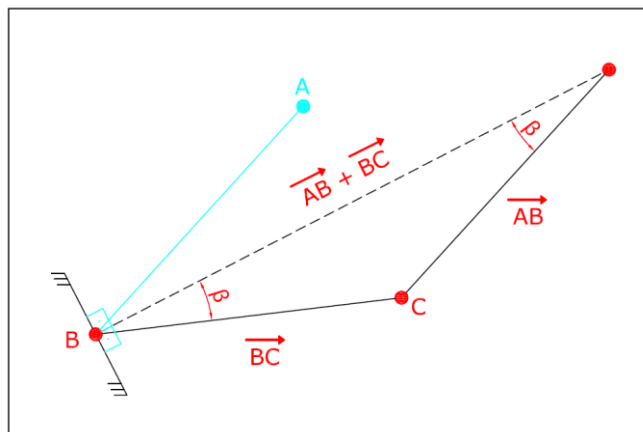


Figura 30 – Soma vetorial dos raios incidentes.
Fonte: Autoria própria.

Esta análise bidimensional ajuda a compreender o conceito, entretanto, deve-se perceber que na realidade o modelo para o caso da reflexão da luz solar é um modelo tridimensional. Por isso, os pontos A , B e C são pontos no espaço tridimensional, sendo que da mesma forma da análise bidimensional, é necessário apenas realizar a soma vetorial dos dois vetores \overrightarrow{BC} e \overrightarrow{AB} .

Assim, considerando um caso genérico para qualquer um dos espelhos, tem-se que $B = (0, 0, 0)$, ou seja, o centro do espelho é sempre considerado como o ponto de referência $(0, 0, 0)$. Com isso, $C = (C_x, C_y, C_z)$, onde os valores de C_x , C_y , C_z são constantes diferentes para cada um dos espelhos. Estas constantes podem ser obtidas das Figuras 31 e 32, que mostram as distâncias entre cada estrutura e a caldeira.

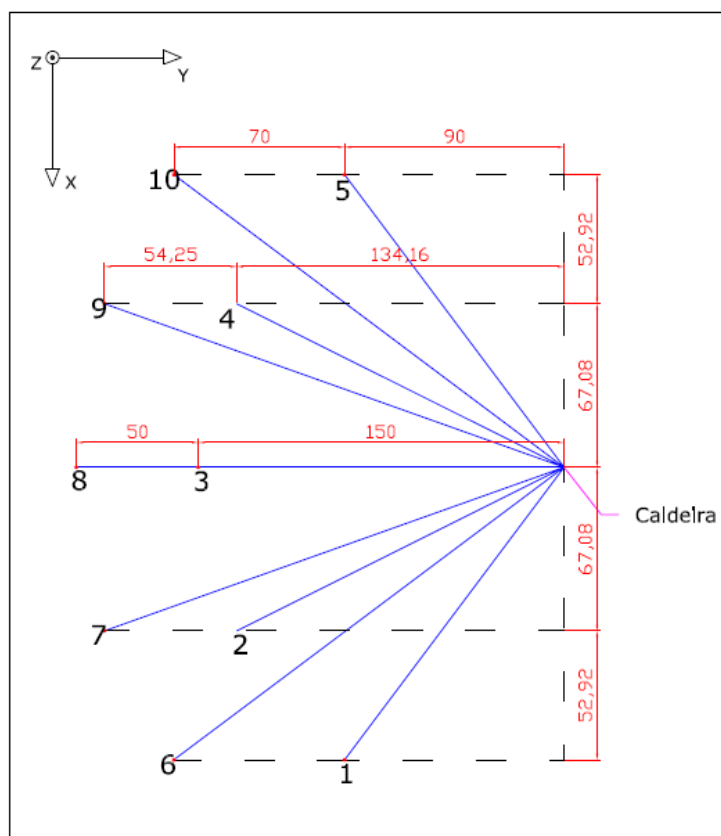


Figura 31 - Distâncias no plano XY.
Fonte: Autoria própria.

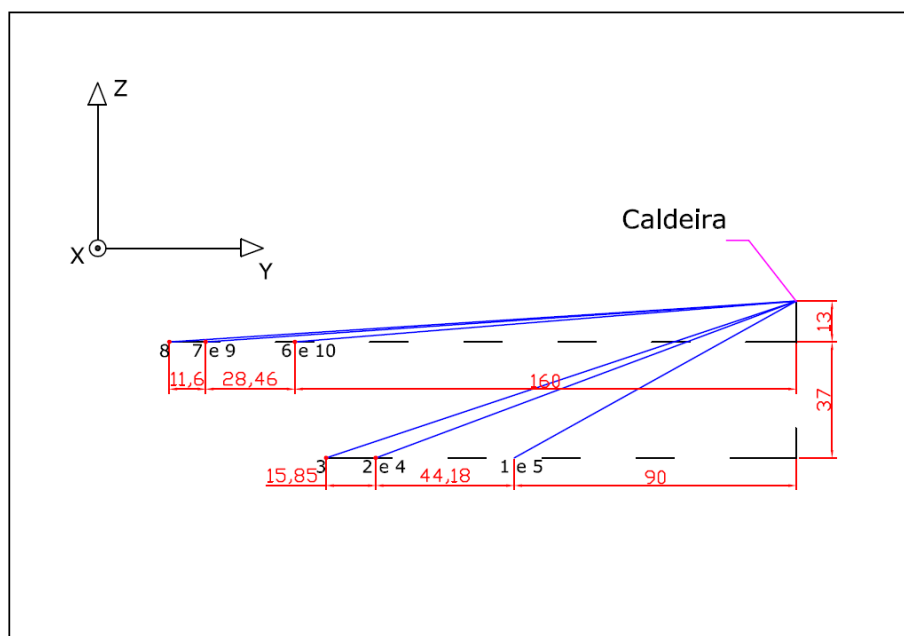


Figura 32 - Distâncias no plano YZ.
Fonte: Autoria própria.

Quanto ao ponto A , sabe-se que o módulo do vetor que parte do ponto $(0, 0, 0)$ até o ponto A é o mesmo módulo de C . Assim, considerando que o ponto P da Figura 33 seja o ponto A , tem-se que $A = (A_x, A_y, A_z)$, onde:

$$A_x = |C| \times \cos \phi_S \times \cos \theta_S \quad (4)$$

$$A_y = |C| \times \cos \phi_S \times \text{sen } \theta_S \quad (5)$$

$$A_z = |C| \times \text{sen } \phi_S \quad (6)$$

Onde ϕ_S e θ_S representam os ângulos de inclinação e rotação do sol, respectivamente.

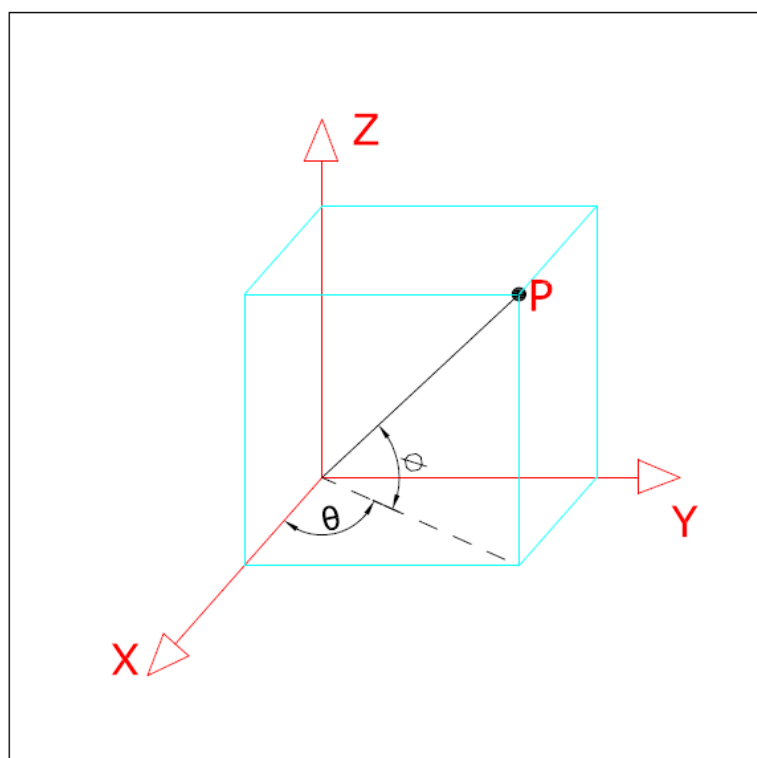


Figura 33 - Ponto genérico do espaço tridimensional.
Fonte: Autoria própria.

Assim, conhecendo os pontos A , B e C , tem-se:

$$\overrightarrow{AB} = A_x \vec{i} + A_y \vec{j} + A_z \vec{k} \quad (7)$$

$$\overrightarrow{CB} = C_x \vec{i} + C_y \vec{j} + C_z \vec{k} \quad (8)$$

Com isto, a reta normal ao espelho \vec{N} , é dada por:

$$\vec{N} = (A_x + C_x)\vec{i} + (A_y + C_y)\vec{j} + (A_z + C_z)\vec{k} \quad (9)$$

Considerando o vetor normal ao espelho como na Figura 33, é possível saber quais os ângulos de rotação e inclinação que o espelho deve ter, sendo representados por θ_E e ϕ_E e, dados por:

$$\theta_E = \text{atan} \frac{|C| \times \cos \phi_S \times \text{sen} \theta_S + C_y}{|C| \times \cos \phi_S \times \cos \theta_S + C_x} \quad (10)$$

$$\phi_E = \text{atan} \frac{|C| \times \text{sen} \phi_S + C_z}{\sqrt{(|C| \times \cos \phi_S \times \cos \theta_S + C_x)^2 + (|C| \times \cos \phi_S \times \text{sen} \theta_S + C_y)^2}} \quad (11)$$

5.3 COMUNICAÇÃO RS485

Conforme já descrito, a comunicação entre o módulo principal e o módulo controlador ocorre através da rede RS485.

No presente projeto definiu-se que o módulo principal atua como mestre da rede e, o módulo controlador, como escravo. Além disso, convencionou-se que a comunicação ocorre apenas do MP para o MC, ou seja, o módulo controlador não retorna nenhuma resposta ao módulo principal.

Existe apenas uma mensagem transmitida através da RS485, sendo que o frame é definido conforme a Figura 34, sendo composto por oito bytes.

Início	Origem	Destino	Tipo	Dados			Fim
1	2	3	4	5	6	7	8

Figura 34 – Frame RS485.

Fonte: Autoria própria.

O byte de início é constante e igual à 0xFE. O byte de fim de mensagem também é constante e é representado pelo caractere nulo '\n'.

Nesta mensagem a origem é sempre o Mestre, sendo o ID do mestre igual à 0x00. O byte de destino representa sempre um dos escravos, sendo os endereços de 0x01 até 0x0A.

O byte de “tipo” representa qual mensagem está sendo enviada. Como neste caso existe apenas um tipo de mensagem, que é o envio de coordenadas de posição para os motores, este byte será sempre o mesmo e igual a 0x00. Este byte seria útil caso novos tipos de mensagens precisassem ser adicionadas ao protocolo.

Já o campo de dados, segue a ordem:

- 5º byte do frame: Número de passos que o motor 1 do espelho (rotação) deve ter com relação à referência;
- 6º byte do frame: Número de passos que o motor 2 do espelho (inclinação) deve ter com relação à referência;
- 7º byte do frame: Número da correção a ser aplicada ao movimento.

O 7º byte do frame serve para aplicar um ajuste fino ao movimento do espelho. Basicamente, cada módulo controlador possui uma tabela própria que é gravada em sua memória e que é obtida através de testes manuais. Esta tabela possui quais são os ajustes que precisam ser realizados ao longo do tempo para que a menor intensidade luminosa seja desperdiçada, devido às aproximações nos cálculos e, limitações mecânicas do sistema. Por exemplo, no horário das 13:00h pode ser necessário que para o espelho de número 3 seja dado mais um passo de rotação, e as 14:00h um passo a menos no movimento de inclinação.

O número da correção é enviado ao MC, pois o mesmo não possui a informação da hora do dia. Além disso, desta forma o sistema se torna mais flexível, pois é possível decidir entre aplicar ou não o ajuste fino.

Para utilizar o ajuste fino é preciso que ao ligar o sistema, através dos switches presentes no MP, o sistema seja configurado para esta função. Caso esta configuração não seja realizada o sistema irá operar normalmente, porém, sem a utilização das tabelas de ajuste.

5.4 SISTEMA DE ARQUIVOS - SD CARD

É utilizado para salvar os dados em um cartão de memória do tipo SDHC. Para que seja possível passar os dados salvos para o computador foi embarcado no microcontrolador um sistema de arquivos do tipo FAT32.

O sistema de arquivos foi portado de um código aberto genérico para sistemas embarcados (PETIT FATFS, 2010).

Na camada de aplicação o sistema de arquivos fornece funções de uso corrente em C como fopen, fclose, fwrite, fread e outras. Este sistema de arquivos pode ser, portanto, utilizado para qualquer mídia, seja cartão SD, memória flash, pendrive ou outros.

Estão disponíveis através da mesma fonte duas opções para o sistema de arquivos, sendo que uma é a comum e outra é dedicada a microcontroladores com memória reduzida. No presente projeto, devido à utilização do PIC18F4550, que possui 2 KB de memória RAM e 32 KB de memória flash, foi utilizado o sistema de arquivos reduzido, chamado de "Petit FATFS".

Este sistema possui algumas limitações. Entre estas limitações as mais relevantes para o projeto são:

- Nenhum arquivo pode ser criado na mídia, ou seja, é possível apenas abrir um arquivo já existente;
- O arquivo pode ser editado, porém, seu tamanho não pode ser expandido;

Ao contrário do sistema de arquivos, a camada física é específica para o hardware utilizado. No caso da interface entre o cartão SD e o microcontrolador PIC18F4550 a comunicação é feita via SPI. As funções implementadas para esta interface tomam como base a especificação simplificada da camada física (SD GROUP, 2013) fornecida pela associação SD Card que é composta por diversas empresas. A associação serve como forma de padronização de comunicação entre os diversos fabricantes.

A especificação que é disponibilizada livremente não é completa, porém atende as necessidades do projeto, fornecendo o protocolo de comunicação para os diferentes tipos de cartão de memória, como estrutura de mensagens a serem enviadas entre o cartão SD e o dispositivo de interface, além de informações como o padrão interno de salvamento de dados.

O código desenvolvido não utiliza o sistema de arquivos de forma complexa, até mesmo devido às limitações já descritas.

Por fim, o procedimento para o salvamento dos dados nos testes de temperatura é o seguinte:

1. Um arquivo modelo com tamanho suficiente para salvar os dados de temperatura de um dia inteiro é salvo no cartão. Os dados contidos no arquivo não importam, pois serão sobrescritos e, servem apenas para deixar o arquivo com o tamanho desejado;
2. O microcontrolador sobrescreve este arquivo modelo com os dados de temperatura, salvando primeiro a hora, minuto e segundo. Então a temperatura do termopar e a temperatura interna à caixa das PCIs, sendo tudo no formato ASCII;
3. Os dados, já salvos no formato de planilha e devidamente formatados pelo microcontrolador em ASCII, são passados para o computador;
4. Os gráficos de temperatura x tempo são gerados no computador.

5.5 SENSORIAMENTO TERMOPAR

Para o sensoriamento do termopar foi primeiramente realizado um teste considerando a curva de temperatura fornecida pelo fabricante, entretanto, os resultados não foram satisfatórios, gerando erros elevados de até 15°C, com temperatura entre 20°C e 97°C.

Então, utilizando um termômetro convencional, foi gerada uma curva da tensão fornecida pelo termopar com relação à temperatura medida pelo termômetro. Esta curva empírica eliminou os erros elevados obtidos anteriormente, sendo que os erros agora, com relação ao mesmo termômetro de referência, não ultrapassaram ± 2 °C.

O Gráfico 1 mostrado abaixo mostra as duas curvas de tensão x temperatura para temperaturas entre 0°C e 99°C. Uma foi fornecida pelo fabricante do termopar e a outra foi obtida através de ensaios utilizando um termômetro convencional.

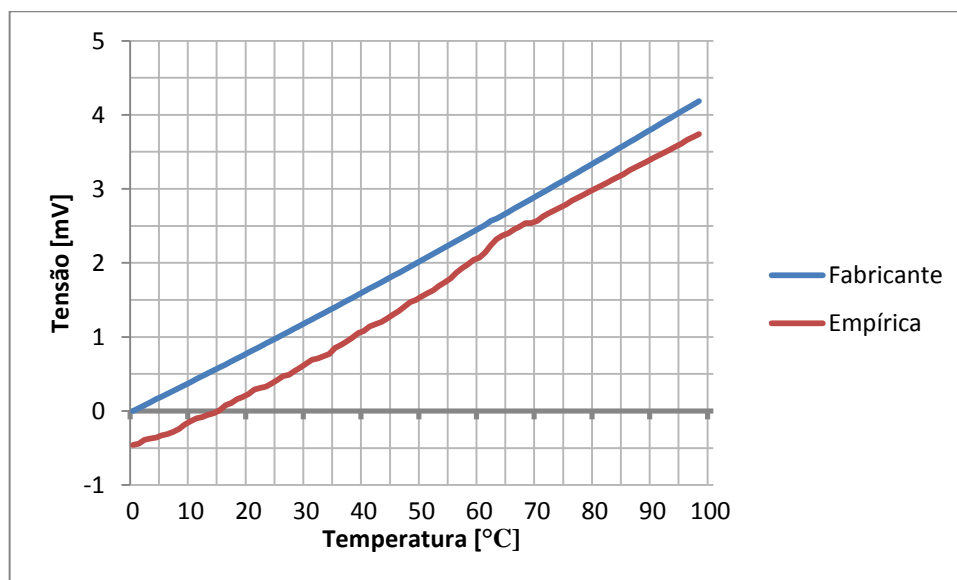


Gráfico 1 – Curva de conversão tensão x temperatura.
Fonte: Autoria própria.

6 RESULTADOS

Durante o período do dia 24 de dezembro de 2013 até 31 de janeiro de 2014, foram coletados dados do sistema concentrador solar de pequeno porte. O número de coletas não corresponde o número de dias deste período, pois houve dias que não foram coletados dados devido às instabilidades climáticas.

Na maioria dos dias de coletas de dados o sistema foi ligado por volta das 8:00 h e desligado por volta das 17:00 h, houve dias em que o sistema foi desligado em outros horários dependendo das condições do tempo.

Sempre antes de ligar o sistema, o cartão de memória é inserido no módulo principal, então, após isso, o sistema é ligado e sua hora é ajustada. Enquanto a hora é ajustada os módulos controladores colocam a estrutura mecânica em sua posição inicial. Após o término do ajuste o seguidor solar começa o rastreamento do sol. Quando a posição solar é encontrada o MP envia aos MCs quais as posições que cada espelho deverá assumir. Após isso, a posição solar é rastreada periodicamente.

6.1 VARIANDO O VOLUME DE 1 LITRO ATÉ 10 LITROS

Foram realizados testes variando o volume de água na caldeira de 1 litro até 10 litros. Os gráficos com as descrições climáticas para cada teste são descritos logo abaixo.

O Gráfico 2 mostra os dados que foram coletados no dia 31/01/2014, das 8:00h até 17:00h. A temperatura máxima medida foi de 115°C e este valor foi obtido por volta das 11:20h. O volume utilizado neste dia foi de 1 litro e as descrições climáticas do tempo foram as seguintes:

- Das 8:00h até as 12:00h sol sem nuvens;
- Das 12:00h até as 13:00h sol com muitas nuvens;
- Das 13:00h até as 14:30h sol com entre nuvens;
- Das 14:30h até as 16:00h sol com muitas nuvens;
- Das 16:00h até as 17:00h nublado;

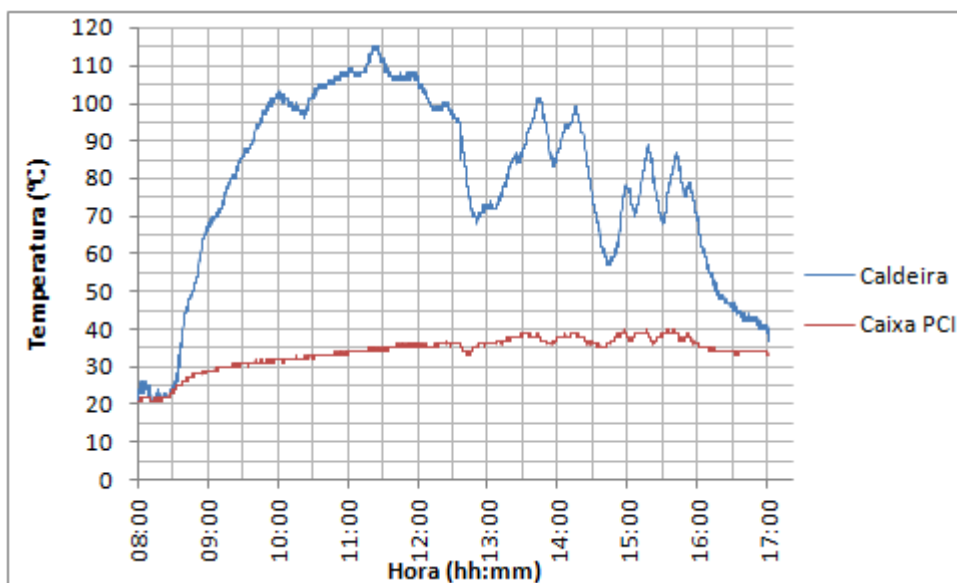


Gráfico 2 – Volume: 1L. Coleta: 31/01/2014.
Fonte: Autoria própria

O Gráfico 3 mostra os dados que foram coletados no dia 10/01/2014, das 8:00h até 18:00h. A temperatura máxima medida foi de 107°C e este valor foi obtido por volta das 13:00h. O volume utilizado foi de 2 litros e as descrições climáticas do tempo foram as seguintes:

- Das 8:00h até as 13:30h sol sem nuvens;
- Das 13:30h até as 15:30h sol entre nuvens;
- Das 15:30h até as 16:30h sol com muitas nuvens;
- Das 16:30h até as 17:30h sol com poucas nuvens;
- Das 17:30h até as 18:00h sol com muitas nuvens.

No Gráfico 4 os dados foram coletados no dia 17/01/2014, das 8:00h até 17:00h. A temperatura máxima medida foi de 112°C e este valor foi obtido por volta das 16:00h. O volume utilizado foi de 3 litros e as descrições climáticas do tempo foram as seguintes:

- Das 8:00h até as 10:30h sol sem nuvens;
- Das 10:30h até as 13:00h sol com muitas nuvens;
- Das 13:00h até as 15:00h sol com poucas nuvens;
- Das 15:00h até as 16:15h sol sem nuvens;
- Das 16:15h até 17:00h céu nublado.

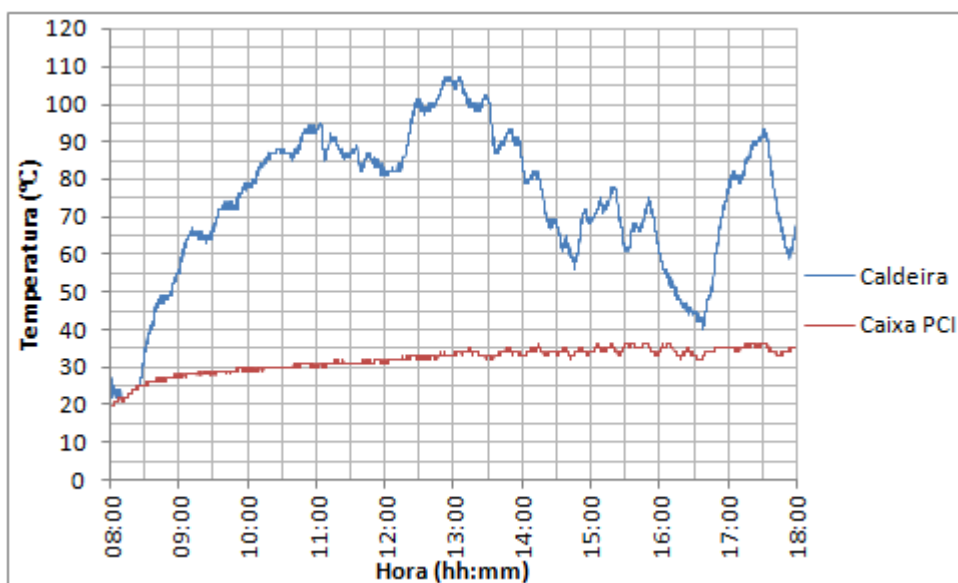


Gráfico 3 – Volume: 2L. Coleta: 10/01/2014.
Fonte: Autoria própria.

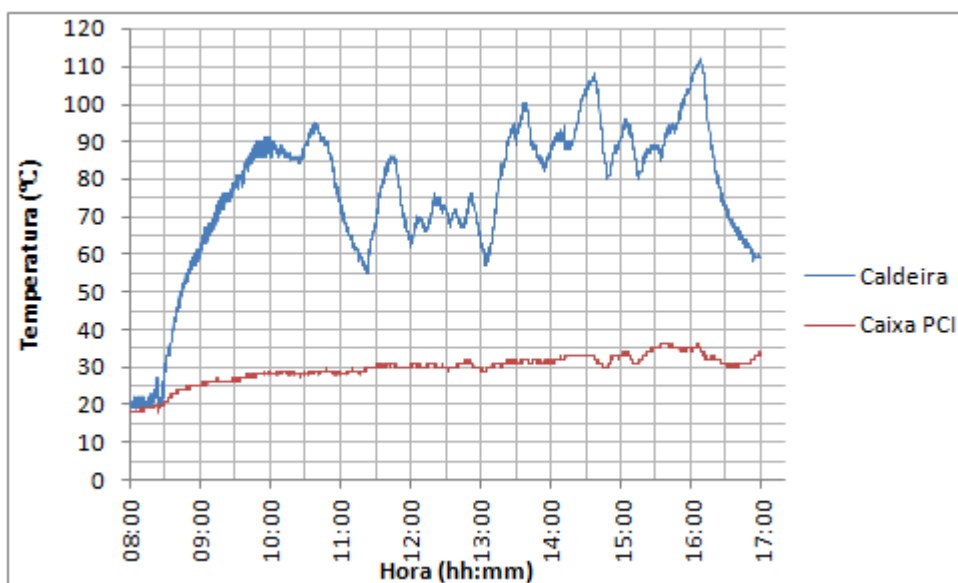


Gráfico 4 – Volume: 3L. Coleta: 17/01/2014.
Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 5 mostra os dados que foram coletados no dia 18/01/2014, das 8:20h até 17:00h. A temperatura máxima medida foi de 100°C e este valor foi obtido por volta das 16:00h. O volume utilizado foi de 4 litros e as descrições climáticas do tempo foram as seguintes:

- Das 8:00h até as 10:00h sol sem nuvens;
- Das 10:00h até as 15:00h sol com muitas nuvens;

- Das 15:00h até as 16:30h sol com poucas nuvens;
- Das 16:30h até as 17:00h nublado.

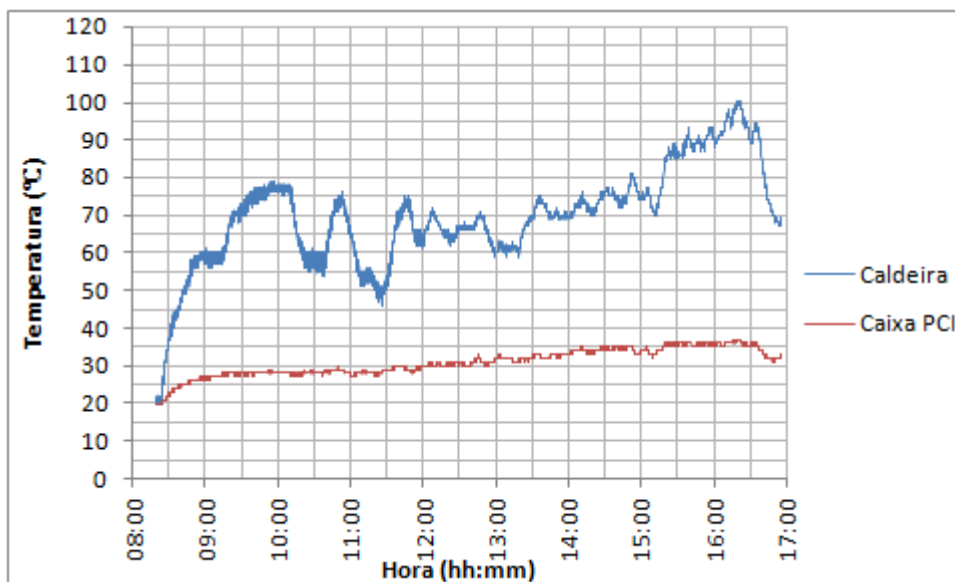


Gráfico 5 – Volume: 4L. Coleta: 18/01/2014.
Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 6 mostra os dados que foram coletados no dia 19/01/2014, das 8:00h até 18:00h. A temperatura máxima medida foi de 112°C e este valor foi obtido por volta das 15:30h. O volume utilizado foi de 5 litros e as descrições climáticas do tempo foram as seguintes:

- Das 8:00h até as 18:00h ensolarado;
- No período da tarde algumas nuvens que encobriram o sol por pouco tempo.

O Gráfico 7 mostra os dados que foram coletados em 20/01/2014, das 8:00h até 18:00h. A temperatura máxima medida foi de 105°C e este valor foi obtido por volta das 16:30h. O volume utilizado foi de 6 litros e as descrições climáticas do tempo foram as seguintes:

- Das 8:00h até as 15:00h sol com poucas nuvens;
- Das 15:00h até as 15:30h sol com muitas nuvens;
- Das 15:30h até as 18:00h sol com poucas nuvens.

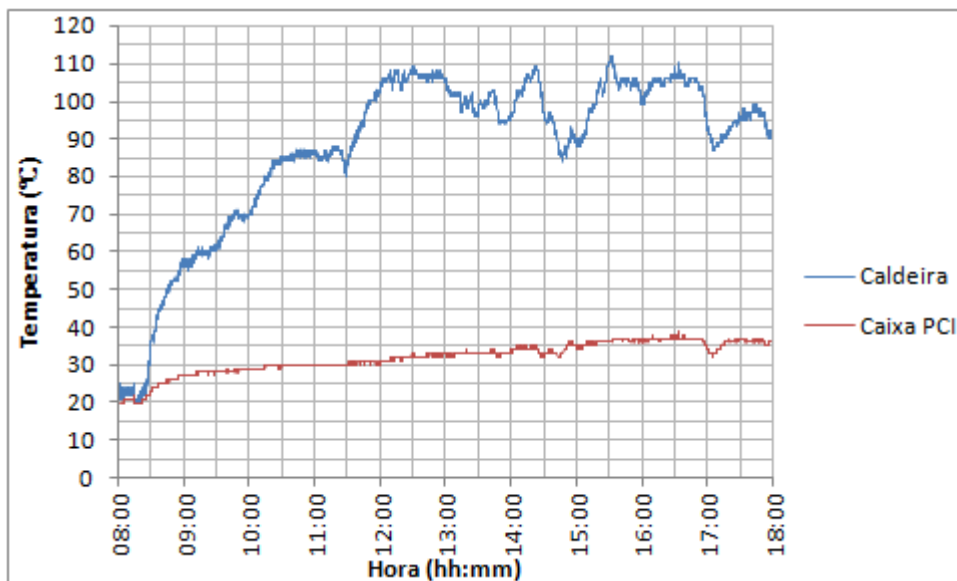


Gráfico 6 – Volume: 5L. Coleta: 19/01/2014.
Fonte: Autoria própria.

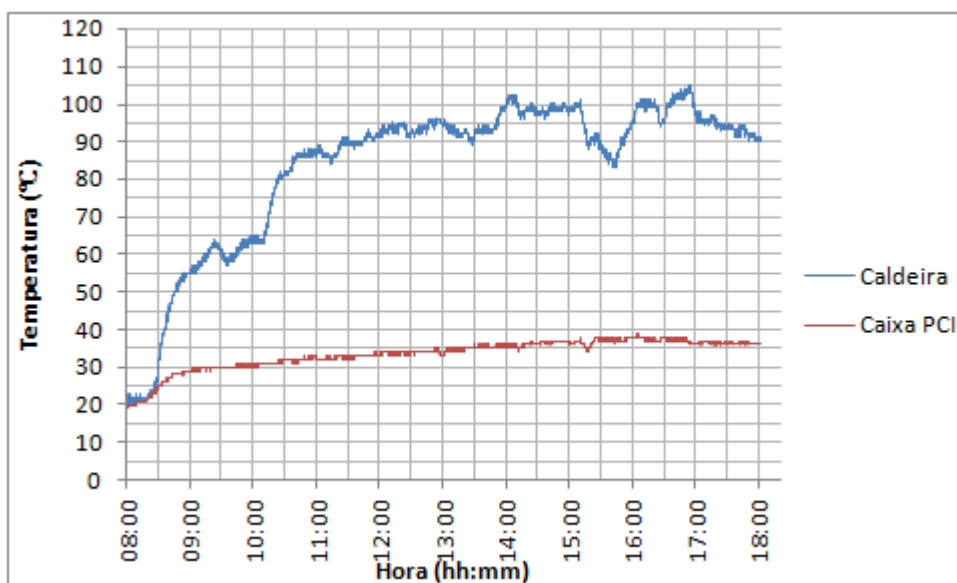


Gráfico 7 – Volume: 6L. Coleta: 20/01/2014.
Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 8 mostra os dados que foram coletados em 21/01/2014, das 8:00h até 19:00h. A temperatura máxima medida foi de 103°C e este valor foi obtido por volta das 16:30h. O volume utilizado neste dia foi de 7 litros e as descrições climáticas do tempo foram as seguintes:

- Das 8:00h até as 14:00h sol com poucas nuvens;
- Das 14:00h até as 16:00h sol entre nuvens;
- Das 16:00h até as 17:30h sol com muitas nuvens;

- Das 17:30h até as 19:00h sol com poucas nuvens.

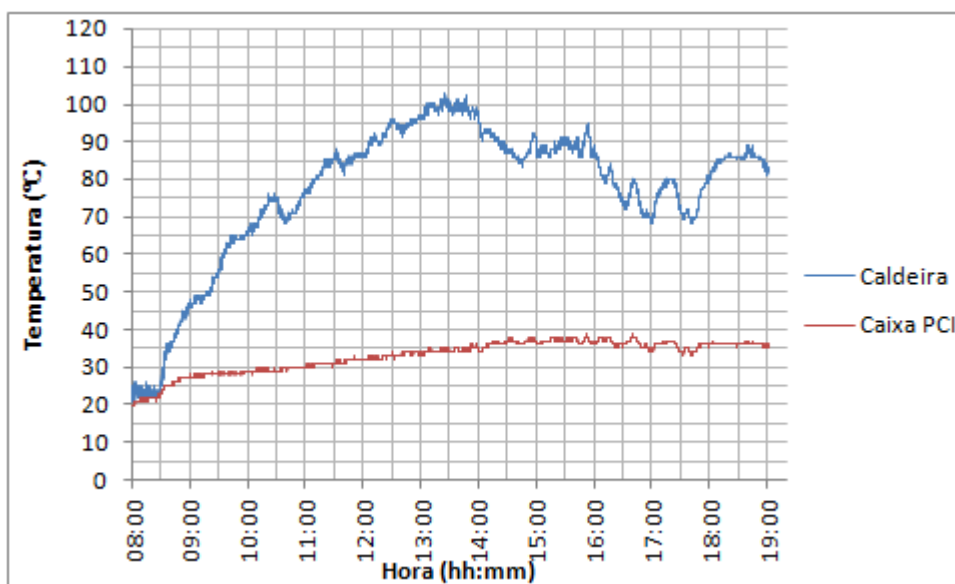


Gráfico 8 – Volume: 7L. Coleta: 21/01/2014.
Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 9 mostra os dados que foram coletados em 22/01/2014, das 8:00h até 17:00h. A temperatura máxima medida foi de 98°C e este valor foi obtido por volta das 12:30h. O volume utilizado neste dia foi de 8 litros e as descrições climáticas do tempo foram as seguintes:

- Das 8:00h até as 12:30h sol com poucas nuvens;
- Das 12:30h até as 16:30h sol com muitas nuvens;
- Das 16:30h até as 17:00h nublado.

O Gráfico 10 mostra os dados que foram coletados em 27/01/2014, das 8:00h até 18:00h. A temperatura máxima medida foi de 96°C e este valor foi obtido por volta das 13:20h. O volume utilizado foi de 9 litros e as descrições climáticas do tempo foram as seguintes:

- Das 8:00h até as 13:30h sol com poucas nuvens;
- Das 13:30h até as 18:00h sol entre nuvens.

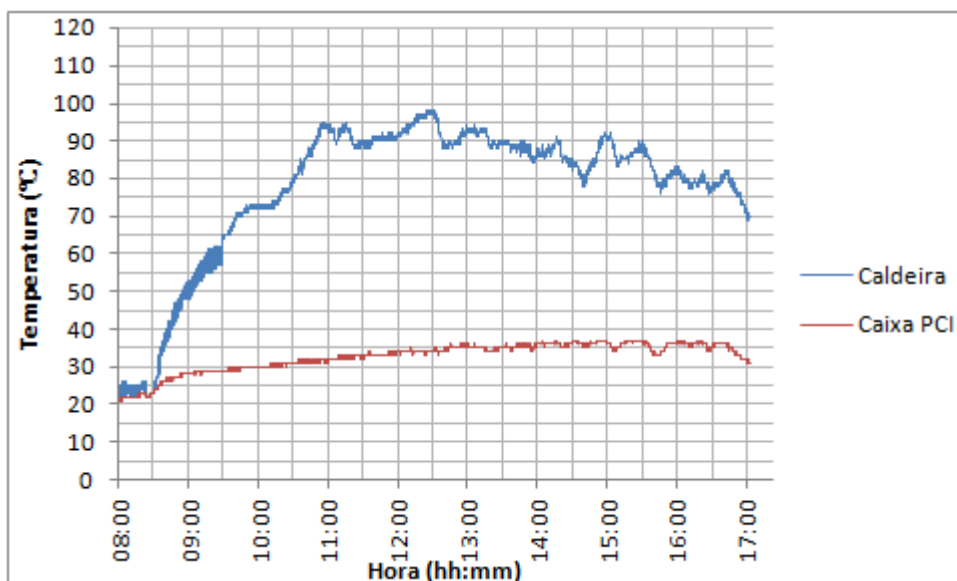


Gráfico 9 – Volume: 8L. Coleta: 22/01/2014.
Fonte: Autoria própria.

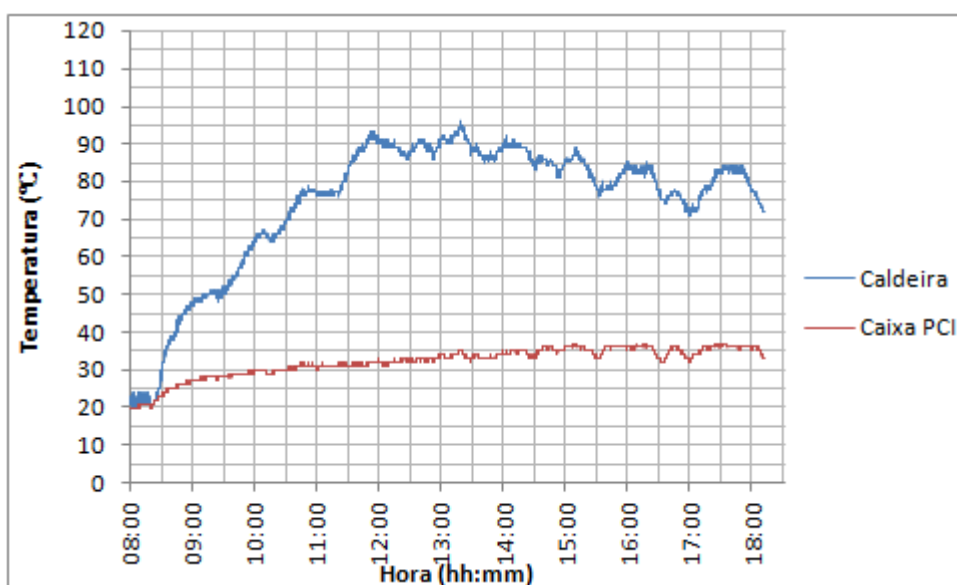


Gráfico 10 – Volume: 9L. Coleta: 27/01/2014.
Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 11 mostra os dados que foram coletados em 28/01/2014, das 8:00h até 17:00h. A temperatura máxima medida foi de 96°C e este valor foi obtido por volta das 14:20h. O volume utilizado foi de 10 litros e as descrições climáticas do tempo foram as seguintes:

- Das 8:00h até as 14:30h sol sem nuvens;
- Das 14:30h até 17:00 sol entre nuvens.

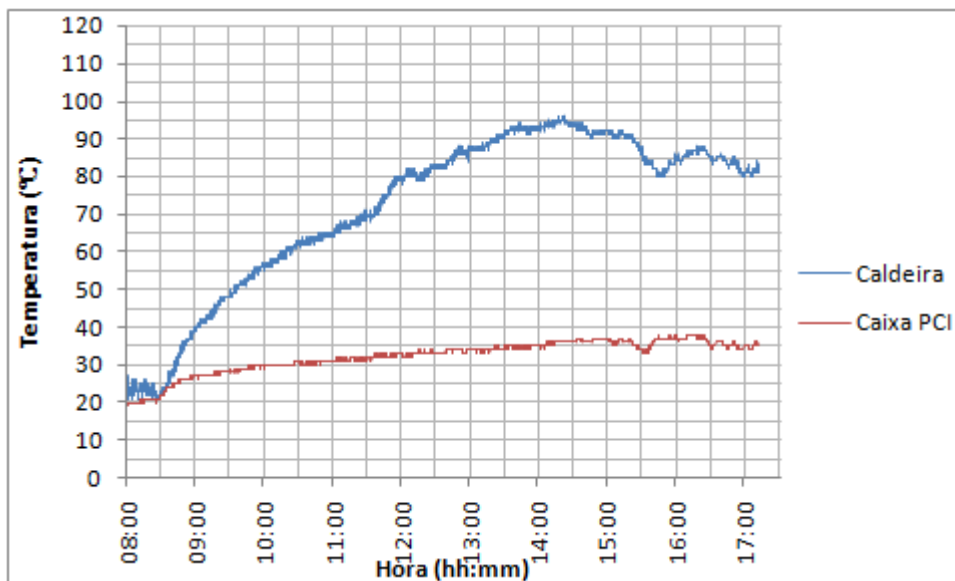


Gráfico 11 – Volume: 10L. Coleta: 28/01/2014.
Fonte: Autoria própria.

As variações de temperatura mostradas nos gráficos acima indicam a proporcionalidade com as condições do tempo, tais como temperatura ambiente, vento e principalmente nuvens. Além disso, as mudanças bruscas visíveis nos gráficos são geralmente devido às nuvens que encobriram o sol em tempos aleatórios e, logo que o sol era novamente descoberto a temperatura aumentava.

Nos gráficos acima o aquecimento inicia-se somente a partir das 8:20h. Isso ocorre, pois, durante os testes a incidência solar nos espelhos começa a acontecer somente a partir das 08:20h.

Para os mesmos volumes, outros ensaios foram realizados, entretanto, alguns não foram apresentados no texto, pois, devido às condições climáticas do dia em questão não representam dados relevantes, sendo que os Gráficos 2 – 11 mostram os testes que obtiveram os maiores registros de temperaturas para cada unidade de volume.

Realizando uma análise das curvas, pode-se verificar que para volumes menores a temperatura interna na caldeira obtida é maior. Isto ocorre devido à quantidade de potência necessária para o aquecimento. No Gráfico 2, por exemplo, com 1 litro, foi atingida uma temperatura de 115°C, enquanto que para o Gráfico 11, com 10 litros, foi obtido no máximo 96°C. Obviamente as condições climáticas também influenciaram, entretanto, para o período das 08:00h até 12:00h, que é o

período em que ocorreu a temperatura máxima de 115°C as condições ambientais são bastante parecidas, permitindo a comparação.

Outro fator relevante é a temperatura ambiente, que possui proporcionalidade com a temperatura interna da caldeira. Ou seja, para dias frios as temperaturas obtidas com certeza serão inferiores aos dias mais quentes.

Além disso, a intermitência de nuvens encobrendo os raios solares é a principal causa das variações nas curvas. Isso mostra que para outras épocas do ano, ou mesmo para outras localidades com pouca incidência de nuvens, o sistema se tornaria mais constante, mantendo as temperaturas com menores variações ao longo do dia.

6.2 CÁLCULO DE POTÊNCIA

Para calcular a potência exata fornecida pelos espelhos à caldeira, além da temperatura interna medida, diversas outras componentes precisariam ser incluídas no modelo matemático, como o nível de umidade, vento, temperatura ambiente, pressão interna na caldeira e outras. Como esta é uma análise muito complexa e o sistema não fornece todas as informações necessárias, como, pressão interna, umidade do ar, velocidade do vento e outras, optou-se por realizar uma estimativa para o cálculo da potência fornecida para a água, utilizando as seguintes considerações para temperaturas inferiores a 100°C:

- Pressão constante;
- Volume constante;

Como as estimativas foram feitas para temperaturas inferiores a 100°C estas considerações não geram erros significativos.

A equação utilizada para encontrar quantidade de calor é a seguinte:

$$Q = 4,186 \times m \times c \times \Delta T \quad (12)$$

Onde m é a massa em gramas e é obtida a partir do volume de água utilizado no teste, c é o calor específico que, no caso da água é $1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, ΔT é a variação de

temperatura, a constante 4,186 é o fator de conversão de caloria para Joule e Q é a quantidade de calor em Joules.

Para encontrar a potência tem-se:

$$P = Q/\Delta t \quad (13)$$

Onde P é a potência em Watts, que é dada pela quantidade de calor em Joules, dividido pela variação de tempo em segundos do intervalo em questão.

Com isso, é possível analisar para alguns gráficos qual é a potência estimada entregue para a água. É importante notar que se trata de uma estimativa de cálculo, além disso, como parte considerável da potência é perdida para o ambiente pelo contato da caldeira com o ar, pode-se também considerar que esta potência calculada é a potência mínima fornecida pelo sistema, já que para encontrar a potência total ainda precisam ser adicionadas as componentes de perda.

Por exemplo, considerando a curva mostrada no Gráfico 12 e o intervalo entre 16:00h e 16:15h, tem-se que a potência média fornecida para a água é de aproximadamente $P = 1200 W$. Após este intervalo de tempo a curva possui algumas intermitências devido às condições climáticas e este cálculo não pode ser replicado, entretanto, pode-se deduzir que para manter a temperatura no mesmo nível, a potência média certamente não é muito inferior ao obtido no cálculo, pois, neste caso, a temperatura não seria mantida a níveis elevados. Naturalmente, com o decorrer do dia a intensidade luminosa diminui, o que leva à diminuição na temperatura.

O Gráfico 12 mostra os dados que foram coletados em 06/01/2014, das 8:00h até 18:00h. A temperatura máxima medida foi de 87°C e este valor foi obtido por volta das 13:20h. O volume utilizado foi de 10 litros e as descrições climáticas do tempo foram as seguintes:

- Das 8:00h até as 10:30h nublado;
- Das 10:30h até 14:00h sol com poucas nuvens;
- Das 14:00h até 15:00h nublado;
- Das 15:00h até 17:30h sol entre nuvens;

- Das 17:30h até 18:00h nublado.

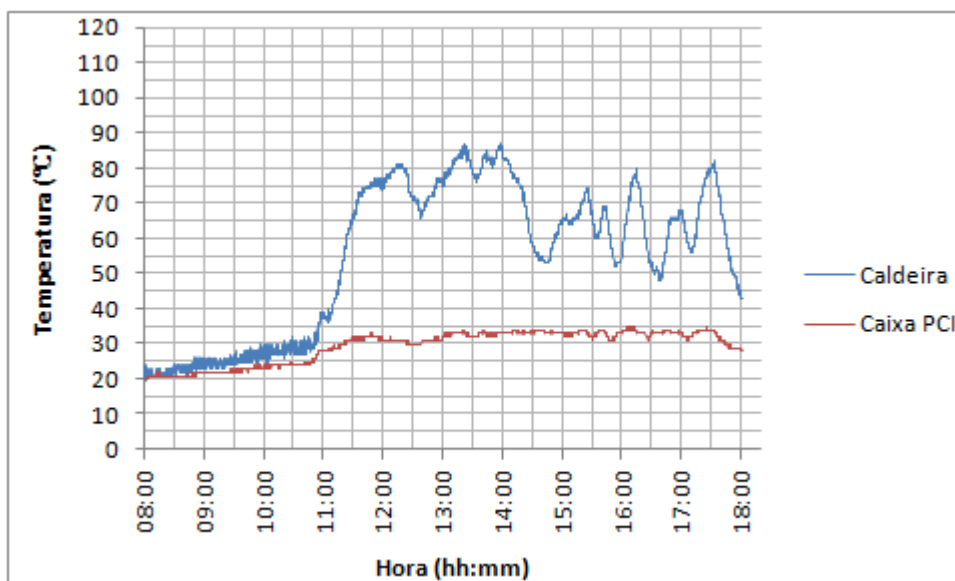


Gráfico 12 – Volume: 10L. Coleta: 06/01/2014.
Fonte: Autoria própria.

A Tabela 2 mostra os resultados para outros casos analisados.

Tabela 2 – Análise da potência em diversos intervalos de tempo.

	Intervalo	ΔT [°C]	Volume [L]	Potência [W]
Gráfico 4	11:23h – 11:38h	24	3	344
Gráfico 6	08:27h – 08:39h	18	5	465
Gráfico 10	08:27h – 08:43h	17	9	667
Gráfico 12	11:05h – 11:40h	36	10	717
Gráfico 12	16:00h – 16:15h	26	10	1200

Fonte: Autoria própria.

Uma característica verificada é que para maiores volumes de água, a potência transmitida é maior. Isso ocorre, pois quanto maior o volume, maior será a área de contato com a superfície da caldeira e, devido ao processo de condução de calor do metal para a água, mais potência é absorvida pela água na forma de calor. Já para volumes menores, a área de contato é menor e, conseqüentemente, a taxa de transferência de potência para a água é inferior.

Mesmo assim, para volumes inferiores de água as temperaturas atingidas são maiores, pois, apesar do fato da taxa de potência ser inferior, com uma menor taxa

de transferência de potência é possível atingir valores mais elevados de temperatura, pois, a potência está diretamente relacionada com a massa de água contida na caldeira.

A média solar anual típica para a região de Toledo para o mês de Janeiro é de $20 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{dia}$ (TIBA, 2000). Isso indica uma energia média em torno de $620 \text{ Wh}/\text{m}^2$, considerando nove horas de incidência solar, o que concorda com os valores obtidos nos cálculos para o sistema concentrador solar de pequeno porte. Percebe-se pela Tabela 2 que houve três casos nos quais este valor foi ultrapassado. Isto ocorre, pois, o valor de $620 \text{ Wh}/\text{m}^2$ é uma média, logo, existirão ao longo do dia horários de pico de potência.

6.3 OUTRAS ANÁLISES

Outros gráficos que ajudam na verificação da dependência com as condições climáticas são os gráficos mostrados abaixo.

No Gráfico 13, por exemplo, os dados foram coletados no dia 30/12/2013, das 8:15h até 14:50h. A temperatura máxima medida foi de 64°C e este valor foi obtido por volta das 14:15h. O volume utilizado foi de 10 litros e as descrições climáticas do tempo foram as seguintes:

- Das 8:15h até as 9:30h nublado;
- Das 9:30h até as 14:15h sol com muitas nuvens;
- Das 14:15h até as 14:50h nublado com chuva.
- Após isto o sistema foi desligado devido à chuva forte.

Este gráfico é bastante útil para verificar a elevada dependência da temperatura na caldeira com as condições climáticas. Ao contrário de todos os outros casos descritos, devido ao dia nublado as temperaturas se mantiveram em níveis inferiores.

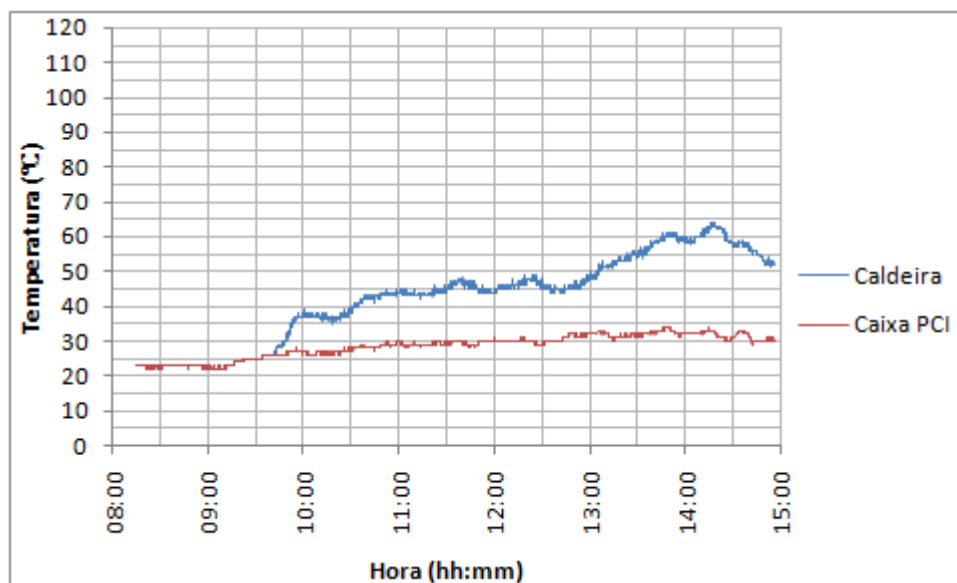


Gráfico 13 – Volume: 10L. Coleta: 30/12/2014.
Fonte: Autoria própria.

No Gráfico 14 os dados foram coletados no dia 15/01/2014, das 8:30h até 10:50h. A temperatura máxima medida foi de 90°C e este valor foi obtido por volta das 10:40h. O volume utilizado foi de 2 litros e as descrições climáticas do tempo foram as seguintes:

- Das 8:30h até as 8:40h sol com poucas nuvens;
- Das 8:40h até as 9:00h chuva rápida;
- Das 9:00h até as 9:10h sol com poucas nuvens;
- Das 9:10h até as 9:30h chuva rápida;
- Das 9:30h até as 10:50h sol com poucas nuvens;
- Depois das 10:50h chuva forte.

Neste gráfico nota-se a influência das chuvas sobre o sistema. Nos dois momentos em que houve chuva fraca foi possível continuar o teste e os dois picos iniciais mostram claramente estes momentos de início e fim da chuva. Percebe-se que a chuva gera um resfriamento rápido do sistema.

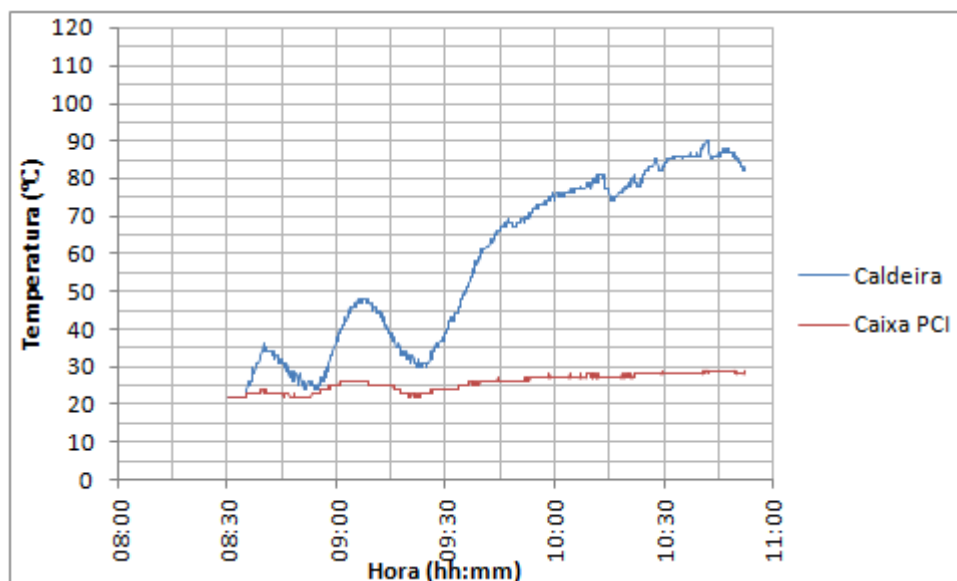


Gráfico 14 – Volume: 2L. Coleta: 15/01/2014.
Fonte: Autoria própria.

Outra característica interessante é o formato da curva obtida para os diferentes volumes de água. Os dados do Gráfico 6, por exemplo, mostram o resultado para um volume de 5 litros e o Gráfico 11 para o volume de 10 litros. Ambos são reproduzidos novamente nos Gráficos 15 e 16, respectivamente, adicionando as curvas de tendência estimadas para cada gráfico.

Percebe-se que para o volume menor, a curva possui uma subida aproximadamente linear e, então, a temperatura tende a se manter constante. Isto mostra que a potência aplicada após a estabilização da temperatura é suficiente para manter a água em temperatura quase constante.

Já para a curva do volume maior, a tendência é uma parábola com a concavidade para baixo. Isto mostra que devido ao elevado volume de água, a potência solar não é suficiente para manter a temperatura no mesmo nível, sendo que, após atingir um valor máximo o processo de resfriamento da água é iniciado.

Os Gráficos 15 e 16 podem ser comparados, pois as características climáticas dos dois dias foram semelhantes.

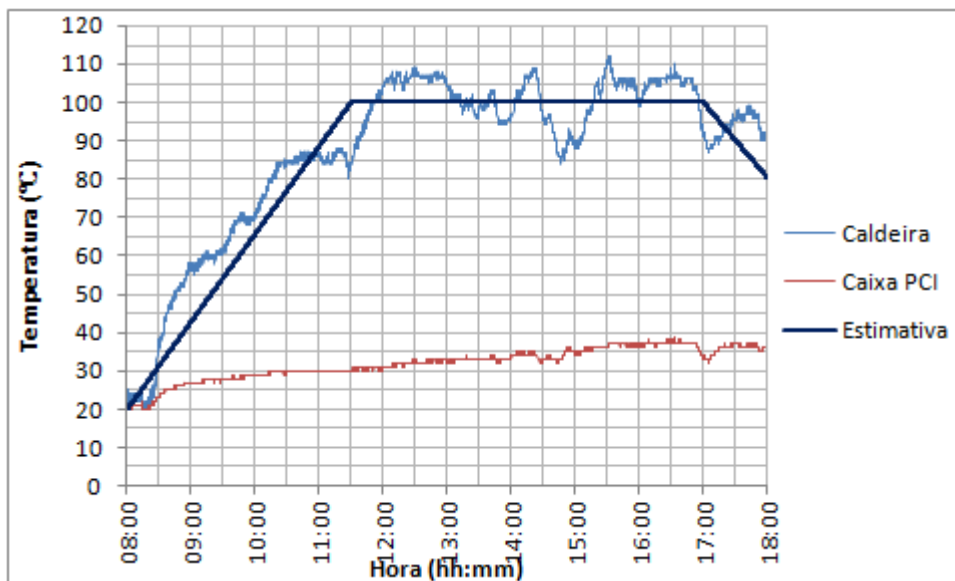


Gráfico 15 – Volume: 5L. Coleta: 19/01/2014. Curva de tendência.
Fonte: Autoria própria.

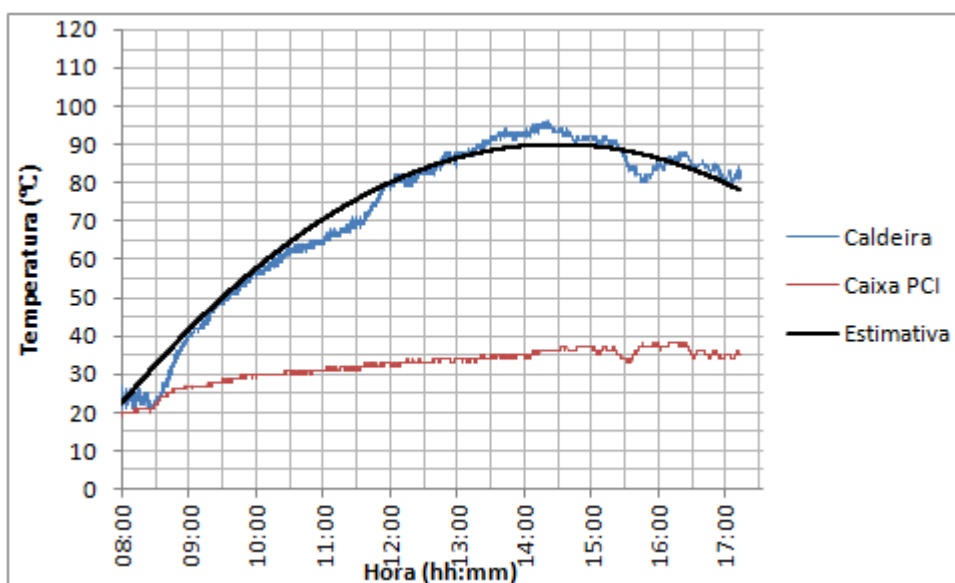


Gráfico 16 – Volume: 10L. Coleta: 28/01/2014. Curva de tendência.
Fonte: Autoria própria.

Em todos os testes houve perda de luminosidade para fora da caldeira. Isto ocorreu devido a dois fatores. O primeiro é devido à resolução dos motores de passo da estrutura que possuem passos de $1,8^\circ$, podendo gerar erros. Outro fator, que é o mais relevante, é o movimento do espelho. Como não existe movimento de rotação com relação ao centro do espelho, parte da luminosidade será perdida, pois, apesar do raio luminoso refletido a partir do centro do espelho ser direcionado ao centro da

caldeira, as arestas do espelho não estarão necessariamente alinhadas com as arestas da caldeira, o que acarreta conseqüentemente em perda de luminosidade.

Uma solução para a resolução do passo do motor seria a aplicação de um redutor ao eixo, diminuindo assim o ângulo de cada passo.

Outra solução para o problema seria a utilização de uma caldeira maior, porém, isto também geraria uma maior dissipação de potência calorífica. Assim, optou-se por utilizar a caldeira com as mesmas dimensões do espelho.

Os resultados obtidos mostram que elevadas temperaturas foram atingidas e as potências estimadas de aquecimento foram consideráveis para o porte do sistema, mostrando uma boa eficiência do sistema.

7 CONCLUSÃO

Foi desenvolvido um sistema concentrador solar de pequeno porte, sendo que todas as etapas foram incluídas, desde o projeto das placas eletrônicas, soldagem e compra dos componentes, programação dos microcontroladores, projeto das estruturas mecânicas, instalação do sistema nas dependências da universidade, desenvolvimento do sensor de rastreamento da posição solar e as demais atividades envolvidas.

Os objetivos neste projeto foram além de desenvolver o sistema, analisar o comportamento da temperatura na água da caldeira para verificar qual a eficiência energética de aquecimento.

Tais objetivos foram atingidos e os resultados obtidos mostraram coerência com as expectativas. Foram obtidas curvas com temperaturas que atingiram a faixa de 115°C, sendo que durante os testes a temperatura ambiente foi geralmente elevada, entretanto, a incidência de nuvens encobrindo o sol foi constante. Um dos poucos dias em que quase não houve a interferência de nuvens foi o dia em que a temperatura chegou a 112°C utilizando 5 L de água.

Foram realizados testes variando o volume de água de 1 L até 10 L e a temperatura de 96°C foi atingida para todos os volumes considerados. Além disso, a potência estimada nos resultados mostrou-se elevada já que houve intervalos de tempo em que a potência calculada chegou a 1200 W.

Por fim, pode-se afirmar que este sistema possui eficiência considerável para ser utilizado em outras aplicações. Uma das propostas de projetos futuros, por exemplo, é a utilização do sistema em aquecedores solares convencionais para o aquecimento de água em residências. Outra aplicação interessante é na utilização do sistema para aquecimento das serpentinas que aquecem água para piscinas. De forma geral, o sistema concentrador solar pode ser adicionado aos sistemas aquecedores solares convencionais já existentes como forma de aumentar a eficiência dos mesmos.

Quanto à utilização do sistema para geração de energia elétrica, da forma como foi implementado dificilmente poderia ser gerada energia suficiente para o uso em condições normais, entretanto, podem ser analisadas diferentes topologias para a estrutura do sistema a fim de aumentar a eficiência. Com o aumento do número de

espelhos, por exemplo, provavelmente os níveis de temperatura atingidos seriam superiores.

REFERÊNCIAS

AD627, Analog Devices. **Micropower, Single and Dual Supply Rail-to-Rail Instrumentation Amplifier**. 2001, Norwood.

BRIGHTSOURCE Energy. **Ivanpah Solar Electric Generating System**. Ivanpah, fev. 2013. Disponível em: <<http://ivanpahsolar.com/update-from-ivanpah-february-2013>>. Acesso em 5 ago. 2013.

CLIFFORD, M. J.; EASTWOOD, D. Design of a novel passive solar tracker. **Solar Energy**, v. 77, n. 3, p 269-280, set. 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2004.06.009>>. Acesso em: 03 ago. 2013.

DATASHEET AK23/4.6F6L1.8. **Motor de Passo**. Noyoama Automação.

DATASHEET L298, STMicroelectronics. **Dual Full-Bridge Driver**. Jan. 2000.

DESERTEC. **Concentrating Solar Thermal Power**. Disponível em: <<http://www.trec-uk.org.uk/>>. Acesso em 27 jan. 2014.

DUNN, Rebecca I.; HEARPS, Patrick J.; WRIGHT, Matthew N. Molten-Salt Power Towers: Newly Commercial Concentrating Solar Storage. **Proceeding of the IEEE**, v. 100, n. 2, p 504-515, 06 out. 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6035949>>. Acesso em: 03 ago. 2013.

FRANÇA, J. A.; **Termopares – Um tutorial**. Relatório de disciplina de Instrumentação Eletrônica. UFP. 1997.

FIRDAUS, Muhammad S.; et al. **SOLAR CONCENTRATORS**. International Journal of Applied Sciences (IJAS), v. 1, Issue 1, out. 2010.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física 4: Ótica e Física Moderna** - 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

LODI, Cristiane. **Perspectivas para a geração de energia elétrica no Brasil utilizando a tecnologia solar térmica concentrada**. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Microchip. MLPAB ICD 2. **In-Circuit Debugger User's Guide**. 2005

MIYADAIRA, A. N.; **Microcontroladores PIC18: aprenda e programe em linguagem C**. 1. ed. São Paulo. Érica, 2009.

NOGUEIRA, F. G.; **Desenvolvimento de um protótipo de sistema de aquisição de dados com comunicação em rede industrial MODBUS**. TCC. UFP – Belém. 2007.

OLIVEIRA, Carlos A. A. de. **Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias**. 2007. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

PETIT FATFS, **Petit FAT File System Module**. 2010. Disponível em <http://elm-chan.org/fsw/ff/00index_p.html>. Acesso em 07 jul. 2013.

POULEK, V.; LIBRA, M. New solar tracker, **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 51, n. 2, p. 113-120, 24 fev. 1998. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00276-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00276-6)>. Acesso em 03 ago. 2013.

REN21. **Renewables Global Status Report**. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), 2013. Disponível em: <http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/GSR2013_lowres.pdf>. Acesso em 28 dez. 2013.

RIBEIRO, Sandro C.; PRADO, Paulo P. de L.; GONÇALVES, João B. Projeto e desenvolvimento de um Rastreador Solar para Painéis Fotovoltaicos. **IX Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**. Resende, 2012. Disponível em: <<http://www.aedb.br/seget/artigos12/57116695.pdf>>. Acesso em 03 ago. 2013.

SD GROUP. **SD Specifications. Part 1. Physical Layer. Simplified Specification**. Jan. 2013.

SOLTERO, Manny et al. **RS-422 and rs485 Standards Overview and System Configurations**. Application Report SLLA070C, Texas Instruments, Jun. 2002. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/slla070d/slla070d.pdf>>. Acesso em 27 jan. 2014.

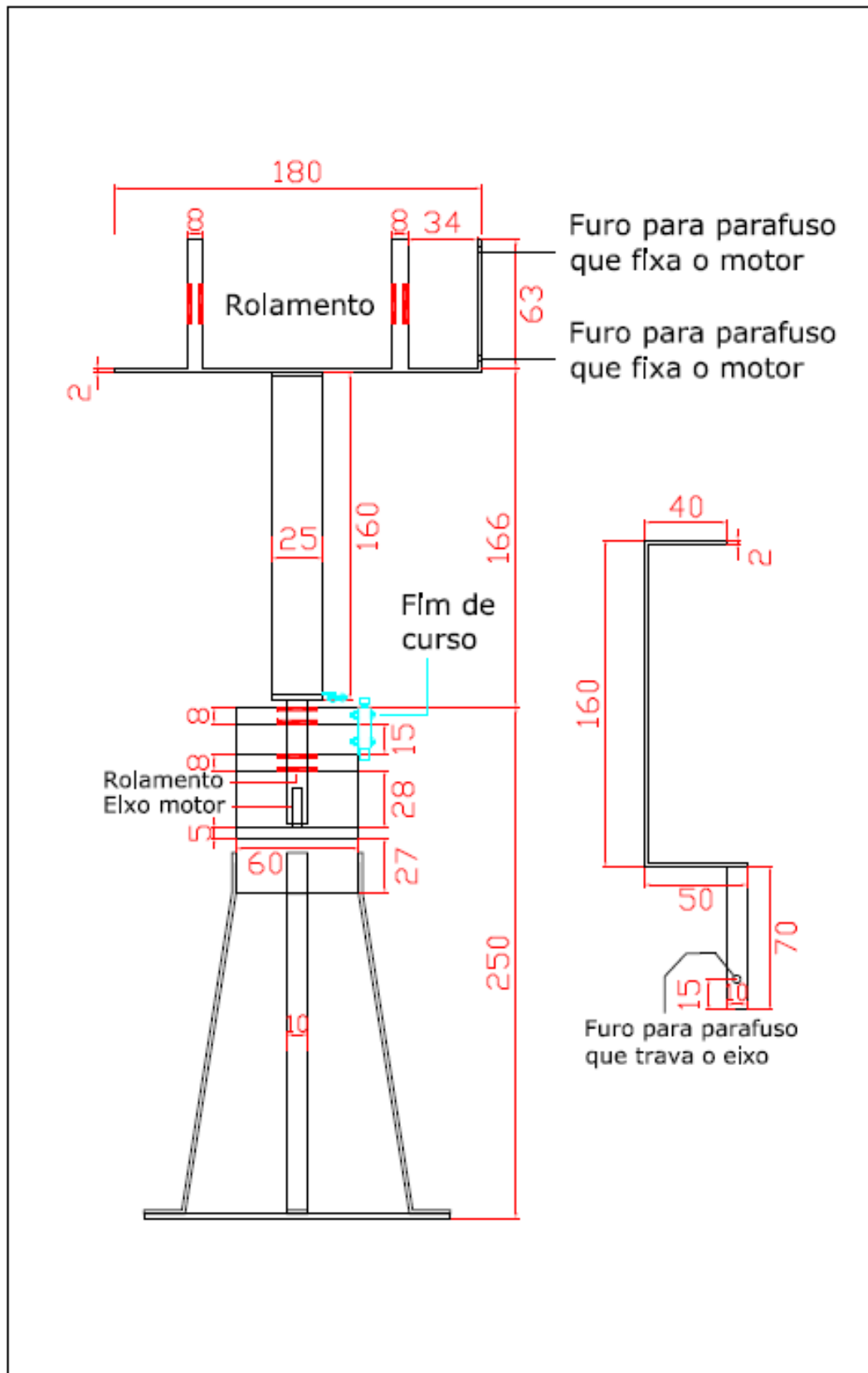
TERMOPARES. **Características de termopares tipo T**. Disponível em: <http://www.termopares.com.br/teoria_sensores_temperatura_termopares_tipo_t_cuco/>. Acesso em: 22 set. 2013.

TIBA, Chiguueru; et al. **Atlas Solamétrico do Brasil**. UFPE, 2000.

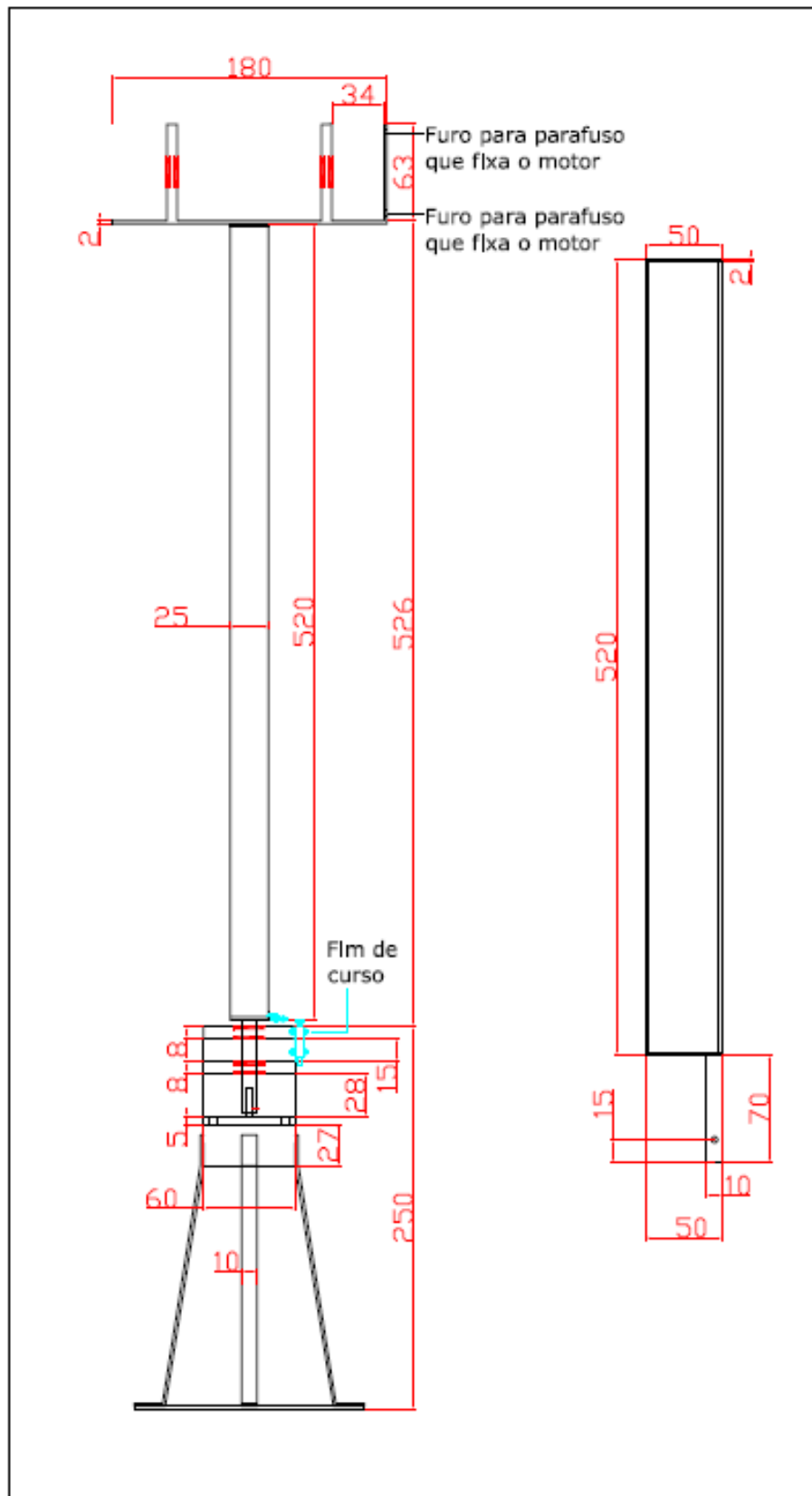
VAL, Carlos Afonso del. **Seguimiento del sol**. Disponível em <http://vac2.net/bitacora/alternativas_seguimiento>. Acesso em: 02 ago. 2013.

YAN, Huimin; ZHOU, Zhizi; LU, Huayong. Photovoltaic Industry and Market Investigation. In: **International conference on Sustainable Power Generation and Supply**, 2009, Nanjing. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5348104>>. Acesso em: 03 ago. 2013.

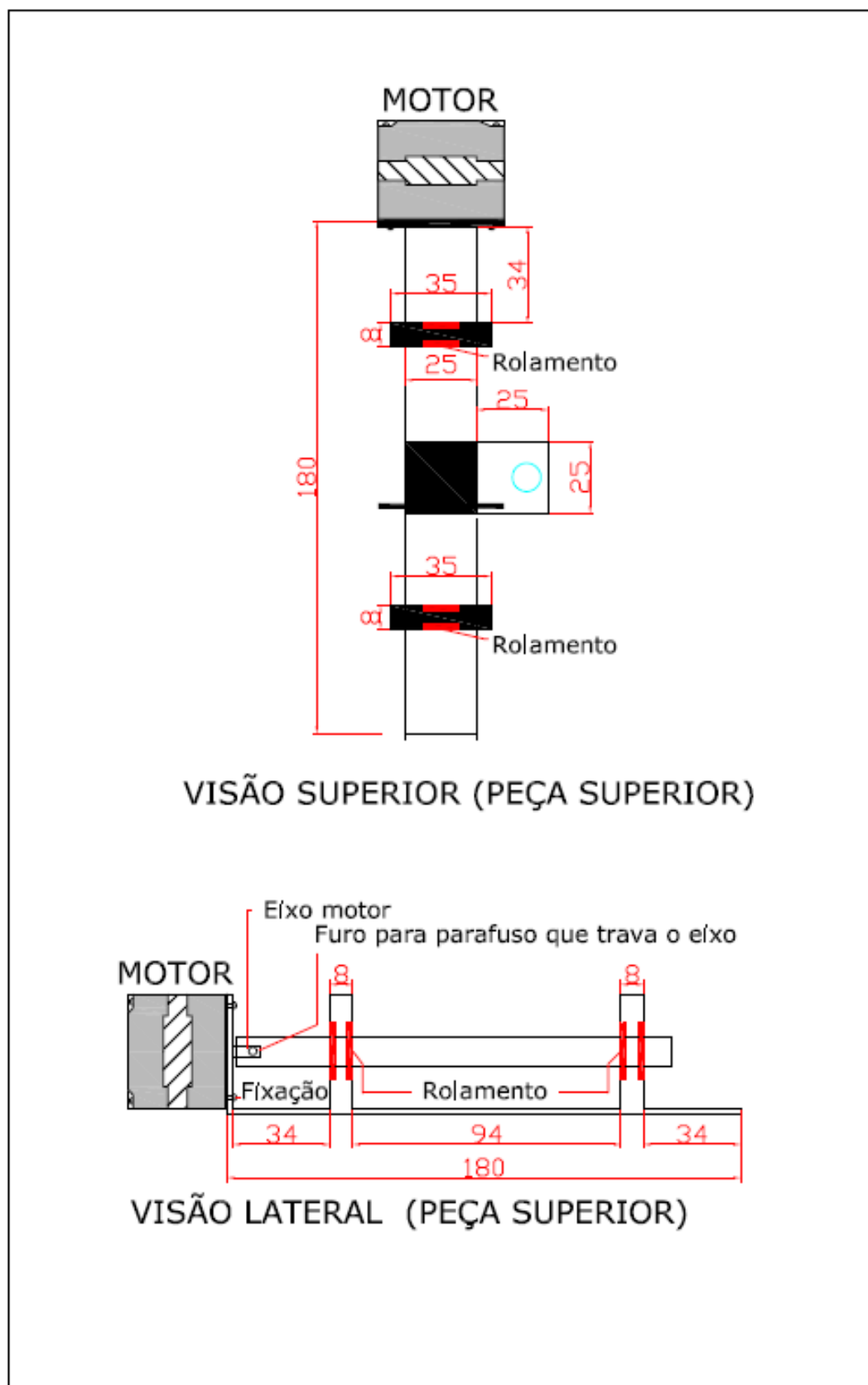
APÊNDICE A – ESTRUTURA MECÂNICA MENOR



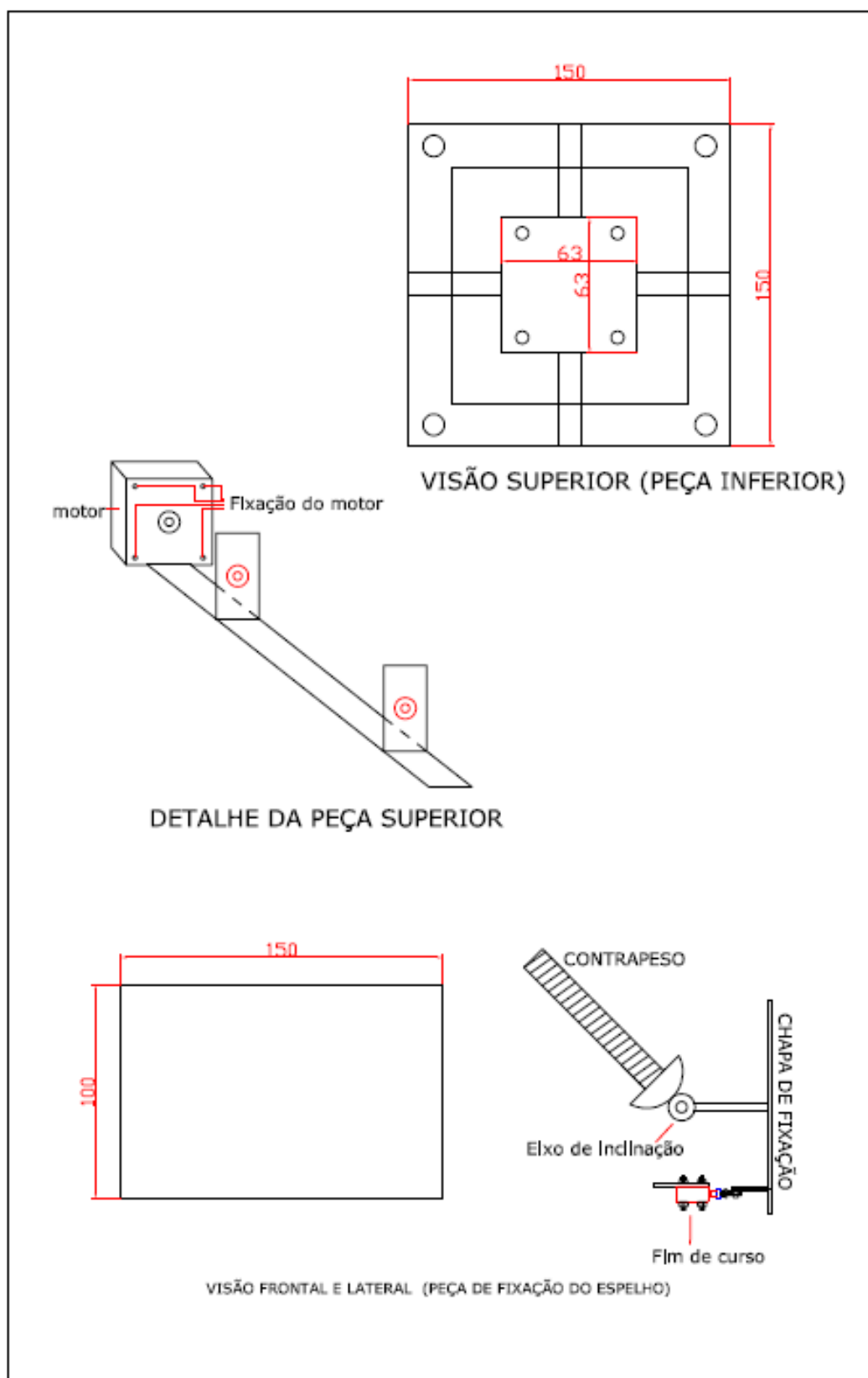
APÊNDICE B – ESTRUTURA MECÂNICA MAIOR



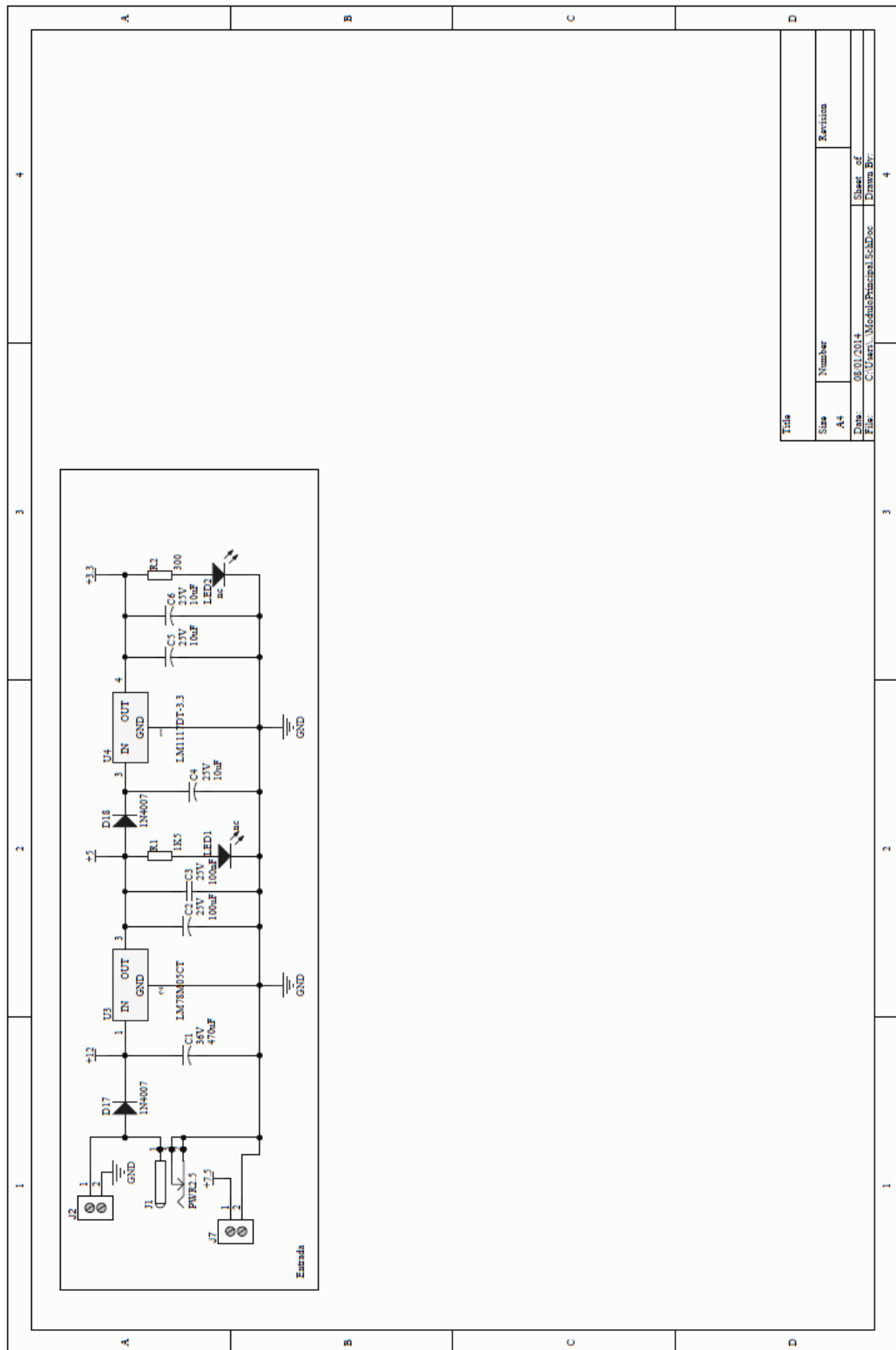
APÊNDICE C – DETALHES DA PARTE SUPERIOR



APÊNDICE D – DEMAIS DETALHES

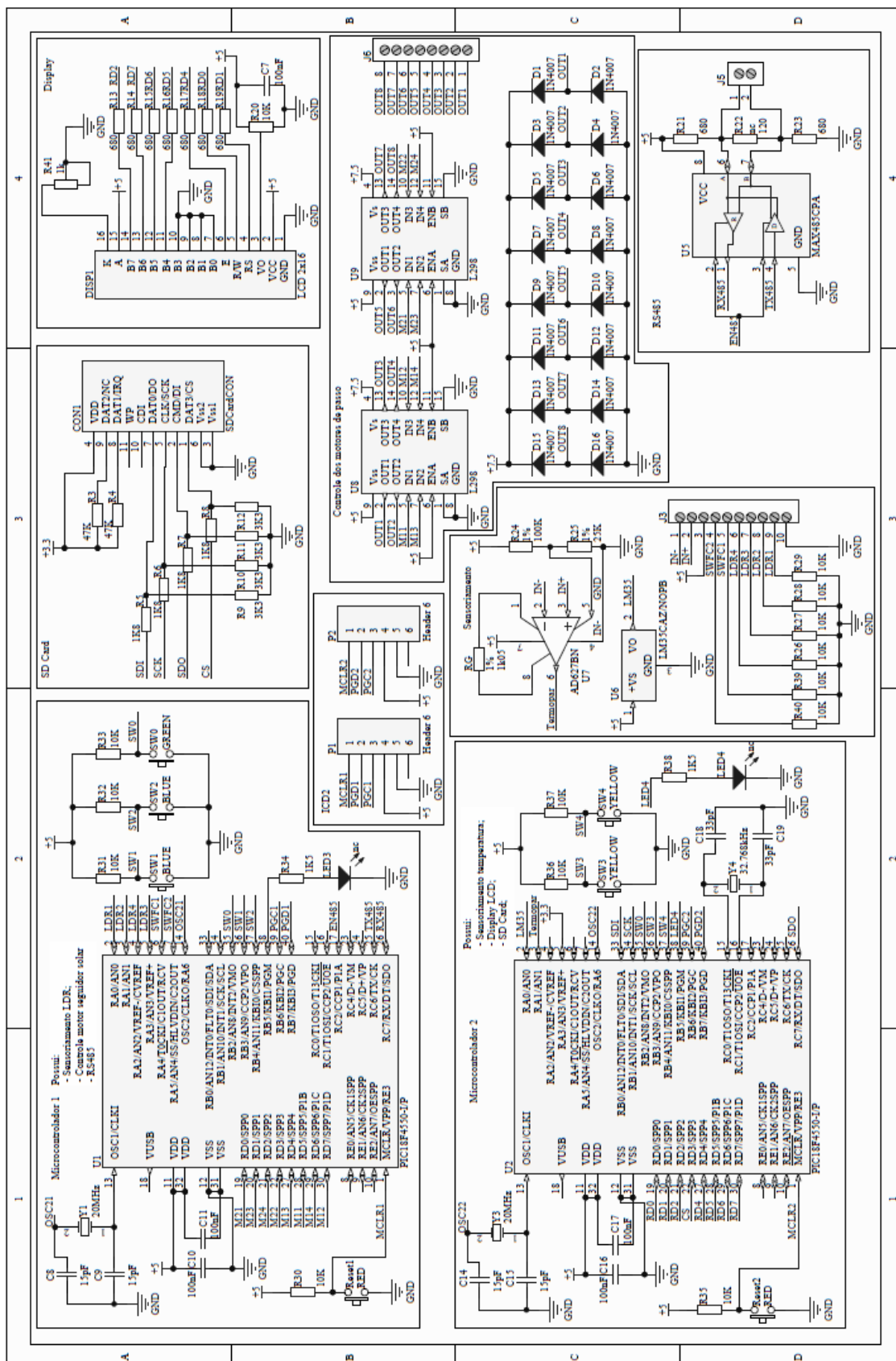


APÊNDICE E – MÓDULO PRINCIPAL, PARTE I



Title	
Size	Number
A4	
Date:	08/01/2014
File:	C:\Users\..._Módulo Principal\ScadDoc
Sheet of	4
Drawn By:	

APÊNDICE F – MÓDULO PRINCIPAL, PARTE II



APÊNDICE G – MÓDULO CONTROLADOR

