



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**IGOR SOARES NEGREIROS**

**DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE RASTREAMENTO DE UM PROTÓTIPO  
DE CONCENTRADOR SOLAR FRESNEL LINEAR**

**FORTALEZA**

**2015**

**IGOR SOARES NEGREIROS**

**DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE RASTREAMENTO DE UM PROTÓTIPO  
DE CONCENTRADOR SOLAR FRESNEL LINEAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Laurinda Lúcia Nogueira dos Reis

Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Daher

**FORTALEZA**

**2015**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

- 
- N313d      Negreiros, Igor Soares.  
Desenvolvimento do sistema de rastreamento de um protótipo de concentrador solar fresnel linear / Igor Soares Negreiros. – 2015.  
114 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2015.  
Área de Concentração: Automação e controle.  
Orientação: Profa. Dra. Laurinda Lúcia Nogueira dos Reis.  
Coorientação: Prof. Dr. Sérgio Daher.
1. Engenharia elétrica. 2. Automação. 3. Sistemas de energia elétrica. 4. Microcontroladores.  
5. Energia solar. I. Título.

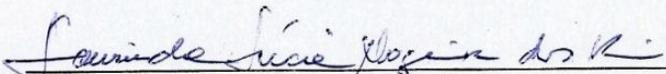
IGOR SOARES NEGREIROS

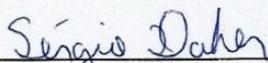
**DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE RASTREAMENTO DE UM PROTÓTIPO  
DE CONCENTRADOR SOLAR FRESNEL LINEAR**

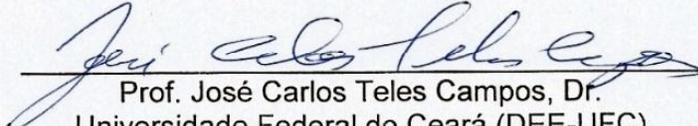
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistema de Energia Elétrica.

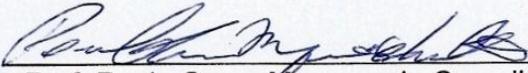
Aprovada em: 05/03/2015

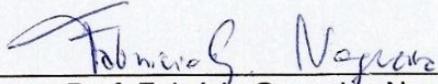
BANCA EXAMINADORA

  
Prof<sup>a</sup>. Laurinda Lúcia Nogueira dos Reis, Dr. (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (PPGEE-UFC)

  
Prof. Sérgio Daher, Dr.-Ing.  
Universidade Federal do Ceará (DEE-UFC)

  
Prof. José Carlos Teles Campos, Dr.  
Universidade Federal do Ceará (DEE-UFC)

  
Prof. Paulo Cesar Marques de Carvalho, Dr.-Ing.  
Universidade Federal do Ceará (PPGEE-UFC)

  
Prof. Fabrício González Nogueira, Dr.  
Universidade Federal do Ceará (PPGEE-UFC)

À Deus.

Aos meus pais, Luiz Eduardo (*in  
memorian*) e Amélia.

À minha noiva, Juliana.

## AGRADECIMENTO

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Laurinda Reis, pelo auxílio, estímulo, paciência e companheirismo, além da excelente orientação.

Ao Prof. Dr. Sérgio Daher por todo apoio prestado e pelas valorosas contribuições.

Aos professores participantes da banca examinadora pelo tempo, pelas colaborações e sugestões.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

“Nossa maior fraqueza está em desistir.  
O caminho mais certo de vencer é tentar  
mais uma vez.”

*Thomas Edison*

## RESUMO

Em meio às grandes crises no ambiente energético novos métodos para geração de energia elétrica, principalmente aqueles que não agridem o meio ambiente, são procurados constantemente para suprir a crescente necessidade mundial. Dentre eles, o uso de concentradores Solares do tipo Fresnel linear torna-se cada vez mais viável, devido possuir custo inferior a outros tipos de concentradores solar. Com isso, procura-se desenvolver técnicas que otimizem o uso do modelo onde o principal objetivo deste trabalho é implementar e validar o sistema de rastreamento de um protótipo de concentrador solar Fresnel linear, com funcionamento compreendido aproximadamente entre 7:30 e 16:30 h, na cidade de Fortaleza, Ceará. Para tanto, utilizou-se microcontroladores, sensores e motores para projetar um sistema capaz de rastrear a luz Solar. A caracterização e validação do sensor de posição indutivo utilizado também é parte importante do trabalho. Para a realização do rastreamento empregou-se uma metodologia teórica para localização relativa do Sol, além da técnica de escalonamento de ganho no controle do movimento empregado. A validação do sensor de posição foi realizada encontrando-se um erro máximo em torno de  $0,3^\circ$ . Portanto, pode-se considerar que, com a utilização das técnicas abordadas para a realização do controle do sistema o erro médio obtido foi cerca de  $0,06^\circ$ , fazendo com que o projeto realizasse a concentração dos raios solares no absorvedor do concentrador com um desvio máximo de  $0,5^\circ$ , fornecendo ao sistema a confiabilidade desejada para sua utilização.

**Palavras-Chave:** Concentrador Solar Fresnel Linear. Escalonamento de Ganho. Automação.

## ABSTRACT

Amid the great crisis of the energy, new methods for electric power generation, especially those do not harm the environment, are constantly sought to meet the growing need worldwide. Among them, the use of Fresnel linear concentrators becomes increasingly feasible, due to have lower cost in comparison to other types of solar concentrators. Thus, the project seeks to develop techniques that optimize use of the system where the main objective is to implement and validate the tracking system for a prototype of linear Fresnel solar concentrator, operating between approximately 7:30 and 16:30 in Fortaleza, Ceará. For that, it used microcontrollers, sensors and motors to design a system capable of tracking Solar light system. The characterization and validation of the inductive position sensor used is also an important part of the work. To perform the tracking system, have been used a theoretical methodology for relative location of the sun, beyond the gain scheduling technique in control of employee movement. The position sensor validation have a maximum error than  $0.3^\circ$ . Therefore, can consider that, with the use of the techniques employed for the achievement of system of control, the medium error obtained was about  $0.06^\circ$ , making the design perform the concentration of solar rays in the absorber concentrator with a maximum deviation of  $0.5^\circ$ , providing the desired reliability for system use.

**Keywords:** Linear Fresnel solar Concentrator. Gain scheduling. Automation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1.1</b> Participação das fontes de geração elétrica na matriz brasileira em 2013 .....	18
<b>Figura 2.1</b> Concentrador Parabólico Cilíndrico .....	28
<b>Figura 2.2</b> Concentrador Disco Parabólico .....	29
<b>Figura 2.3</b> Torre de concentração solar .....	31
<b>Figura 2.4</b> Usina solar Fresnel Linear <i>Puerto Errado 2</i> .....	32
<b>Figura 2.5</b> Ângulos astronômicos para descrição da movimentação do Sol .....	37
<b>Figura 2.6</b> Ângulos e medidas para cálculo do ângulo $k$ .....	39
<b>Figura 2.7</b> Ângulo $k$ no decorrer do dia .....	41
<b>Figura 2.8</b> Ângulos para cálculo da inclinação do espelho .....	41
<b>Figura 3.1</b> Diagrama de blocos de um sistema genérico com realimentação .....	44
<b>Figura 3.2</b> Diagrama de blocos de um sistema com Escalonamento de Ganho .....	48
<b>Figura 3.3</b> Diagrama de blocos do controlador desenvolvido .....	50
<b>Figura 3.4</b> Relação entre o ângulo do espelho e o tempo do controlador implementado .....	50
<b>Figura 4.1</b> Funcionamento do sensor de proximidade indutivo .....	58
<b>Figura 4.2</b> Funcionamento do sensor de posição proposto .....	59
<b>Figura 4.3</b> Bancada de teste do sensor .....	60
<b>Figura 4.4</b> Componentes do sensor: (a) Cano de suporte (externo - isolante) e cano sensor (interno-metálico) (b) Encaixe do sensor .....	61
<b>Figura 4.5</b> Cano isolante com bobina .....	61
<b>Figura 4.6</b> Validação da Leitura do Sensor com um paquímetro .....	61
<b>Figura 4.7</b> Esquemático da placa do oscilador, incluindo divisor de frequência .....	62
<b>Figura 4.8</b> Placa do circuito oscilador .....	62
<b>Figura 4.9</b> Esquemático do circuito para leitura digital .....	63
<b>Figura 4.10</b> (a) Conector fixo (b) Garras utilizadas anteriormente .....	64

<b>Figura 4.11</b> Leitura digital X ângulo da linha de espelho (valor medido e interpolado e erro).....	64
<b>Figura 5.1</b> Diagrama do sistema eletrônico de controle .....	67
<b>Figura 5.2</b> Concentrador construído em escala real.....	68
<b>Figura 5.3</b> Estrutura de sustentação do concentrador.....	69
<b>Figura 5.4</b> Protótipo de bancada .....	70
<b>Figura 5.5</b> Bancada de Desenvolvimento.....	71
<b>Figura 5.6</b> Maleta de proteção fechada com travas .....	71
<b>Figura 5.7</b> Maleta de proteção e componentes eletrônicos .....	72
<b>Figura 5.8</b> Circuito de Controle (Microcontrolador).....	72
<b>Figura 5.9</b> Placa com quatro circuitos osciladores e o sensor de temperatura .....	73
<b>Figura 5.10</b> Tela principal do <i>software</i> de desenvolvimento MPLab.....	74
<b>Figura 5.11</b> <i>Hardware</i> de programação PICKit 3.....	75
<b>Figura 5.12</b> Tela principal do ambiente de desenvolvimento C++ <i>Builder</i> IDE .....	75
<b>Figura 5.13</b> Motor DC responsável pela movimentação do espelho .....	76
<b>Figura 5.14</b> Estrutura de sustentação para a movimentação do espelho.....	76
<b>Figura 5.15</b> Driver para o motor.....	77
<b>Figura 5.16</b> Haste de sustentação da parte móvel do sensor .....	78
<b>Figura 5.17</b> Conjunto de teclado e LCD .....	78
<b>Figura 5.18</b> Dispositivo para calibração do sensor de posição: Pêndulo com Transferidor .....	79
<b>Figura 5.19</b> (a) Tela de seleção do ângulo desejado do menu secundário; (b) Tela do rastreamento do ângulo desejado .....	80
<b>Figura 5.20</b> (a) Tela principal da aplicação; (b) Variável para controle do tempo de acionamento do motor; (c) Rotina de Calibração .....	81
<b>Figura 5.21</b> Tela principal do <i>software</i> de controle para computadores .....	85
<b>Figura 5.22</b> Movimentação esperada do sistema .....	86
<b>Figura 5.23</b> Resposta degrau do controlador para: (a) ângulo inicial de $-25^\circ$ e ângulo de referência de $25^\circ$ (b) ângulo inicial de $0^\circ$ e ângulo de referência de $2^\circ$ .....	87

<b>Figura 5.24</b> Erro de Posição do Ângulo de Rastreamento .....	88
<b>Figura 5.25</b> Estrutura para teste com o protótipo .....	89
<b>Figura 5.26</b> Reflexo do Sol no absorvedor .....	90
<b>Figura 5.27</b> Erro de Inclinação da Linha de Espelho.....	90
<b>Figura 5.28</b> Erro de Inclinação da Linha de Espelho.....	91
<b>Figura 1 - ANEXO</b> Pinagem do microcontrolador PIC16F884.....	113

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 2.1</b> Características dos Concentradores Solar.....	35
<b>Tabela 2.2</b> Valores notáveis da posição do Sol calculados .....	41
<b>Tabela 3.1</b> Tabela para o Escalonamento de Ganho.....	50

## LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
ADC	Conversor Analógico/Digital
AST	Hora Solar Aparente ( <i>Apparent solar Time</i> )
Bps	Bits por segundo
CISC	Computador com um Conjunto Reduzido de Instruções ( <i>Complex Instruction Set Computer</i> )
CLRF	Refletor Linear Fresnel Compacto ( <i>Compact Linear Fresnel Reflector</i> )
CPU	Unidade Central de Processamento ( <i>Central Processing Unit</i> )
CPV	Energia Fotovoltaica Concentrada ( <i>Concentrated Photovoltaic</i> )
CSP	Energia solar Concentrada ( <i>Concentrated solar Power</i> )
DS	Horário de Verão ( <i>daylight saving</i> )
EEPROM	Memória Programável de somente leitura eletricamente apagável ( <i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i> )
ET	Equação do tempo
EUSART	Transmissor e Receptor Universal Aprimorado Síncrono e Assíncrono ( <i>Enhanced Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i> )
GPAP	Grupo de Pesquisa em Automação e Robótica
GPS	Sistema de Posicionamento Global ( <i>Global Position System</i> )
I/O	Entrada/Saída ( <i>Input/Output</i> )
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado ( <i>Integrated Development Environment</i> )
LCD	Display de Cristal Líquido ( <i>Liquid Crystal Display</i> )
LL	Longitude Local ( <i>Local longitude</i> )
LST	Hora Local Padrão ( <i>Local Standard Time</i> )
LVDT	Transformador Diferencial de Variável Linear ( <i>Linear Variable Differential Transformer</i> )
PWM	Modulação por Largura de Pulso ( <i>Pulse-width Modulation</i> )
RAM	Memória de Acesso Aleatório ( <i>Random Access Memory</i> )
RISC	Computador com um Conjunto Reduzido de Instruções ( <i>Reduced Instruction Set Computer</i> )
SL	Longitude Padrão ( <i>standard longitude</i> )
USART	Transmissor e Receptor Universal Síncrono e Assíncrono ( <i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i> )
USB	Barramento Serial Universal ( <i>Universal Serial Bus</i> )

**LISTA DE SÍMBOLOS**

B	Correção de N para a Equação de tempo
bps	Bits por Segundo
$h$	Ângulo horário
k	Kilo - $10^3$
K	Ângulo entre um eixo paralelo à linha Leste-Oeste e os raios Solares
m	Metro
M	Mega - $10^6$
MHz	Mega Hertz
ms	Milissegundo
N	Dia do ano
W	Watt
$\alpha$	Ângulo da altitude solar
€	Euro
$\delta$	Ângulo da declinação solar
$z$	Ângulo do azimute solar

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Geração de Energia Elétrica no Brasil .....	18
1.1.1	<i>Panorama das energias alternativas</i> .....	19
1.2	Geração Solar.....	21
1.3	Justificativa e Objetivos.....	23
1.4	Estrutura da Dissertação.....	24
2	CONCENTRAÇÃO E RASTREAMENTO SOLAR.....	25
2.1	Concentrador Solar.....	27
2.1.1	<i>Concentradores Parabólicos Cilíndricos</i> .....	27
2.1.2	<i>Disco Parabólico (Stirling)</i> .....	29
2.1.3	<i>Torre de Concentração Solar</i> .....	30
2.1.4	<i>Concentrador solar Fresnel Linear</i> .....	31
2.1.5	<i>Comparação das características dos Concentradores</i> .....	33
2.2	Rastreamento Solar .....	35
2.2.1	<i>Hora solar aparente</i> .....	35
2.2.2	<i>Ângulos Solares</i> .....	36
2.2.3	<i>Ângulo para o rastreamento do Sol</i> .....	38
2.2.4	<i>Posicionamento da Linha de Espelho</i> .....	41
3	CONTROLADORES E MICROCONTROLADORES .....	42
3.1	Controladores.....	42
3.1.1	<i>Considerações Iniciais</i> .....	42
3.1.2	<i>Controlador On/Off</i> .....	44
3.1.3	<i>Controlador PID</i> .....	45
3.1.4	<i>Escalonamento de Ganhos</i> .....	47
3.2	Microcontroladores.....	50
3.2.1	<i>Introdução</i> .....	50

3.2.2	<i>Arquitetura dos Microcontroladores</i> .....	51
3.2.3	<i>PIC16F884</i> .....	52
3.2.4	<i>Periféricos do microcontrolador usados no projeto</i> .....	53
4	SENSOR DE POSIÇÃO INDUTIVO .....	55
4.1	Introdução .....	55
4.2	Desenvolvimento do Protótipo do Sensor .....	57
4.3	Dificuldades encontradas.....	61
4.4	Calibração do sensor .....	64
4.5	Testes e conclusões da validade do sensor de posição .....	65
5	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO CONCENTRADOR SOLAR .....	67
5.1	Concentrador Solar: Estrutura e Componentes .....	67
5.1.1	<i>Concentrador em escala natural</i> .....	67
5.1.2	<i>Protótipo do concentrador</i> .....	69
5.1.3	<i>Bancada de Desenvolvimento</i> .....	70
5.1.4	<i>Maleta de componentes eletrônicos</i> .....	71
5.2	Circuitos Eletrônicos .....	72
5.2.1	<i>Circuito de Controle / Microcontrolador</i> .....	72
5.2.2	<i>Circuitos Periféricos</i> .....	73
5.3	Ferramentas de projeto.....	74
5.4	Outras Estruturas .....	75
5.4.1	<i>Instrumentos para Interface</i> .....	78
5.4.2	<i>Aferição e Calibração</i> .....	79
5.5	Softwares Desenvolvidos .....	80
5.6	Testes com o protótipo.....	85
5.6.1	<i>Movimentação esperada do sistema</i> .....	85
5.6.2	<i>Teste do rastreamento no protótipo</i> .....	88
6	CONCLUSÕES.....	92
6.1	Trabalhos Futuros .....	94

BIBLIOGRAFIA .....	96
APÊNDICE A – ROTINAS BÁSICAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE RASTREAMENTO NO MICROCONTROLADOR .....	101
a. Interrupção para leitura do sensor .....	101
b. Leitura da temperatura – conversor AD .....	102
c. Pulso motor .....	103
d. Correção do ângulo a partir da temperatura .....	103
e. Interpolação dos dados de sensor para gerar o ângulo .....	103
f. Rotinas para ler e escreve na EEPROM .....	104
g. Salvar Valores Obtidos na EEPROM .....	105
h. Tratamento, configuração, leitura e escrita na USART .....	106
i. Rotina de Calibração do Sensor de Posição .....	109
j. Tabela do Escalonamento de Ganho .....	109
k. Rotina de Rastreamento .....	110
ANEXO A – ASPECTOS GERAIS DO PIC 16F884 .....	111
a. Visão geral .....	112
b. Pinagem do microcontrolador .....	112

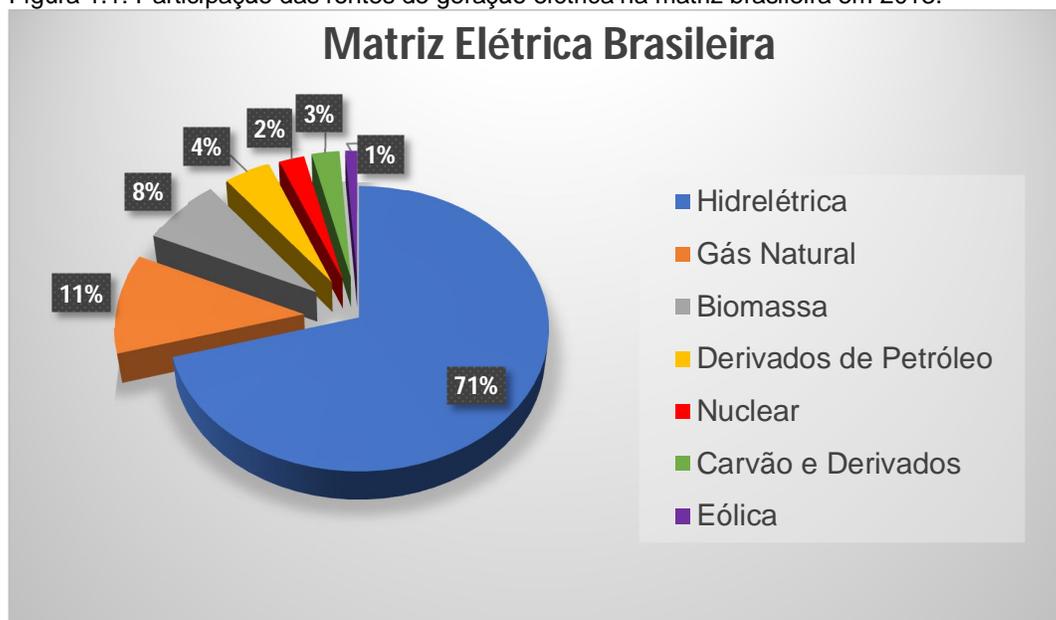
## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Geração de Energia Elétrica no Brasil

A energia elétrica é um dos bens essenciais constituindo uma das principais fontes de luz, calor e força do mundo moderno, além de ser, em grande parte, responsável por vários avanços tecnológicos [ELETROBRAS, 2013]. No Brasil, este setor encontra-se em permanente evolução, tanto devido às mudanças legais e normativas assim como seus progressos técnicos observados neste âmbito [ANEEL, 2008].

O Brasil é um dos países do mundo com maior participação de energias renováveis na sua matriz energética com aproximadamente 41% em 2013, mesmo com uma queda de aproximadamente 3% em comparação com o ano anterior (2012) devido principalmente à menor oferta de energia hidráulica. Em comparação, tem-se que a média mundial possui somente 13% da sua matriz renovável [EPE, 2014]. Em relação à matriz elétrica, o Brasil possui 79,3% da geração por fontes renováveis, enquanto o mundo tem apenas 20,3% [EPE, 2014]. A maior parcela de contribuição na matriz elétrica brasileira ainda é através da geração hidrelétrica como ilustrado na Figura 1.1.

Figura 1.1: Participação das fontes de geração elétrica na matriz brasileira em 2013.



Fonte: Adaptação - EPE (2014).

Um dos principais indicadores do nível da qualidade de vida e do desenvolvimento econômico é o consumo de energia elétrica, refletindo a

cadência dos setores comercial, industrial e de serviços. No Brasil, o consumo final de energia elétrica entre os anos de 2012 e 2013 aumentou 3,6% [EPE, 2014] e tem como planejamento da expansão do setor aumentar a capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional (SIN) em 2020 em mais de 56% na década, atingindo cerca de 171 GW [EPE; MME, 2011].

### *1.1.1 Panorama das energias alternativas*

A procura por fontes alternativas aos processos tradicionais de geração de energia engloba inúmeras ponderações tornando esta tarefa muito complexa. A disponibilidade de um certo recurso, o desenvolvimento da tecnologia apropriada para o máximo aproveitamento da fonte, a viabilidade socioeconômica e seus respectivos impactos ambientais, além da necessidade de integração à matriz energética pré-existente são alguns exemplos de questionamentos que podem ser feitos neste âmbito [FUNCEME, 2010].

Uma análise da esfera global, tem-se que a busca pela autossuficiência na geração de energia elétrica atrelada a utilização de diferentes fontes de energias alternativas com o intuito de suprir a demanda interna do país é a nova ordem energética mundial. Com isso, várias pesquisas e estudos técnicos e econômicos surgem, conectados aos respectivos estudos de impactos socioambientais, dando o devido suporte a futuros investimentos em tecnologia e infraestrutura, visando o desenvolvimento de novos meios de produção energética. O Brasil apresenta uma enorme diversidade nos seus recursos para produção de energia elétrica, dentre as quais pode-se citar os tipos de geração mais conhecidos: hidráulica, solar, eólica e a partir da biomassa [PACHECO, 2006].

A fonte de maior importância para geração elétrica no Brasil é sem dúvida a hidrelétrica. Como principais vantagens do uso da geração hidrelétrica pode-se citar o fato de ser uma fonte renovável de energia, dependendo apenas do ciclo hidrológico e podem viabilizar o uso de outras fontes renováveis, como a geração eólica e solar, devido a sua flexibilidade e a capacidade de armazenamento. Além de fornecer uma ótima relação custo/benefício e uma alta eficiência, pode-se citar também que o uso desta

fonte promove a segurança energética, por elevar a confiabilidade e estabilidade do sistema elétrico [ELETROBRAS, 2013].

A energia proveniente do Sol pode ser utilizada diretamente como fonte luminosa, térmica ou convertida em energia elétrica. Quase todas as outras fontes de energia são formas indiretas de energia solar [PACHECO, 2006]. Como a grande fonte primária de energia do nosso planeta, o Sol influencia o movimento dos ventos, das marés e dos ciclos hidrológicos, por exemplo [CARVALHO; BORGES NETO, 2012]. Apesar de valores ainda elevados comparado com outros tipos de geração, a energia solar mostra-se um grande potencial para suprir necessidades futuras.

O aproveitamento do potencial eólico para as práticas agrícolas através de moinhos de vento já era uma forma de utilização da energia eólica, onde visavam, principalmente a moagem de grãos e o bombeamento de água [CARVALHO, 2003]. No nordeste brasileiro, além da alta média na velocidade dos ventos, nota-se uma certa complementariedade da geração eólica e hidrelétrica. Os meses onde há maior movimentação do ar atmosférico são os que menos chovem, fazendo com que de fato o emprego da energia eolielétrica se firmando como uma grande alternativa na composição da matriz energética [PACHECO, 2006].

Todo recurso renovável que provêm da matéria orgânica, de origem vegetal ou animal, com o objetivo principal de produzir energia pode ser caracterizado como biomassa [MMA, 2013]. Madeira, resíduos agrícolas e florestais, excrementos animais, carvão vegetal, álcool, óleos animais e vegetais, biogás são formas de biomassa que podem ser utilizadas como combustível. Um dos processos mais conhecidos na utilização da biomassa é a fabricação de biocombustíveis, como o biodiesel [PACHECO, 2006]. Como estímulo à produção a partir da biomassa, foi realizado em 2008 o primeiro leilão de energia gerada a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar. Ainda em caráter experimental e reduzido, alguns incentivos têm sido criados visando a produção de energia pela queima do lixo urbano, assim como pela utilização do metano associado a dejetos suínos [ANEEL, 2008].

Outros tipos de geração de energia elétrica estão sendo pesquisados, desenvolvidos e implementados com o intuito de diversificar ainda mais a matriz energética mundial. Um bom exemplo disso é a utilização da energia fornecida pelos movimentos das ondas. No Brasil a primeira usina que utiliza a energia das ondas, localizada no Porto do Pecém, no Ceará, tem o apoio da ANEEL e pode vir a se tornar mais uma viável fonte para o país devido à enorme extensão da sua costa.

O governo atua com programas de incentivo às fontes alternativas de energia, como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFRA), visando diversificar a matriz energética, assegurar o abastecimento e reduzir emissões de CO<sub>2</sub>, além de desenvolver o potencial de cada região. Com a Resolução N<sup>o</sup> 482, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica, um maior crescimento à geração descentralizada de fontes alternativas é esperado, devido ao sistema de compensação de energia gerada [BRASIL, N<sup>o</sup>482, 2012]. O apoio governamental é muito decisivo na diversificação da matriz energética, uma vez que novas tecnologias geralmente são caras e pouco difundidas, devendo o governo estimulá-las.

## **1.2 Geração Solar**

Como já abordado anteriormente, o Sol é a fonte primária de todas as outras fontes de energia, fornecendo um potencial milhares de vezes maior que a demanda mundial de eletricidade. Devido à localização geográfica do Brasil, assim como uma extensa área com potencial para exploração da irradiação solar com condições favoráveis durante praticamente o ano inteiro, tomando como exemplo a região Nordeste que possui em média 2500 horas por ano de insolação, sendo extremamente válido a utilização desta fonte de energia [FUNCEME, 2010].

Visando o aproveitamento desta fonte de energia, pode-se dividir seu modo de utilização em sistemas fotovoltaicos e sistemas heliotérmicos. No primeiro grupo segue um processo de aproveitamento da energia solar para

conversão direta em energia elétrica, através da utilização de painéis fotovoltaicos. O segundo grupo utiliza basicamente a conversão de energia solar em calor, onde posteriormente poderá ser convertida em outra forma de energia [MMA, 2013].

Realizando o aproveitamento solar visando diminuir a necessidade de construção de barragens para hidrelétricas, da queima de combustíveis fósseis, dos desmatamentos para produção de lenha e da construção de usinas atômicas, por exemplo, torna-se mais atraente considerando um sistema híbrido, como a combinação solar/hidro, possibilitando a realização de um planejamento equilibrado com o intuito de minimizar a influência da variação do clima na geração energética [MMA, 2013].

Em 8 de setembro de 2013, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) abriu um leilão (Leilão de Energia A-3/2013) habilitando empreendimentos que utilizam, entre outras fontes, a geração solar dos tipos fotovoltaicos e heliotérmicos para contratação de energia elétrica para o Sistema Interligado Nacional (SIN). Apesar do leilão focar na geração eólica, prevê-se um cenário de médio prazo para uma maior exploração da energia solar [EPE, 2013]. Pode haver um desestímulo à utilização da geração solar devido à redução da geração em dias chuvosos ou nublados, e não haver aproveitamento desta fonte no período noturno, unido ao alto custo de compra e instalação dos equipamentos. Porém deve-se lembrar que é uma fonte renovável, limpa e de baixa manutenção dos equipamentos utilizados, sendo portanto uma ótima fonte de energia para sistemas descentralizados, e que se instalados em residências, comércios ou indústrias podem gerar uma redução na conta de energia elétrica [MMA, 2013].

Uma parcela expressiva de toda energia elétrica gerada no Brasil é consumida na forma de calor para o processo e aquecimento direto. Com isso, nota-se que pelo menos parte desta demanda poderia ser provida por meio da energia termosolar [EPE; MME, 2013]. A energia solar térmica pode ser obtida através de coletores planos ou de concentradores solares. Por utilizar o calor gerado a partir do Sol, somente a irradiação direta é aproveitada, descartando outros tipos de irradiação, como a difusa. Sua utilização não é somente para

aquecimento de água no uso doméstico, mas também para aquecimento industrial e uma variada gama de aplicações.

Os coletores solares são utilizados principalmente para aquecimento de água, a temperaturas relativamente baixas, inferiores a 100°C. Já os concentradores solares realizam o aproveitamento da energia solar aplicando-a em sistemas que necessitam de temperaturas mais elevadas, que captam a energia em uma área relativamente grande e concentra-a em uma área muito menor, resultando em um aumento substancial na área de concentração. A superfície refletora dos concentradores pode possuir forma parabólica, esférica ou plana, de modo que os raios solares nela incididos concentrem-se. Estes sistemas podem ser utilizados para a geração de vapor e consequente geração de energia elétrica [MMA, 2013].

Estes sistemas são relativamente mais simples que os fotovoltaicos. Como desvantagem da sua utilização, a necessidade de focalizar a luz solar incidente exige que haja algum dispositivo de orientação, ocasionando esforços adicionais, que tendem a minimizar-se em sistemas de grande porte.

A geração fotovoltaica ocorre por meio de efeitos da irradiação sobre determinados materiais, como o silício, decorrente da excitação dos elétrons na presença de luz, gerando energia elétrica diretamente. Diferentemente da energia termosolar, a fotovoltaica pode produzir eletricidade mesmo com irradiação difusa [MMA, 2013].

### **1.3 Justificativa e Objetivos**

Com o custo da energia elétrica tendendo a aumentar devido à crise nos combustíveis fósseis, busca-se uma alternativa mais acessível que assegure o fornecimento de energia, garantindo um bom nível de desenvolvimento, segurança e conforto. Não há pretensão de substituir o uso de outras fontes de energia, pois o sistema proposto só torna-se viável quando há irradiação solar direta, sendo portanto uma alternativa para reduzir o uso de fontes não renováveis e poluentes de energia, contribuindo para o desenvolvimento sustentável. Estas fontes não renováveis e poluentes de

energia podem provocar danos irreversíveis ao meio ambiente, além do seu esgotamento rápido, comprometendo a economia e a sociedade.

O presente trabalho apresenta os processos para o desenvolvimento de um sistema de rastreamento e dos componentes de um protótipo de um concentrador solar Fresnel linear que pode ser destinado a aquecer ou vaporizar líquidos para aplicações residenciais, comerciais ou industriais.

A proposta principal deste trabalho é desenvolver este sistema com funcionamento compreendido aproximadamente entre 7:30 e 16:30 h, na cidade de Fortaleza, Ceará.

Para tanto, deve-se, primeiramente realizar um processo de validação do sensor que detecta em que ângulo o espelho se encontra e a sua relação com a variação da temperatura. Após este procedimento deve-se desenvolver uma formulação que relacione a latitude, a longitude, o dia, a hora, o mês e o ano com o ângulo que o Sol faz com o horizonte, com a finalidade de utilizá-lo para rastrear o posicionamento Solar.

Após a realização destes processos, tem-se como objetivo a aplicação de técnicas de controle em um microcontrolador para o devido rastreamento automático da posição do Sol, onde o espelho deve corrigir sua angulação no decorrer do dia para deixar o raio solar refletido no foco desejado. Finalmente, pretende-se concretizar ensaios do equipamento demonstrando sua viabilidade.

#### **1.4 Estrutura da Dissertação**

O presente trabalho está dividido em capítulos, da seguinte maneira:

O Capítulo 1 realiza uma breve descrição da problemática, introduzindo conceitos, por meio da introdução, e situando tecnicamente a relevância do trabalho desenvolvido. Aborda, também, seus principais objetivos e justificativas.

No Capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica sobre concentradores Solares e técnicas de programação e controle, posteriormente utilizados, assim como um breve estudo sobre o estado da arte. Neste mesmo

capítulo, ainda discute-se sobre como foi feito o rastreamento do Sol segundo a estimativa da sua movimentação.

Aborda-se a estratégia de controle utilizada neste trabalho no Capítulo 3. Ainda no Capítulo 3 explana-se sobre a teoria do microcontrolador utilizado e sua arquitetura, apresentando as principais funções empregadas e suas respectivas configurações.

No Capítulo 4 explana-se todo o desenvolvimento do sensor de posição indutivo utilizado, desde a sua montagem aos seus testes e correções.

Apresenta-se os materiais e os métodos utilizados, na análise do concentrador solar projetado e na validação de alguns componentes presentes no sistema, no Capítulo 5. Também se exhibe a relação dos materiais utilizados, detalhando o princípio de funcionamento e a metodologia experimental empregada, assim como as ferramentas computacionais e o *hardware* para a programação que foram utilizadas para o desenvolvimento também são apresentados neste capítulo. Os resultados obtidos nos procedimentos experimentais e a discussão sobre estes, assim como as suas respectivas análises, conclusões e recomendações em relação aos resultados alcançados também se encontram neste capítulo.

Por fim, o Apêndice A traz as funções desenvolvidas que compõe o software que comanda a automação do sistema e o Anexo A alguns conceitos adicionais sobre o microcontrolador utilizado.

## **2 CONCENTRAÇÃO E RASTREAMENTO SOLAR**

A CSP (*Concentrated solar Power*) pode ser caracterizada pelo uso de lentes ou espelhos com a intenção de concentrar a energia solar térmica em uma área reduzida. Ao se converter a luz concentrada em calor, pode-se acoplar, por exemplo, uma turbina a vapor ligada a um gerador elétrico,

produzindo energia elétrica. Pode-se utilizar ainda concentradores solares aplicados à geração fotovoltaica, conhecidos por CPV (*Concentrated Photovoltaic*).

Dentre as tecnologias existentes para a concentração solar pode-se citar a película parabólica, disco *Stirling*, refletor linear concentrado Fresnel, chaminé solar e as torres de energia solar. Cada método de concentração tem o objetivo de conseguir alcançar temperaturas de até 1000°C através de eficiências energéticas que podem alcançar 30%. Porém, podem variar quanto a maneira em que seguem e focam a luz solar e quanto à maneira de concentração, pontual ou linear, por exemplo.

Uma das vantagens a ser destacada com relação ao uso da energia solar concentrada é a de não ser poluente durante sua utilização e a poluição ocorrida durante sua fabricação pode ser totalmente controlável, bastando utilizar técnicas já difundidas no processamento industrial. A luz concentrada pode ser direcionada para locais onde há necessidade de iluminação através da utilização de fibras óticas [TRÍPOLE, 2004]. Devido à concentração realizada, atingem-se temperaturas apropriadas para a geração de energia elétrica através de, por exemplo, turbinas a vapor. Pode-se, também, realizar o armazenamento deste calor, com o intuito de produzir energia elétrica quando nublado ou a noite, por meio de materiais de mudança de fase, termoquímicos ou pelo armazenamento de calor sensível com sais fundidos [MENDES et.al, 2010].

A concentração solar é uma tecnologia dependente da situação climática e, além de não produzir durante a noite, é incapaz de prover a geração de energia elétrica com irradiação difusa, podendo, estas dificuldades, serem reduzidas com a utilização de estruturas para o armazenamento do calor, aumentando a capacidade de utilização da energia fornecida durante as horas diárias com irradiação direta. Também deve-se buscar maneiras de movimentar o sistema concentrador para o Sol com a finalidade de aumentar a eficiência da usina, o que demanda a existência de sistemas de rastreamento.

## 2.1 Concentrador Solar

Há diversos tipos de concentradores solar, variando o tipo de espelho utilizado, a maneira de rastreamento ou o número de eixos com grau de liberdade para realizar este rastreamento, por exemplo. Entre os principais tipos de concentradores pode-se citar os parabólicos cilíndricos, os discos parabólicos, as torres de concentração e o concentrador Fresnel linear, foco do presente trabalho [CANAVARRO, 2010].

Alguns conceitos devem ser inseridos com a finalidade de melhorar a assimilação dos métodos a serem abordados posteriormente. O termo coletor solar caracteriza uma peça composta por um isolamento térmico, um vidro que visa provocar o efeito estufa e o absorvedor. Os absorvedores ou receptores são componentes de material escuro ou revestidos com uma coloração negra ou seletiva, com o objetivo de absorver a irradiação solar e transferi-la para o fluido circulante na forma de calor. Como características, devem possuir alta absorção à irradiação solar e baixa emitância para irradiação térmica para o meio. Em geral, utiliza-se uma cobertura de vidro ao seu redor, reduzindo as perdas de calor por convecção, podendo-se também manter um vácuo no espaço entre o vidro e o tubo receptor para otimizar essa redução.

Um concentrador solar é um tipo de coletor solar com a capacidade de concentrar a energia solar incidente em uma pequena área, o absorvedor. Com isso aumenta-se a intensidade energética recebida e, conseqüentemente, sua eficiência. Para tanto, a luz solar deve passar por um sistema óptico de lentes ou de espelhos, podendo realizar esta concentração de forma pontual ou linear, dependendo da tecnologia que está sendo empregada no sistema. Os concentradores abordados adotam conjuntos de espelhos planos ou parabólicos dispostos de diferentes maneiras [PIGOZZO, 2013].

### 2.1.1 Concentradores Parabólicos Cilíndricos

Os concentradores desse tipo são caracterizados por uma linha de espelhos esféricos côncavos em uma dimensão, ou seja, cilíndricos, onde o absorvedor se situa em uma linha que passa pelo foco dos espelhos, pois partem do princípio de que todo raio de luz que incide paralelamente ao eixo

principal do espelho reflete na direção que passa pelo seu foco principal. É uma tecnologia mais difundida que as demais, abrangendo cerca de 90% das centrais mundiais, conforme [ALMEIDA, 2013], representada pela Figura 2.1 que exhibe uma planta instalada na África do Sul da Acwa Power.

Figura 2.1: Concentrador Parabólico Cilíndrico.



Fonte: CRESEB, 2014.

A utilização de sistemas parabólicos visa maximizar a razão de concentração no coletor, com a intenção de aumentar sua eficiência. Com esta mesma finalidade, a utilização de sistemas que permitem a variação da posição dos espelhos de acordo com a localização da fonte solar é comum, majorando inevitavelmente o desempenho do concentrador, geralmente com um ou dois eixos com graus de liberdade.

Para a utilização de fluidos de transferência de calor como óleos sintéticos, estes sistemas conseguem ser estáveis até 400°C. Com o emprego de sais fundidos, esse limite pode chegar a 540°C, melhorando consideravelmente sua eficiência [IRENA, 2012].

Os concentradores parabólicos cilíndricos tornam-se rentáveis, por exemplo, para sistemas híbridos com gás natural [MALAGUETA, 2012] e construídos em grande escala devido seu investimento relativamente elevado, inviabilizando economicamente o investimento em pequenas instalações.

### 2.1.2 Disco Parabólico (Stirling)

Os concentradores do tipo disco parabólico utilizam na sua concepção um disco no formato de parábola, onde há concentração da luz solar em um foco onde fica o situado seu absorvedor como apresentado na Figura 2.2, sistema da Global NevadaCorp nos Estados Unidos.

Figura 2.2: Concentrador Disco Parabólico.



Fonte: CRESEB, 2014.

Necessita que o rastreamento do Sol seja realizado em dois eixos, movimentando-se de maneira bidirecional, devido seu método de concentração ser pontual, produzindo elevadas temperaturas. Esta tecnologia é capaz de alcançar maior eficiência entre todos os tipos de sistemas concentradores solar, atingindo cerca de 30%.

Devido ser um sistema modular, podem ser instalados em encostas ou terrenos irregulares, ao contrário de outros tipos de concentrador. Com isso, esta tecnologia possui vantagens econômicas em várias regiões, mesmo que seu custo seja superior às demais [IRENA, 2012].

O sistema normalmente consegue atingir temperaturas próximas a 750°C. No entanto, há concentradores específicos que possuem maiores eficiências sendo possível obter temperaturas próximas a 1000°C.

### *2.1.3 Torre de Concentração Solar*

A torre de Concentração Solar consiste em uma malha de espelhos planos, chamados de heliostatos, que focam toda a irradiação solar em um ponto de uma torre central, da maneira exibida na Figura 2.3, planta localizada na Espanha pela Albengoa. Essa malha é composta por espelhos que realizam o rastreamento do Sol em dois eixos.

A torre de concentração solar pode atingir temperaturas superiores aos concentradores parabólicos cilíndricos e aos sistemas lineares de Fresnel, por concentrar a irradiação em um único receptor e suas perdas serem mínimas.

Esse tipo de concentrador pode, também, utilizar água (vapor), ar ou sal fundido para o transporte do calor para o sistema trocador de calor ou turbinas a vapor. Dependendo da concepção do receptor e do fluido com o qual está trabalhando, as temperaturas podem variar entre 250°C e até mais de 1000°C para futuras instalações. Para as instalações atuais as temperaturas aproximam-se de 600°C [IRENA, 2012].

Figura 2.3: Torre de concentração solar.



Fonte: CRESEB, 2014.

As plantas típicas para a utilização de Torres solares variam de 10 MW a 50 MW. Quando aumenta-se a área da malha de espelhos, com o intuito de aumentar a produção, há um impacto direto na distância entre o receptor e os espelhos, resultando em aumento das perdas ópticas devido à absorção atmosférica, ao desvio angular do espelho por causa das imperfeições e maiores erros no rastreamento [IRENA, 2012].

A temperatura elevada faz com que a utilização de armazenamento de energia térmica se torne atraente permitindo uma estratégia de geração flexível para maximizar a eficiência. Com isso, os custos podem vir a ser reduzidos e experiência operacional adquirida, tornando mais atraente esse tipo de geração.

#### *2.1.4 Concentrador solar Fresnel Linear*

O concentrador solar Fresnel Linear consiste na utilização de uma série de espelhos longos, estreito e planos, onde concentra toda a irradiação incidida em um receptor localizado acima dos espelhos. Este tipo surge com o intuito de se ter um desempenho aproximado do concentrador cilindro

parabólico de maneira mais econômica e com menos perdas, utilizando o princípio de Fresnel que afirma que uma parábola pode ser aproximada por um conjunto de segmentos de reta tangentes [CANAVARRO, 2010]. A estrutura pode ser melhor visualizada observando a Figura 2.4, onde está representado a usina solar de *Puerto Errado 2* com 30 MW, instalada no sul da Espanha e utilizando mais de 300.000 m<sup>2</sup> de espelhos [TUBOSOL PE2, 2014].

Coletores Linear Fresnel buscam assemelhar-se aos coletores parabólicos, com o uso de uma série de espelhos planos colocados em diferentes ângulos para se concentrar a luz em um receptor fixo localizado a alguns metros acima do campo de espelhos. Cada linha de espelhos é equipada com um sistema de rastreamento de um único eixo e é otimizado individualmente para garantir que a reflexão da luz atinja o receptor.

Figura 2.4: Usina solar Fresnel Linear *Puerto Errado 2*.



Fonte: TUBOSOL PE2, 2014.

A linha focal virtual criada pelos espelhos pode possuir alguma distorção, podendo-se necessitar de um espelho refletor secundário de cima do absorvedor com o intuito de reorientar os raios que não o atingiram, ou ainda pode-se inserir alguns absorvedores paralelos, formando receptor amplo, tornando-se suficiente para envolver a maior parte da luz solar.

Dentre as principais vantagens deste sistema, em comparação com os demais, pode-se citar custos baixos, cerca de 3 a 4 € por potência (W) instalada, devido à utilização de espelhos de vidro plano, padronizados e produzidos em massa. Sua estrutura de suporte é de metal leve e de montagem fácil. Devido serem mais estreitos, os espelhos têm menor influência da ação dos ventos, resultando melhor estabilidade e menos perdas, pontos importantes para o estímulo a sua utilização. Porém estas vantagens devem ser contrabalançadas com o fato de que sua eficiência é menor, cerca de 18%, do que com a utilização de outros tipos de concentradores devido às propriedades geométricas [IRENA, 2012].

No que diz respeito ao rastreamento solar, necessita de uma precisão menor, podendo ser realizado através de um rastreamento virtual, dispensando sensores e utilizando algoritmos matemáticos para tanto. Pode atingir cerca de 300°C, possuindo um rendimento óptico de 0,65 - 0,7.

Uma desvantagem do sistema é a projeção da sombra do absorvedor nos espelhos à medida que há movimentação do Sol. Surge com isso uma variante do sistema Linear Fresnel, o Concentrador Linear Fresnel Compacto (CLFR). Esta tecnologia possui múltiplos refletores lineares potenciando a existência de um maior número de fileiras de espelhos mais próximos entre si, orientadas alternadamente para o tubo absorvedor, despertando interesse aos pesquisadores e sendo cada vez mais utilizada, conforme apresentada em [CANAVARRO, 2010].

#### *2.1.5 Comparação das características dos Concentradores*

Comparando-se os tipos de concentradores apresentados anteriormente, obtêm-se informações importantes. Do ponto de vista comercial, as plantas que utilizam concentradores Cilíndricos Parabólicos são mais difundidas com mais de 50 usinas já no final do ano de 2012, fazendo com que o risco de investimento na tecnologia seja minimizado pela sua difusão [MOYA, 2013].

A Tabela 2.1 exhibe algumas características dos concentradores abordados. O custo da tecnologia por potência (W) instalada é um dos

principais motivadores do desenvolvimento do trabalho em questão. Para as características destacadas na Tabela, considera-se a produção de energia elétrica, onde a eficiência líquida anual engloba as variações climáticas e prejuízos com a manutenção.

Para o atual projeto, a implementação e manutenção da estrutura do sistema e a durabilidade são fatores importantes. A utilização de espelhos planos ao invés de espelhos côncavos reduz em grande parte a complexidade do sistema. Este fator, atrelado a uma série de outros, resulta em um custo por watt instalado inferior às demais tecnologias abordadas, fazendo com que os concentradores Fresnel Linear sejam os mais adequados para empregar nesta concepção.

Tabela 2.1: Características dos Concentradores solar

<b>Características</b>	<b>Cilindro Parabólico</b>	<b>Torre Central</b>	<b>Disco Parabólico</b>	<b>Linear Fresnel</b>
Potência Unitária (W)	15-200M	15-150M	3-25K	15-200M
Eficiência máxima (%)	20	23	30	18
Eficiência Líquida anual (%)	11-16	7-20	12-25	12
Custo por W instalado (€/W)	4-6	4-6	9-11	3-4

Fonte: Adaptação - MOYA, 2013.

Com cerca de 3 GW de potência heliotérmica instalada operacional no mundo, há ainda 5,2 GW em construção ou em desenvolvimento [BURGI, 2013]. Entretanto, esta tecnologia necessita de incentivos políticos para alcançar competitividade comercial. Com os avanços tecnológicos ocorridos e a implantação de plantas maiores (100 - 250 MW) espera-se uma redução considerável no seu custo, podendo ser viável para competir com o carvão e o gás antes de 2020 [IRENA, 2013].

No Brasil, há uma iniciativa do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) e a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em investir em um projeto de pesquisa e desenvolvimento de uma planta-piloto, implantada em Petrolina-PE, de geração heliotérmica com potência nominal de 1 MW utilizando a tecnologia

cilindro parabólico, servindo como uma plataforma de pesquisa e desenvolvimento em energia solar no semiárido brasileiro. Em etapas futuras, o projeto visa acrescentar um sistema de armazenamento de energia e a introdução de outras tecnologias de concentração [CSP WORLD, 2015].

## 2.2 Rastreamento Solar

Visando obter um maior rendimento, nota-se a necessidade de realizar a correção do ângulo do espelho em relação ao ângulo solar. Para tanto, é indispensável que haja uma maneira de rastrear a posição do Sol. Hipóteses como, por exemplo, a utilização de sensores, foram levantadas com o intuito de verificar qual opção seria a mais viável. Os métodos de rastreamento podem ser divididos em: sistemas mecânicos ou sistemas eletrônicos, estes com uma maior confiabilidade e acuidade. Dentre os métodos de rastreamento eletrônico pode-se destacar:

- A medição da magnitude da iluminação solar;
- A avaliação do fluxo solar no receptor;
- Formulação matemática para o rastreamento virtual.

O rastreamento virtual dispensa o uso de sensores, operando a partir de um algoritmo matemático que, em função da data, hora e coordenadas de latitude e longitude de onde está localizada a planta, calcula a posição do Sol, sendo a opção considerada mais viável. Inicialmente, o mecanismo que irá realizar o rastreamento deve possuir uma confiabilidade situada dentro de um limite de acuidade com a intenção de rastrear a posição solar durante o decorrer do dia, mesmo em dias nublados intermitentes, devendo retornar à posição original ao fim do ciclo [KALOGIROU, 2009].

### 2.2.1 Hora solar aparente

Para utilizar o método de rastreamento solar virtual, empregou-se os cálculos descritos por [KALOGIROU, 2009]. Para tanto, deve-se primeiro calcular a hora solar aparente (*Apparent solar Time – AST*), empregada para expressar a hora do dia baseado no movimento angular aparente do Sol. O

cálculo da AST é importante pois a hora que o Sol cruza o meridiano do observador é o meio-dia solar que é comum não coincidir com às 12 horas do relógio, que utiliza a hora local padrão (*Local Standard Time* – LST). Para converter o LST em AST deve-se realizar o cálculo da equação do tempo (ET) e a correção longitudinal

Devido à órbita descrita pela Terra ao redor do Sol, a velocidade orbital da Terra varia ao decorrer do ano, fazendo com que o AST tenha uma ligeira variação do tempo médio mantido por um relógio rodando a uma taxa uniforme, fazendo com que a duração dos dias não seja constante durante o ano. Esta variação é chamada de equação do tempo, uma função do dia do ano (N) e pode ser aproximado por:

$$ET = 9,87 \cdot \text{sen}(2B) - 7,53 \cdot \text{cos}(B) - 1,5 \cdot \text{sen}(B) \quad [\text{min}] \quad (2.1)$$

$$B = (N - 81) \frac{360}{364} \quad (2.2)$$

A correção longitudinal visa ajustar o erro de longitude ocorrido dentro de um meridiano. Considerando que o Sol leva 4 minutos para percorrer 1 grau, o termo de correção longitudinal será:

$$4x(SL - LL) \quad (2.3)$$

onde SL é a longitude padrão (*standard longitude*) da região (meridiano) e LL é a longitude local (*local longitude*). Considerando que o horário de verão (*daylight saving* – DS) pode acrescentar ou não 60 minutos em certas épocas do ano, a hora solar aparente pode ser apresentada como:

$$AST = LST + ET \pm 4(SL - LL) - DS \quad (2.4)$$

onde atribui-se o sinal - para regiões situadas a leste do meridiano de Greenwich, e o sinal + para regiões situadas a oeste.

### 2.2.2 Ângulos Solares

No entendimento de Ptolomeu [KALOGIROU, 2009], o Sol possui dois graus de liberdade, portanto sua posição para um observador na Terra pode ser totalmente descrita com apenas o uso de dois ângulos astronômicos: a altitude solar ( $\alpha$ ) e o azimute solar ( $z$ ). Para tanto, deve-se definir o ângulo de declinação solar ( $\delta$ ) e o ângulo horário ( $h$ ) com o intuito de serem utilizados

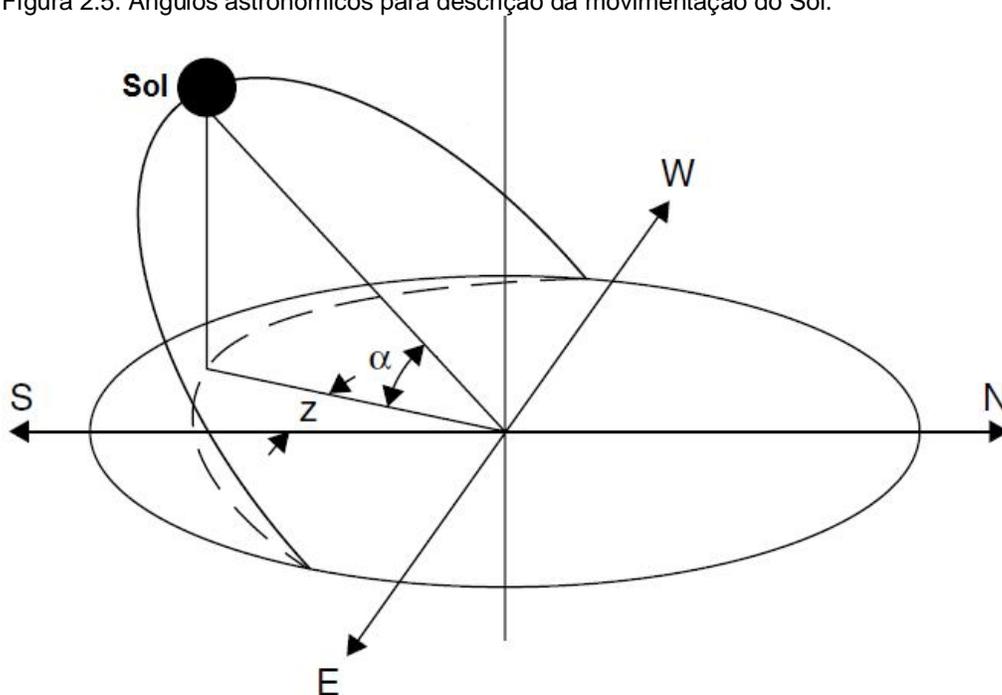
posteriormente. Os ângulos  $\alpha$  e  $z$  que descrevem a movimentação do Sol estão ilustrados na Figura 2.5 com o intuito de serem melhor identificados.

A declinação solar é a medida da distância angular entre a linha que liga o centro da terra ao Sol e a projeção dessa linha em relação ao plano equatorial, variando de acordo com a equação (2.5),

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left[ \frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (2.5)$$

onde  $N$  representa o dia do ano. Pode-se considerar constante para fins de cálculo a declinação solar durante o decorrer do dia.

Figura 2.5: Ângulos astronômicos para descrição da movimentação do Sol.



Fonte: Adaptação - KALOGIROU, 2009.

O ângulo horário é definido como sendo o ângulo medido sobre o equador, com origem no meridiano local e extremidade no meridiano do Sol, fazendo com que ao meio dia solar o ângulo horário seja de  $0^\circ$ . Este pode ser definido como:

$$h = 15(AST - 12) \quad (2.6)$$

O ângulo de altitude solar é o ângulo compreendido entre os raios de Sol e o plano horizontal, sendo portanto complementar ao ângulo zênite.

Assumindo  $L$  como sendo a latitude local expresso como o ângulo entre o plano equatorial e a linha do centro da Terra ao ponto de interesse, pode-se apresentar o ângulo de altitude como sendo:

$$\alpha = \arcsen[\sen(L)\sen(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h)] \quad (2.7)$$

Finalmente, tem-se o ângulo azimutal que é aquele medido no sentido horário, com origem no norte ou sul geográfico e extremidade na projeção sobre o horizonte do raio Solar, sendo expresso por:

$$z = \arcsen\left[\frac{\cos(\delta)\sen(h)}{\cos(\alpha)}\right] \quad (2.8)$$

A equação (2.8) é correta se  $\cos(h) > \tan(\delta)\tan(L)$ . Caso contrário:

$$z = -\pi + \left| \arcsen\left[\frac{\cos(\delta)\sen(h)}{\cos(\alpha)}\right] \right| \quad (2.9)$$

relativo às horas matinais, ou:

$$z = \pi - \arcsen\left[\frac{\cos(\delta)\sen(h)}{\cos(\alpha)}\right] \quad (2.10)$$

em relação as horas posteriores ao meio dia.

Inicialmente tentou-se realizar o posicionamento do espelho utilizando apenas o ângulo azimutal, devido à proximidade do local onde foi instalado o protótipo da usina solar com a linha do equador, fazendo com que a variação do ângulo de altitude seja pequena. Contudo a utilização deste posicionamento inviabilizou o sistema, uma vez que faz-se necessário um ângulo perpendicular ao eixo Norte-Sul.

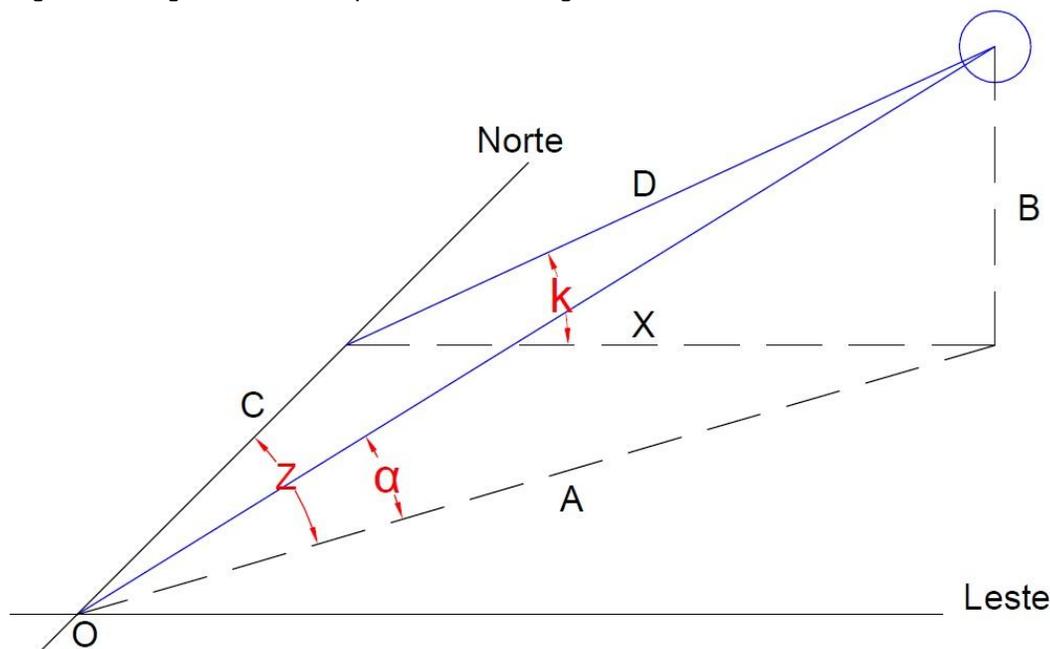
Devido ao espelho do projeto possuir apenas um grau de liberdade, a linha de espelho foi posicionada no sentido Norte-Sul, deixando a liberdade de movimento no sentido Leste-Oeste e diminuindo, assim, a influência da altitude solar, devido ao grande comprimento de cada linha de espelhos que compõe o concentrador real.

### 2.2.3 Ângulo para o rastreamento do Sol

A partir do item 2.2.2 encontram-se os principais ângulos que podem posicionar corretamente o Sol, deve-se encontrar o ângulo ( $k$ ) imprescindível

para utilizar no posicionamento da linha de espelho, que é definido como o ângulo entre um eixo paralelo à linha Leste-Oeste e os raios solares, fazendo-se necessário a realização de algumas operações, tomando como base as representações ilustradas na Figura 2.6.

Figura 2.6: Ângulos e medidas para cálculo do ângulo  $k$ .



Fonte: Elaboração própria.

A partir da Figura 2.6, obtém-se as outras medidas em função de  $X$  e utilizando-se algumas relações trigonométricas, é possível calcular as medidas dos segmentos  $A$ ,  $B$  e  $C$ , como descritas nas equações (2.11) a (2.13).

$$A = X \cdot \cos(h) \quad (2.11)$$

$$B = X \cdot \sin(h) \quad (2.12)$$

$$C = X \cdot \cos(h) \cdot \cos(Z) \quad (2.13)$$

Para encontrar a medida do segmento  $D$ , Figura 2.6, utiliza-se o teorema de Pitágoras, dado por:

$$X^2 = C^2 + D^2$$

$$D = \sqrt{X^2 - X^2 \cdot \cos^2(h) \cdot \cos^2(Z)}$$

$$D = X \cdot \sqrt{1 - \cos^2(h) \cdot \cos^2(Z)} \quad (2.14)$$

Desta forma, encontra-se o ângulo desejado utilizando-se a definição do seno de um ângulo (Figura 2.6), resultando em:

$$\begin{aligned} \operatorname{sen}(k) &= \frac{B}{D} = \frac{X \cdot \operatorname{sen}(h)}{X \cdot \sqrt{1 - \cos(h)^2 \cdot \cos(Z)^2}} = \frac{\operatorname{sen}(h)}{\sqrt{1 - \cos(h)^2 \cdot \cos(Z)^2}} \\ k &= \operatorname{arcsen}\left(\frac{\operatorname{sen}(h)}{\sqrt{1 - \cos(h)^2 \cdot \cos(Z)^2}}\right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

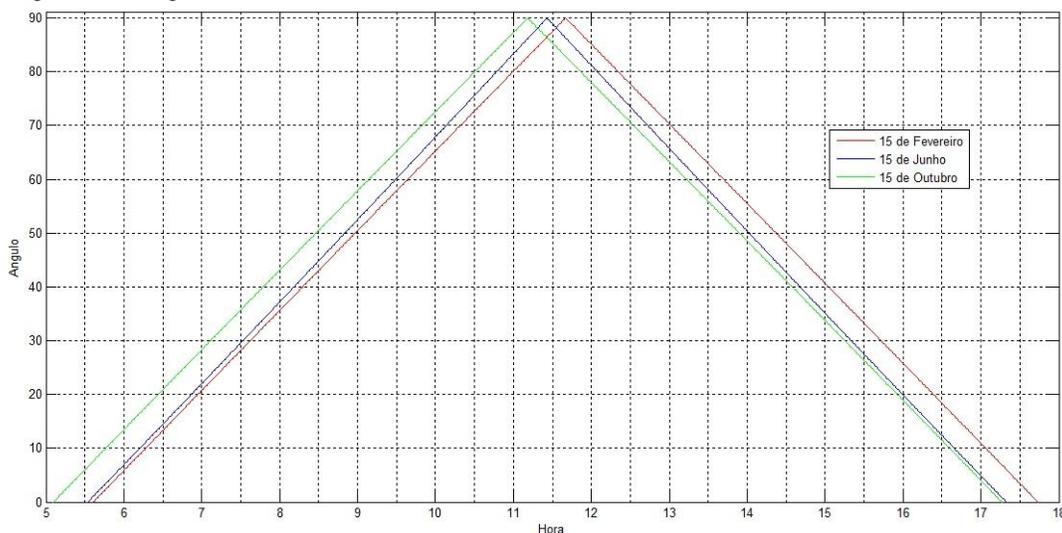
Após a implementação da equação (2.15) e com ajuda do *software MatLab*, utilizando-se como local para medição o Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará em Fortaleza, calculou-se o ângulo  $k$  em relação às horas dos dias 15/02, 15/06 e 15/10 de 2014, resultando no gráfico apresentado na Figura 2.7, com os valores aproximados de nascer, pico e pôr do Sol expressos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Valores notáveis da posição do Sol calculados.

Características	Nascer do Sol	Pico do Sol	Pôr do Sol
15/02/2014	5h36min	11h40min	17h43min
15/06/2014	5h32min	11h26min	17h19min
15/10/2014	5h07min	11h11min	17h16min

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 2.7: Ângulo  $k$  no decorrer do dia.

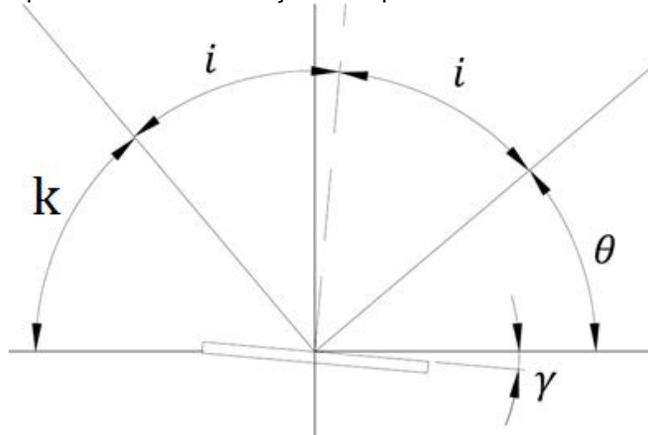


Fonte: Elaboração própria.

#### 2.2.4 Posicionamento da Linha de Espelho

Para posicionar o espelho de maneira a conseguir refletir os raios solares para o absorvedor se deve, primeiramente, saber qual o ângulo entre a horizontal e a linha que passa pelo espelho e o absorvedor, chamado de ângulo  $\theta$ . O ângulo  $k$ , como mostrado anteriormente, é o ângulo entre a horizontal e os raios do Sol. Considerando  $i$  como sendo o ângulo solar incidente e  $\gamma$  como a inclinação que o espelho deve possuir, observa-se a disposição desses ângulos na Figura 2.8, de modo a possibilitar a visualização da melhor maneira de calcular o ângulo  $\gamma$ .

Figura 2.8: Ângulos para cálculo da inclinação do espelho.



Fonte: Elaboração própria.

A partir da Figura 2.5 pode-se encontrar o ângulo  $i$ , esboçado pela equação (2.16).

$$i = \frac{180 - (k + \theta)}{2} \quad (2.16)$$

De maneira similar, infere-se que o ângulo  $\gamma$  pode ser facilmente descrito pela equação (2.17).

$$\gamma = 90 - (\theta + i) = (k + i) - 90 \quad (2.17)$$

Para o cálculo da inclinação do espelho, realiza-se a substituição da equação (2.16) na equação (2.17), originando a equação (2.18).

$$\gamma = 90 - \left[ \theta + \frac{180 - (k + \theta)}{2} \right]$$

$$\gamma = \frac{\theta - k}{2} \quad (2.18)$$

A partir da equação (2.18) conclui-se que o ângulo de posicionamento do espelho sofre influência somente do ângulo de posição do Sol, previamente calculado, e do ângulo de localização do absorvedor relativo à linha de espelho, simples de ser mensurado na prática.

### **3 CONTROLADORES E MICROCONTROLADORES**

#### **3.1 Controladores**

##### *3.1.1 Considerações Iniciais*

O controle dos sistemas físicos constitui parte importante na combinação de elementos que atuam interconectados visando realizar algum objetivo, através da operação ou desenvolvimento natural, com evolução progressiva e continuada, caracterizando-se por uma cadeia de transformações graduais, objetivando-se um resultado particular. O controle automático tem desempenhado um papel importante no avanço da engenharia e da ciência [OGATA, 2010].

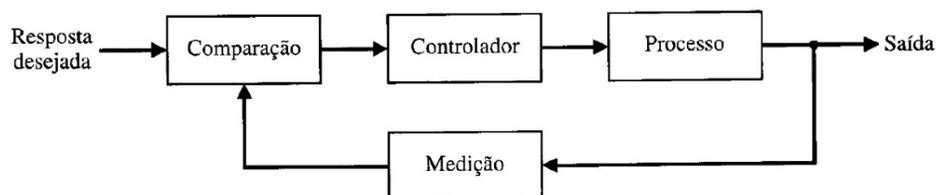
O objetivo de utilizar um controlador é essencialmente receber o sinal proveniente da variável controlada e compará-la com o sinal de referência

visando gerar um sinal de controle que deverá fazer com que a saída se aproxime cada vez mais do valor desejado.

Na prática, a realização de um projeto de controle exige um esforço periódico, realizando iterações entre a modelagem, o projeto em si, a simulação, os testes e a implementação, onde cada projeto tem sua singularidade, necessitando de abordagens diferenciadas. O sucesso no campo da engenharia de controle é dependente do fato de se posicionar sobre um ponto de vista holístico, ou seja, encarar que as propriedades de um sistema não podem ser explicadas apenas pela soma de seus componentes [GOODWIN, 2000].

O fenômeno da realimentação (Figura 3.1), ou *feedback*, existe tanto na natureza quanto na tecnologia. Como exemplo da sua atuação no meio ambiente pode-se citar a variação quantitativa da população de certa espécie, em decorrência da maior ou menor presença de seu predador. Em todos os casos, a realimentação pode ser vista como um impacto no comportamento dos sistemas envolvidos [GOODWIN, 2000].

Figura 3.1: Diagrama de blocos de um sistema genérico com realimentação.



Fonte: DORF, BISHOP, 2001.

Para caracterizar um controlador há necessidade de conceituar alguns termos amplamente utilizados. Inicialmente, tem-se a etapa do processo em que a saída busca atingir o seu valor final, chamado de fase transiente ou transitória, muito utilizado como avaliação de performance. O controle por histerese é a tendência do sistema de conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou. Outros parâmetros de avaliação que se pode citar são: tempo de acomodação, como o tempo em que dura a fase

transiente; tempo de subida, sendo o intervalo necessário para que a saída parta de 0% e atinja 100% do valor de referência; sensibilidade, caracterizada por mudanças no sistema quando há alguma alteração nos seus parâmetros; estabilidade, apontado como a capacidade da saída convergir para algum ponto para uma certa entrada; sobressinal ou *overshoot*, como o máximo valor atingido pela saída, ocorrido ainda no estado transitório; e por fim, a capacidade de rejeitar ruídos provenientes de perturbações.

Dentre os controladores mais utilizados na área de controle de processos, encontra-se o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), juntamente com o do tipo On/Off. Há também os controladores adaptativos, que ajustam-se automaticamente às mudanças de parâmetros dos sistemas controlados, podendo se comportar eficientemente mesmo na presença de não-linearidades ou incertezas nos parâmetros dos modelos utilizados no projeto.

### 3.1.2 Controlador On/Off

Sendo um dos tipos de controlador mais simples que existe, tem sua operação fundamentada no funcionamento do relé. Compara-se o sinal da variável controlada com sinais de referência, anteriormente definidos e chamados de limites superior e inferior.

Basicamente o elemento atuante do controlador possui apenas duas posições: ligado (On) ou desligado (Off), e atua de modo a oscilar, ligando ou desligando, entre os limites e em torno do ponto desejado, sendo incapaz de estabilizar a variável controlada exatamente no objetivo, ocasionando um dos maiores problemas na utilização deste tipo de controle.

Este tipo de controlador possui baixa complexidade quando comparado a outros tipos de controladores. A atuação do controlador On/Off ocorre somente até os limites serem atingidos. Contudo, é amplamente empregado em sistemas de controles simples, tanto na indústria, quanto em residências.

### 3.1.3 Controlador PID

Os controladores PID, surgidos na década de 30, foram inicialmente implementados através de dispositivos pneumáticos. Com o advento dos semicondutores passaram a ser implementados em *hardware* analógico. A evolução da tecnologia digital permitiu o aparecimento dos controladores PID digitais e de sistemas de controle digital distribuído, cujo módulo básico de controle é o controlador PID. Dentre as suas características podem ser destacadas a simplicidade, baixo custo e o fato de que, quando sintonizado adequadamente, proporciona um desempenho satisfatório. O PID é a estrutura mais utilizada, onde 90% - 95% de todos os problemas de controle podem ser resolvidos por este tipo de controlador, existindo diversas estruturas do controlador PID que podem ser aplicadas objetivando o melhor desempenho do sistema.

Existe um grande interesse em controladores PID devido às técnicas de sintonia automática (*auto-tuning*), geração automática dos escalonamentos dos ganhos (*gain scheduling*) e adaptação contínua (*self-tuning*). Para o sistema proposto neste trabalho utiliza-se um controlador por escalonamento de ganhos implementado digitalmente. Com isso, percebe-se que o PID é um controlador com grande versatilidade, o que garante sua relevância e popularidade [GOODWIN, 2000].

As estruturas de implementação do PID podem ser classificadas em relação ao tipo de interação entre as ações P, I e D, onde a interatividade pode ser definida pela interferência do tempo integral no tempo derivativo ou vice-versa. A estrutura ideal é definida como não-interativa e a estrutura série como interativa. Outra forma de classificação é pela distribuição das ações P, I e D na malha de controle, como PI+D ou I+PD.

A ação proporcional do controlador PID consiste no sinal de controle ( $u_{(t)}$ ) aplicado a cada instante à planta ser proporcional à amplitude do valor do sinal ( $e_{(t)}$ ) de erro como assinalado na equação (3.1).

$$u_{(t)} = K_p e_{(t)} \quad (3.1)$$

Portanto o sinal de controle depende do valor instantâneo do erro de controle, caracterizado pela diferença entre o sinal de entrada e a saída do sistema, variando dentro da banda proporcional (BP), definida pela equação (3.2).

$$BP[\%] = \frac{100[\%]}{k_p} \quad (3.2)$$

onde  $K_p$  é o ganho proporcional. Com isso, quanto menor for a banda proporcional, maior será a atuação da ação de controle proporcional.

A ação proporcional funciona basicamente como um amplificador e pode controlar qualquer planta estável, mas fornece um desempenho limitado e possíveis erros no estado estacionário. Isso ocorre devido a diminuição do sinal de erro e conseqüente atenuação proporcional da saída do controlador, gerando, em algum momento, uma diferença entre a saída e o sinal desejado por não conseguir produzir uma saída capaz de ativar o atuador. Aumentando-se o ganho do controlador, o erro diminuirá, porém um grande acréscimo ao ganho poderá levar a instabilidade do sistema [GOODWIN, 2000].

Já a ação integral é baseada na aplicação de um sinal de controle proporcional à integral do sinal ( $e_{(t)}$ ), representado na equação (3.3).

$$u_{(t)} = \frac{1}{T_i} \int e_{(t)} dt \quad (3.3)$$

onde  $T_i$  é chamado de tempo integral.

A ação integral age de forma a fazer com que o erro de regime permanente seja zerado. Isso ocorre devido ao integrador somar as saídas, mesmo que o erro seja pequeno, resultando em algum momento um estímulo que acione o atuador. O aumento do ganho integral ( $K_i = 1/T_i$ ) pode ser prejudicial ao sistema, tornando-o lento e até afetando a sua estabilidade. Também pode despertar um efeito indesejável, quando há saturação do atuador, conhecido como *windup* [GOODWIN, 2000].

A ação derivativa corresponde à aplicação de um sinal de controle proporcional a derivada do sinal de erro, equação (3.4).

$$u_{(t)} = T_d \frac{de_{(t)}}{dt} \quad (3.4)$$

onde  $T_d$  é denominado de tempo derivativo.

Atuando proporcionalmente na taxa de variação do erro de controle, a ação derivativa é um modo rápido para mitigar ou minimizar a variação dos erros. Portanto, caso o processo seja estável, seu efeito será nulo. Pode ser caracterizado como antecipatória ou preditiva devido a sua dependência em relação à evolução do erro, fazendo com que o sistema reaja mais rapidamente.

Uma limitação deste tipo de ação é a sua sensibilidade a ruídos de alta frequência. De maneira geral permite que o sistema atue mais rápido e reduz a máxima sobrelevação, não tendo influência sobre o erro de regime.

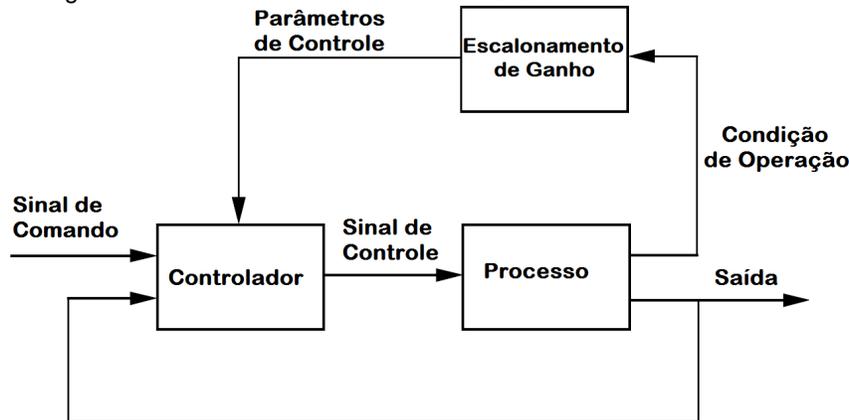
#### 3.1.4 Escalonamento de Ganhos

O conceito de escalonamento de ganhos teve origem nos anos 50 na conexão com o desenvolvimento dos sistemas de controle de voo.

Em vários casos é possível encontrar variáveis auxiliares mensuráveis e correlacionáveis com as alterações dinâmicas da planta, descrevendo bem as características do comportamento do sistema, assim como suas perturbações. O uso destas variáveis é chamado de escalonamento de ganho, pois o sistema analisa as condições de operação e modifica os parâmetros de controle, fazendo com que o controlador compense as mudanças no processo, partindo do pressuposto que caso as variáveis possam ser medidas, então podem ser utilizadas para modificar os parâmetros do controlador. Esta abordagem tem essa denominação devido ser originalmente utilizado para acomodar mudanças no ganho do processo.

No diagrama de bloco de um sistema com escalonamento de ganho, Figura 3.2, nota-se um laço para os ajustes dos parâmetros de controle e outro composto pelo controlador e pelo processo. O escalonamento de ganho pode ser considerado como um mapeamento dos parâmetros do processo para os parâmetros do controlador [ASTRÖM; WITTENMARK, 1995].

Figura 3.2: Diagrama de blocos de um sistema com Escalonamento de Ganho.



Fonte: Adaptação - ASTRÖM; WITTENMARK, 1995.

O principal problema no desenvolvimento de sistemas com escalonamento de ganho deve-se a necessidade de encontrar variáveis de escalonamento apropriadas, que caracterizam as condições de operação. Também pode representar um expressivo esforço por parte da engenharia de processo para determinar qual o escalonamento próprio, podendo ser reduzido caso haja a utilização de técnicas como a sintonia automática, visto que podem ser determinados experimentalmente.

Após a escolha da variável a ser utilizada, deve-se definir um número distinto de pontos de operação, assim como seus respectivos parâmetros de controle, gerando assim uma tabela que deve ser armazenada para poder ser consultada posteriormente.

O escalonamento de ganho é uma boa maneira de compensar não linearidades conhecidas, podendo reagir de forma rápida a mudanças de condições. Um inconveniente oriundo do uso desta técnica é o fato dos parâmetros do controlador somente serem alterados de forma pré-programada, previamente a sua utilização, dificultando seu uso em processos com distúrbios ou condições operacionais que não foram consideradas no projeto [ASTRÖM; WITTENMARK, 1995].

A técnica de controle por escalonamento de ganho foi a escolhida para o emprego no sistema desenvolvido, devido a facilidade na sua implementação em consequência da intuitiva localização das variáveis necessárias para análise, possuindo parâmetros, como o tempo de resposta e o erro, compatíveis com a demanda do sistema.

No presente projeto, para que fosse implementado o controlador, a escolha da variável para manipulação foi o tempo de acionamento do motor que realiza o deslocamento da linha de espelho, utilizando um valor proporcional ao tempo de processamento da rotina de movimentação do motor, medido em centésimos de ms. Com isso se elaborou uma tabela (Tabela 3.1) contendo possíveis intervalos, valores e condições de funcionamento do sistema. Os dados que alimentam a Tabela 3.1 foram obtidos experimentalmente, a partir de simulações de possíveis circunstâncias encontradas no funcionamento do sistema.

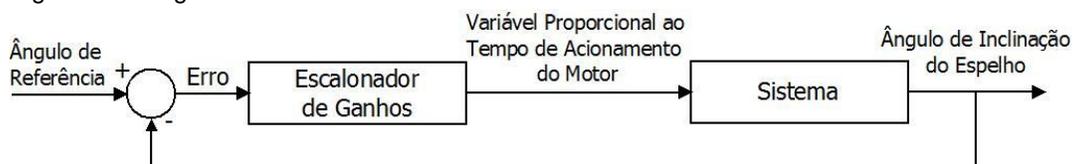
Tabela 3.1: Tabela para o Escalonamento de Ganho.

Variável Proporcional ao Tempo de acionamento do motor	Erro do ângulo de inclinação da linha de espelho
1150	Menor que $0,5^\circ$ ou maior que $-0,5^\circ$ e diferente de $0^\circ$
2000	Entre $0,5^\circ$ e $1^\circ$ ou entre $-1^\circ$ e $-0,5^\circ$
3500	Entre $1^\circ$ e $2,5^\circ$ ou entre $-2,5^\circ$ e $-1^\circ$
5500	Entre $2,5^\circ$ e $5^\circ$ ou entre $-5^\circ$ e $-2,5^\circ$
12000	Entre $5^\circ$ e $15^\circ$ ou entre $-15^\circ$ e $-5^\circ$
30000	Maior que $15^\circ$ ou menor que $-15^\circ$

Fonte: Elaboração própria.

O dado selecionado que serve de parâmetro para modificação do tempo de acionamento do motor é o erro do ângulo de inclinação da linha de espelho, obtido a partir da diferença entre o ângulo calculado pela aplicação e o ângulo em que o espelho está em certo momento; ou seja, uma realimentação negativa do ângulo em questão. Quando o erro angular da inclinação da linha de espelho for igual a 0, o sistema encerra a rotina de rastreamento. A Figura 3.3 exibe o diagrama de blocos do controlador desenvolvido.

Figura 3.3: Diagrama de blocos do controlador desenvolvido.

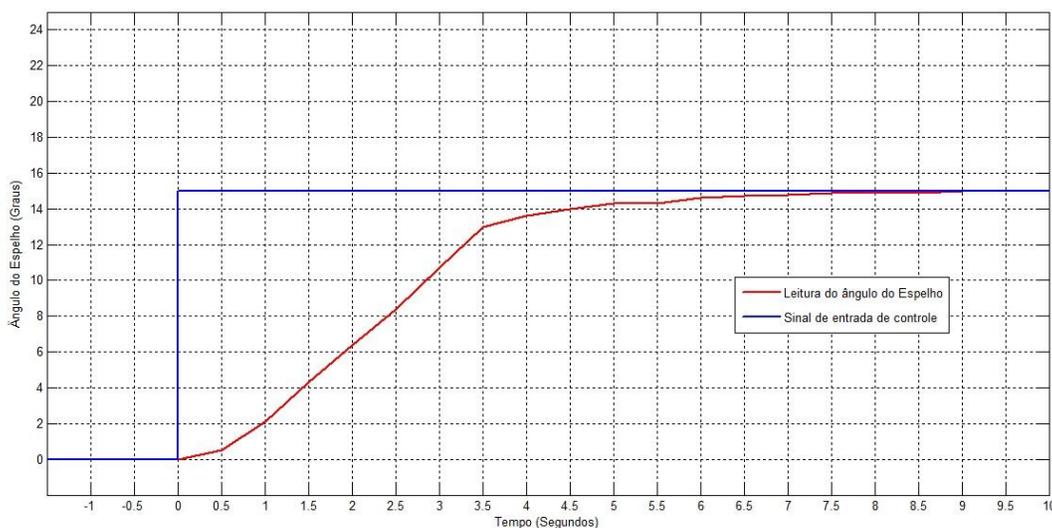


Fonte: Elaboração própria.

Dependendo da magnitude desta diferença, a constante proporcional ao tempo de acionamento do motor é regulada para um valor apropriado à situação do sistema naquele instante.

O resultado final da resposta degrau onde o sistema se encontra com o espelho inclinado a  $0^\circ$ , sendo enviado um ângulo de referência de  $15^\circ$ , onde o controle implementado pode ser observado na Figura 3.4.

Figura 3.4: Relação entre o ângulo do espelho e o tempo do controlador implementado.



Fonte: Elaboração própria.

A curva pode ser justificada devido uso da tabela que informa que quanto maior o erro, maior será a inclinação da curva. O controle exercido não necessita de grande velocidade para sua estabilização, uma vez que o sensor de posição indutivo utilizado possui um grande tempo de resposta.

## 3.2 Microcontroladores

### 3.2.1 Introdução

Um microprocessador, utilizado para a realização de processamentos complexos, pode ser caracterizado como um *chip*, com alta integração de componentes, que necessita de memórias RAM e EEPROM externas, disco para armazenamento de programas, além de outros periféricos. Portanto, para que possa ser usado, outros componentes devem ser adicionados, não sendo capaz, por si só, de se comunicar com o ambiente externo.

Por outro lado o microcontrolador é um sistema mais completo, onde conglobera internamente alguns elementos como uma unidade de processamento central (CPU) e memórias RAM ou EEPROM, além de pinos de entrada e saída (I/O), osciladores, interface serial, módulos de temporização e conversores analógicos/digitais (A/D), todos em um mesmo *chip*, tornando o microcontrolador um sistema mais completo, economizando tempo e espaço. Em contrapartida, normalmente possuem menores desempenhos que um microprocessador.

O microcontrolador PIC (*Peripheral Interface Controller*), produzido pela empresa Microchip Technology Inc. é um dos microcontroladores mais utilizados por possuir uma boa diversidade de recursos e flexibilidade de aplicações, com um custo acessível.

Pretende-se no presente capítulo apresentar alguns aspectos da estrutura interna, como sua arquitetura, e dos periféricos utilizados, como as interrupções e protocolos de comunicação, do microcontrolador PIC16F884, principal dispositivo empregado para a realização da automação e controle do sistema proposto.

### 3.2.2 *Arquitetura dos Microcontroladores*

Os microcontroladores podem possuir basicamente dois tipos de arquitetura assim como dois tipos de filosofias (RISC e CISC).

A filosofia de arquitetura RISC (*Reduced Instruction Set Computer*), Conjunto Reduzido de Instruções, faz com que o microcontrolador implemente suas funcionalidades utilizando um conjunto com algumas poucas instruções básicas, combinadas de acordo com a necessidade. Com a baixa quantidade de instruções simples, que podem ser executadas em apenas um ciclo do relógio, esta arquitetura torna o microcontrolador mais ágil. Suas instruções são executadas diretamente pelo *hardware*.

Em oposição à filosofia RISC, a CISC (*Complex Instruction Set Computer*), Conjunto de Instruções Complexo, utiliza uma grande quantidade de instruções, tornando-os mais poderosos, porém mais vagarosos por necessitarem alguns ciclos do relógio para poderem executar uma instrução.

No que diz respeito às arquiteturas propriamente ditas separa-se em Von Neumann e Harvard. A primeira tem como uma das suas principais características o fato de uma instrução somente ser executada após a conclusão da instrução anterior, ou seja, só se processa uma informação por vez. Isso ocorre devido existir somente um barramento interno para processar as instruções e os dados. Diferentemente da arquitetura Von Neumann, a Harvard possui dois barramentos internos, separados e independentes, um para processar instruções e outro para os dados. Enquanto uma instrução é executada outra pode ser “buscada” na memória de forma sucessiva, tornando o processamento mais rápido, por acessar os barramentos simultaneamente. É a tecnologia mais utilizada em microcontroladores.

### 3.2.3 PIC16F884

O microcontrolador PIC, fabricado pela Microchip, utiliza a arquitetura e filosofia RISC e Harvard nos seus chips, tendo como foco a velocidade de processamento. Todos os dados referentes a caracterização do microcontrolador pode ser encontrada em seu *DataSheet* [MICROCHIP, 2007].

O PIC16F884 é composto por 40 ou 44 pinos e possui apenas 35 instruções para aprender, todas de ciclo único. Como algumas características especiais da família de microcontroladores pode-se destacar a faixa de tensão de funcionamento, que varia de 2 a 5,5 Volts e a calibração do oscilador interno, realizada pela fábrica em  $\pm 1\%$ .

Uma das vantagens de se utilizar o microcontrolador PIC16F884, deve-se ao fato desse dispositivo ser de fácil acesso e com preços atrativos. Apesar de compatível pino a pino com outros PICs de séries superiores, como o PIC18F452, por exemplo, não há necessidade devido à relativa simplicidade do projeto, não requisitando um dispositivo mais rápido ou com mais memória.

Alguns aspectos adicionais, assim como algumas características do microcontrolador PIC16F884 podem ser obtidos a partir do Anexo A.

### 3.2.4 Periféricos do microcontrolador usados no projeto

Para o desenvolvimento do presente projeto utilizou-se algumas funcionalidades contempladas pelo próprio microcontrolador, como a parte de temporização, leitura de sensores e de comunicação, de grande necessidade para o sistema. Estas são apresentadas a seguir.

#### 3.2.4.1 Timer0

O módulo Timer0 pode funcionar como um temporizador ou como um contador, ambos com 8 bits. No modo temporizador, seu funcionamento se dá realizando um incremento a cada ciclo de instruções. Diferentemente, no modo contador há um incremento a cada subida ou descida do pino T0CKI [MICROCHIP,2007]. No presente sistema, configurado para ter uma frequência de oscilação de 8 Mhz, selecionou-se o modo temporizador, com *clock* interno igual a  $F_{osc}/4$  e o *prescaler* configurado em 1:2, obtendo-se a frequência pela substituição dos valores na equação (3.5).

$$f = \frac{\left( \frac{F_{osc}/4}{Prescaler} \right)}{192} \quad (3.5)$$

#### 3.2.4.2 Conversor A/D

O processo de conversão analógico para digital dá-se basicamente pela realização da amostragem do sinal em intervalos de tempos fixos e sua posterior quantização.

O módulo de conversão analógico/digital do PIC16F884 permite converter uma entrada analógica, ou contínua, utilizando a multiplexação do sinal de entrada em um circuito “*sample and hold*” (Amostrar e reter). A saída do “*sample and hold*” é conectada a entrada do conversor que gera o número binário de 10 bits através de aproximações sucessivas e armazena o resultado nos devidos registradores. A tensão de referência pode ser selecionada por *software* tanto para o  $V_{DD}$  quanto para uma referência externa. Pode haver uma interrupção após o fim da conversão. Vale frisar que a impedância máxima recomendada da fonte de sinal analógico é de 10 Kohms [MICROCHIP,2007].

A conversão necessária no projeto é relacionada com a necessidade de ler a informação enviada pelo sensor de temperatura (LM35). Para tanto posicionou-se a saída do sensor no canal 0 de conversão do microcontrolador e adotou-se o *clock* de conversão como sendo  $F_{OSC}/32$  e as tensões de referência positiva e negativa como sendo o  $V_{DD}$  e o  $V_{SS}$ , respectivamente.

### 3.2.4.3 EUSART

O módulo EUSART é um periférico de comunicação I/O que contém todos os geradores de *clock*, registradores de deslocamento e *buffers* de dados para promover a troca de dados. Conhecido também como Interface de Comunicação Serial (SCI – *Serial Communications Interface*), pode ser configurado como *full-duplex* assíncrono, indicado para comunicações com sistemas periféricos como um computador, ou *half-duplex* síncrono, útil para comunicações com dispositivos periféricos como conversores A/D, EEPROMs ou outros microcontroladores, pois não possuem um *clock* interno para poder gerar a taxa de transmissão [MICROCHIP, 2007].

A comunicação necessária para o sistema proposto é entre o microcontrolador e o computador, utilizando-se a comunicação assíncrona. Para uma transmissão com taxa de 9600 bps e utilizando um cristal de 12 Mhz, adotou-se uma configuração de modo que o cálculo de transmissão seja o apresentado na equação (3.6).

$$\text{Taxa de Transmissão} = \frac{F_{OSC}}{(N + 1).16} \quad (3.6)$$

onde, adotando-se 77 como valor de  $N$  obtêm-se um erro de aproximadamente 0,16% da taxa, indicando uma baixa probabilidade de erro na transmissão dos dados.

### 3.2.4.4 EEPROM

Este microcontrolador possui 256 bytes de espaço para armazenamento na memória EEPROM com uma faixa de endereços compreendidos entre a posição 0h até a 0FFFh, possuindo 4096 palavras de programação. Os dados podem ser escritos ou lidos durante a operação

normal. Essas memórias são endereçadas indiretamente através dos registradores de função especial. Possui alta resistência, podendo durar até 1.000.000 de gravações além de poder reter uma informação por mais de 40 anos [MICROCHIP,2007].

A necessidade de um armazenamento duradouro é oriunda da calibragem do sensor de posição utilizado, onde após o processo de calibração os valores configurados devem ser armazenados em uma memória não-volátil caso haja desligamento do sistema.

## **4 SENSOR DE POSIÇÃO INDUTIVO**

### **4.1 Introdução**

A procura de uma maior flexibilidade e conseqüente automação dos sistemas leva a busca de sensores que detectem elementos variáveis físicos ou eletroquímicos de modo a aumentar o controle exercido sobre o sistema. Sem a utilização de sensores não é possível a realização de uma automação proativa. Em geral, existe um alto nível de exigência no processamento de informação, podendo-se ligar o sensor ao microcomputador [REININGER et al., 2006].

Como conceitos básicos sobre sensores, pode-se definir como precisão de um instrumento o grau de concordância entre indicações ou valores medidos obtidos por medições repetidas sob condições especificadas [INMETRO, 2012]. A resolução é caracterizada como a menor variação da grandeza medida que causa uma variação perceptível na indicação correspondente. A repetitividade é a obtenção da mesma leitura do sensor para entradas iguais. Esses conceitos são imprescindíveis para a melhor caracterização de um sensor [WONG, 1995].

Um sensor pode ser classificado como um dispositivo projetado para detectar algum evento ou estímulo físico ou químico e emitir uma resposta de maneira específica e mensurável. Os sensores indutivos são baseados na variação da permeabilidade magnética do meio, isto é, têm a capacidade de detectar a presença e a aproximação de materiais condutores de energia elétrica de natureza metálica. Sua operação não exige contato, sendo insensíveis à vibração, pó ou corrosão, detectando todos os metais. Portanto, através da incidência de um campo eletromagnético oscilante sobre o espaço, torna-se possível realizar a detecção necessária. Um sensor de posição caracteriza-se por reportar a posição física de um objeto com respeito a um ponto de referência, podendo ser linear ou angular.

Dentre os sensores de posição mais conhecidos, pode-se citar os *encoders*, os LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) e os potenciômetros. Estes últimos geralmente têm implementação mais simples e possuem custo inferior aos demais. Porém, dependem do contato mecânico o que gera baixa repetitividade e grande histerese, além de tender a se desgastar com o tempo. Sua confiabilidade pode ser comprometida em condições adversas, como em contato com água. O LVDT gera um diferencial de tensão a partir da indutância mútua, tendo como características sua versatilidade, robustez e confiabilidade. Por não manter contato entre suas partes têm maior solidez, repetitividade, durabilidade e resolução. Há uma tendência desse tipo de sensor possuir um custo mais elevado que os demais aqui analisados. Já os sensores do tipo *encoders* absolutos ou incrementais possuem alta precisão e requerem um circuito complexo para fornecer as medidas de posição, além de apresentar uma elevada sensibilidade aos ruídos, à vibração e à temperatura [WEBSTER,1999].

Avanços na área de desenvolvimento de sensores estão em foco como apresentado em [GOLBY, 2010], buscando melhorias e inovações, tornando sistemas mais inteligentes e práticos, sendo sua arquitetura e recursos importantes para o desenvolvimento de projetos de automação e controle.

Várias aplicações críticas que necessitam de uma detecção de posição linear envolvem ambientes hostis, como em aceleradores de partículas

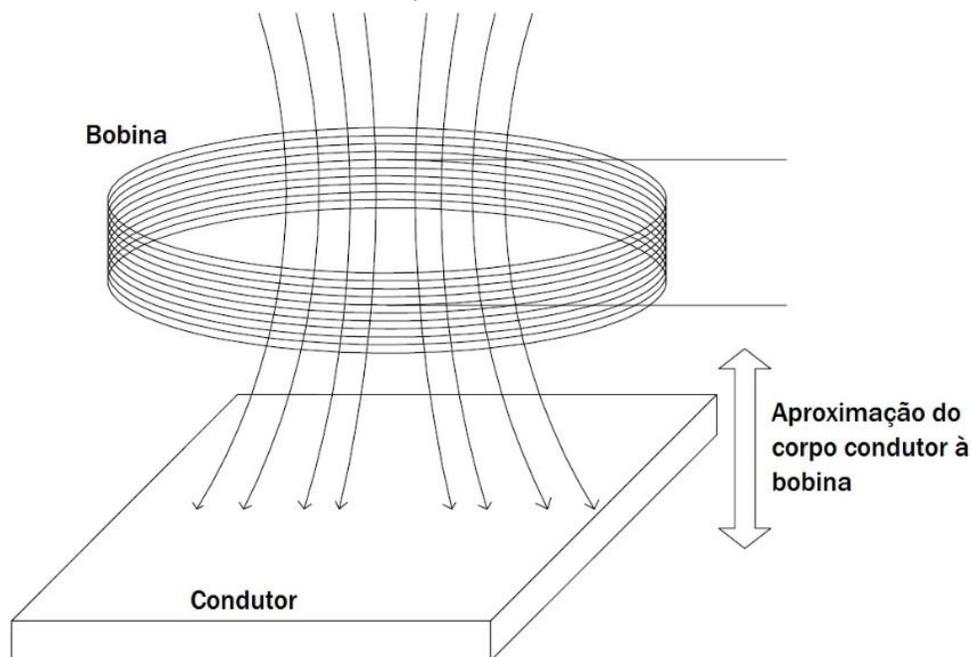
e usinas nucleares. Para tanto, sensores de posição lineares devem apresentar uma excelente precisão e um algoritmo de leitura adequada, grande resolução, vida longa e boa robustez [DANISI, et al. 2012a]. Dessa maneira, optou-se pelo uso de um sensor de posição indutivo.

## 4.2 Desenvolvimento do Protótipo do Sensor

Um dos objetivos do presente projeto é o desenvolvimento de um sensor para o controle de posição linear indutivo. O princípio de funcionamento desse sensor baseia-se no princípio do sensor de proximidade indutivo. Basicamente o oscilador alimenta a bobina com uma determinada frequência e uma corrente, gerando um campo eletromagnético. Quando o objeto condutor entrar neste campo induzirá uma corrente de fuga ou parasita, gerando um fluxo magnético que origina uma variação [HAYT, 2003].

A Figura 4.1 ilustra o princípio de funcionamento de um sensor de proximidade indutivo, comumente encontrado no mercado, fazendo com que haja alteração na permeabilidade magnética à medida que o corpo condutor se aproxima.

Figura 4.1: Funcionamento do sensor de proximidade indutivo.

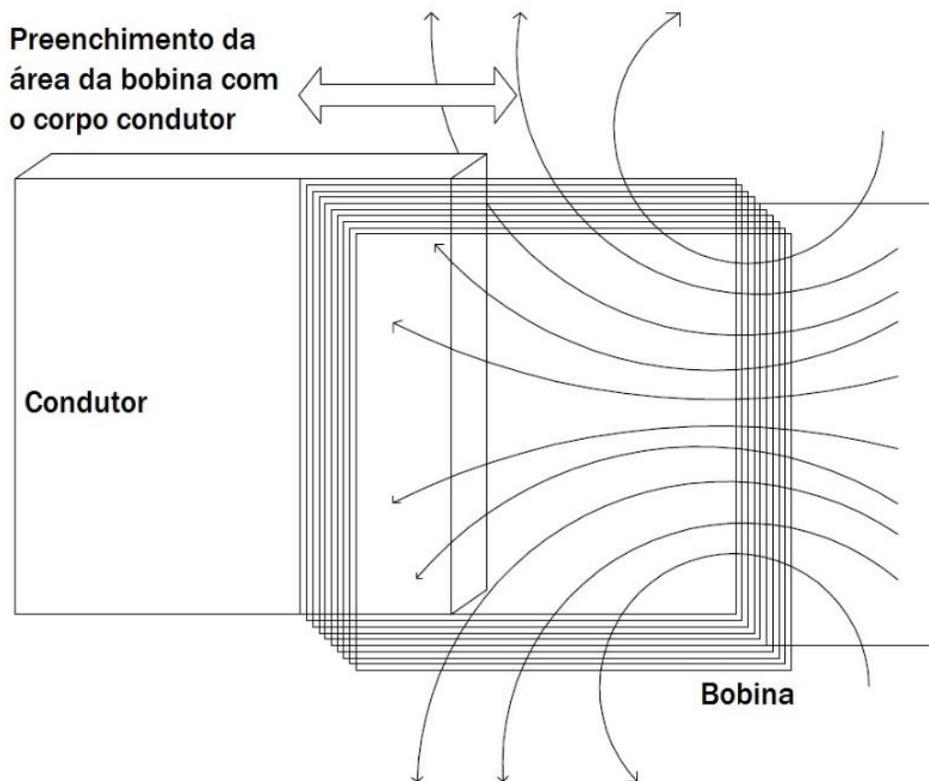


Fonte: Elaboração Própria.

A partir do princípio de funcionamento do sensor apresentado na Figura 4.1, o sensor proposto funciona como uma modificação onde o corpo condutor, situado próximo à bobina, aproxima-se com o intuito de preencher a área do condutor e, assim, detectar variações de acordo com o espaço preenchido através da gradativa alteração da permeabilidade magnética, como representado na Figura 4.2. Essa variação gradual pode ser medida de maneira a relacioná-la com valores que são definidos como os pontos de leitura (bruta) do sensor.

Pode-se obter mais especificações sobre o funcionamento de diversos tipos de sensores indutivos através da literatura [WEBSTER,1999].

Figura 4.2: Funcionamento do sensor de posição proposto.



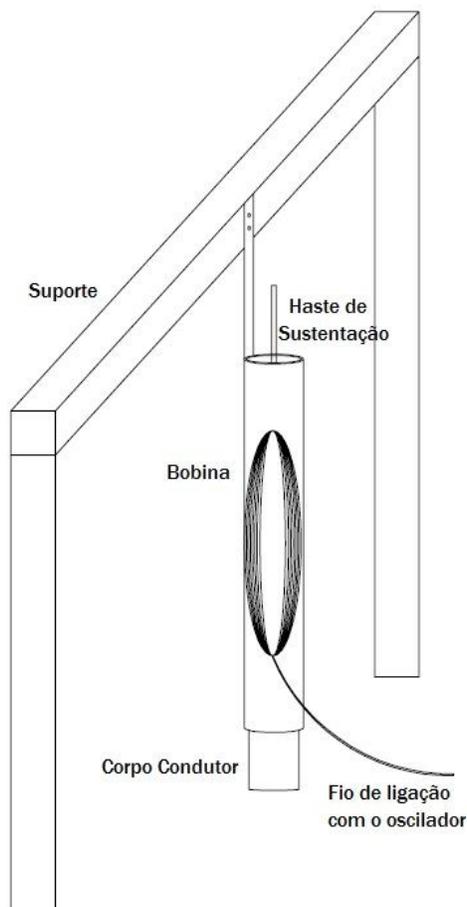
Fonte: Elaboração Própria.

A motivação do desenvolvimento do sensor foi a sua utilização para medir o ângulo da linha de espelho de um sistema concentrador Fresnel linear, sendo utilizado inicialmente em um protótipo. A construção deste sistema foi baseada na necessidade da medição do ângulo do espelho de um

concentrador solar Fresnel linear, com liberdade para variar de  $-45^{\circ}$  a  $45^{\circ}$ , tendo um desvio máximo aceitável de meio grau, para mais ou para menos, a partir do ângulo solar. O sensor proposto, exibido na Figura 4.3, mede a variação vertical da haste de sustentação do corpo condutor, sendo esta medida proporcional ao ângulo de giro da linha de espelho fixada nesta estrutura. A Figura 4.3 mostra o esquema da estrutura mecânica de sustentação e movimentação de uma linha de espelho que será utilizada no protótipo.

A partir da movimentação do espelho, a haste movimenta o corpo metálico, constituído por um cano metálico, modificando a leitura do sensor, através da modificação do sinal enviado pelo circuito oscilador. Assim pode-se dizer que para a aplicação proposta, a resolução do sensor chega a  $0,045^{\circ}$  por pontos do sensor. Para a aplicação proposta adaptou-se a medição linear do sensor para a angular, devido ao uso requerido na aplicação. Para tanto, fez-se uma adequação mecânica do sistema de suporte, onde a haste se conecta a um apoio ligado ao eixo de rotação do espelho. Com isso a variação da angulação do espelho leva a um deslocamento do apoio, fazendo com que a haste se movimente no eixo vertical.

Figura 4.3: Bancada de teste do sensor.

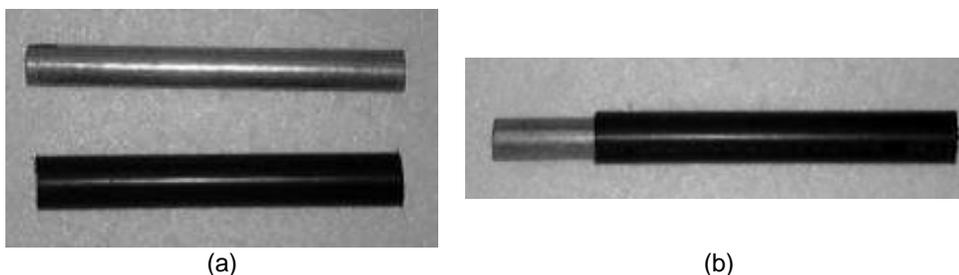


Fonte: Elaboração Própria.

Uma das desvantagens do uso do sensor proposto apresentado na Figura 4.3 é o alto tempo de resposta, em torno de 500 ms. Com isso, seu uso em sistemas que necessitam de um pequeno tempo de resposta torna-se inviável.

Este sensor de posicionamento possui uma montagem simples, constituída de uma parte fixa composta de uma bobina, de um tubo circular feito de material isolante e de uma parte móvel composta por outro tubo circular ferromagnético, conforme ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.4: Componentes do sensor: (a) Cano de suporte (externo - isolante) e cano sensor (interno-metálico) (b) Encaixe do sensor.



Fonte: DAHER, 2012.

A parte elétrica do sensor é feita com uma bobina que percorre o cano de suporte externo, contendo de 10 a 20 voltas de um fio de cobre esmaltado, fazendo com que a superfície do tubo isolante fique conforme ilustrado na Figura 4.5.

Figura 4.5: Cano isolante com bobina



Fonte: DAHER, 2012.

### 4.3 Dificuldades encontradas

A partir dos testes de precisão realizados com a utilização de um paquímetro, como pode ser visto na Figura 4.6, e para a configuração de tamanho utilizada, obteve-se uma resolução de até 2000 pontos por excursão completa.

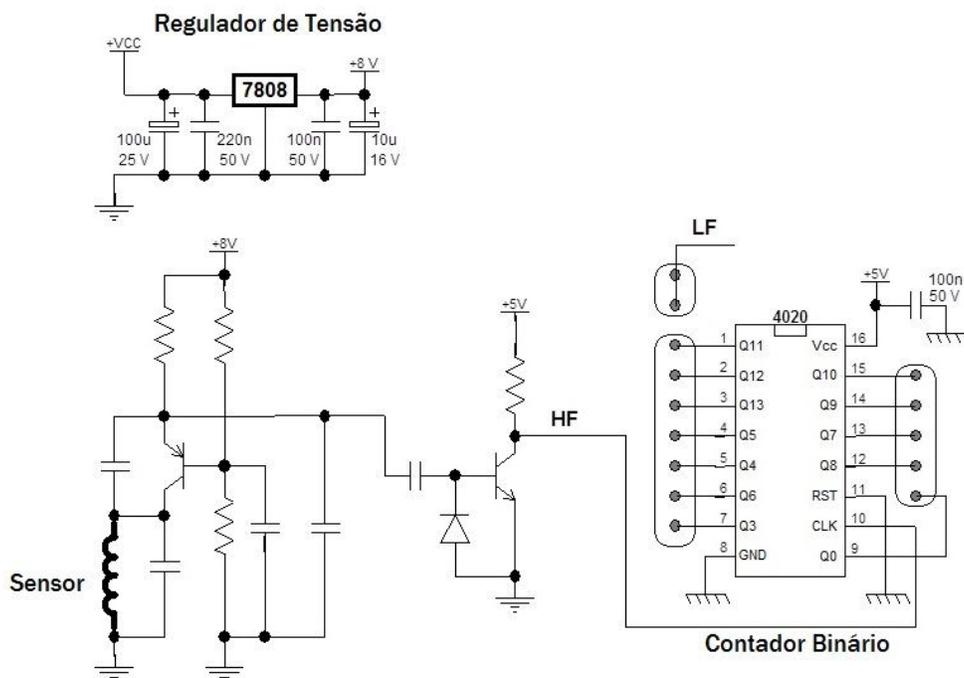
Figura 4.6: Validação da Leitura do Sensor com um paquímetro.



Fonte: DAHER, 2012.

Desta forma, considerando-se a concepção de simplicidade do sistema, projetou-se um circuito oscilador (Figuras 4.7 e 4.8) para condicionamento do sinal do sensor, e um circuito para leitura digital (Figura 4.9), com a finalidade de interpretação dos dados fornecidos pelo sensor.

Figura 4.7: Esquemático da placa do oscilador, incluindo divisor de frequência.



Fonte: DAHER, 2012.

Figura 4.8: Placa do circuito oscilador.

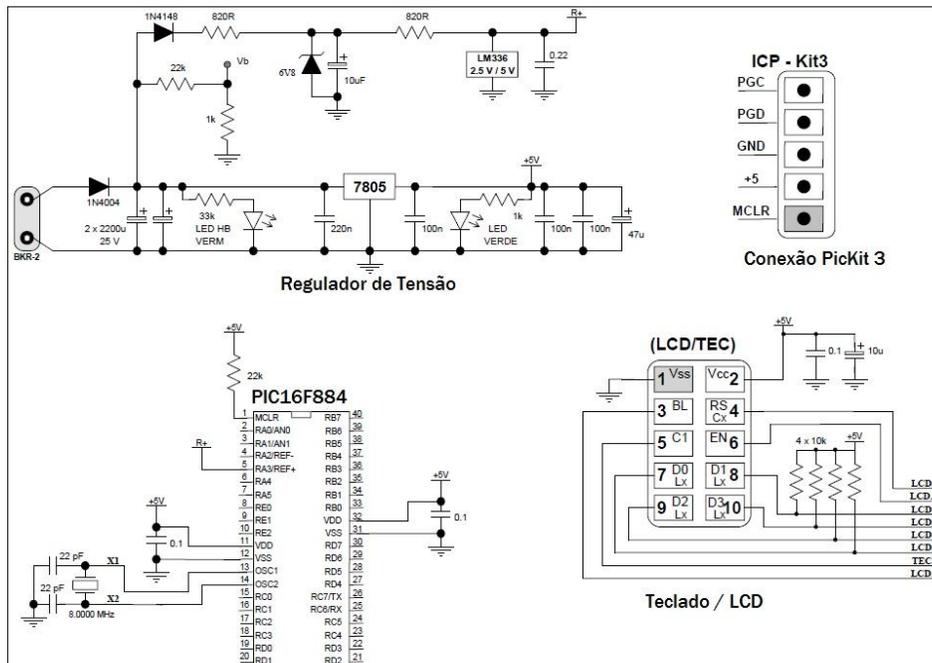


Fonte: DAHER, 2012.

Um dos problemas detectados foi uma diferença na leitura do sensor quando há uma variação de pelo menos 0,5 °C na temperatura nos componentes do circuito oscilador (Figura 4.8), apresentando variações na frequência devido à sensibilidade térmica dos seus elementos. No entanto, com o auxílio de um sensor de temperatura (LM35) instalado próximo ao circuito em questão e através de testes realizados, foi possível determinar que o sensor de posição altera aproximadamente cerca de 3,85 pontos na sua leitura para valores do sensor de temperatura maiores que 50 pontos e cerca de 2,8 pontos para valores menores que 50 pontos do sensor térmico. Desta maneira, é possível determinar a real posição através de uma compensação na leitura do

sensor, mesmo havendo variações de temperatura, da ordem de 50 °C ou mais. O erro atrelado a essa correção situa-se dentro da margem aceitável para o seu objetivo, dez pontos de leitura ( $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ), o que corresponde a um desvio de 0,5% da leitura final [DANISI et al., 2012b].

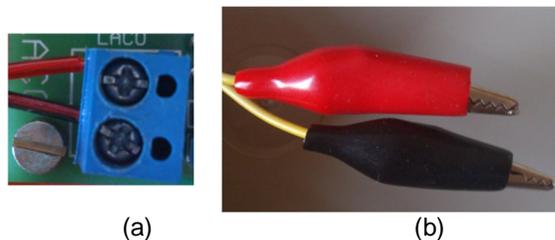
Figura 4.9: Esquemático do circuito para leitura digital.



Fonte: DAHER, 2012.

Outra dificuldade a ser comentada está relacionada com a extensão do cabo que conecta o sensor com o circuito oscilador, assim como a maneira como este é conectado, o que pode causar variação de até 0,2 °C na leitura do sensor. Visando mitigar esse problema padronizou-se a forma de ligação, que anteriormente era estabelecida por meio de um fio com garras jacaré, com o intuito de facilitar sua remoção (Figura 4.10b). Com o novo conector fixo (Figura 4.10a), obtém-se uma melhor conexão elétrica diminuindo a suscetibilidade a interferências devido à conexão. Porém, uma vez instalado e calibrado o sensor, não é adequado a sua remoção novamente em função da consequente necessidade de uma nova calibração.

Figura 4.10: (a) Conector fixo (b) Garras utilizadas anteriormente

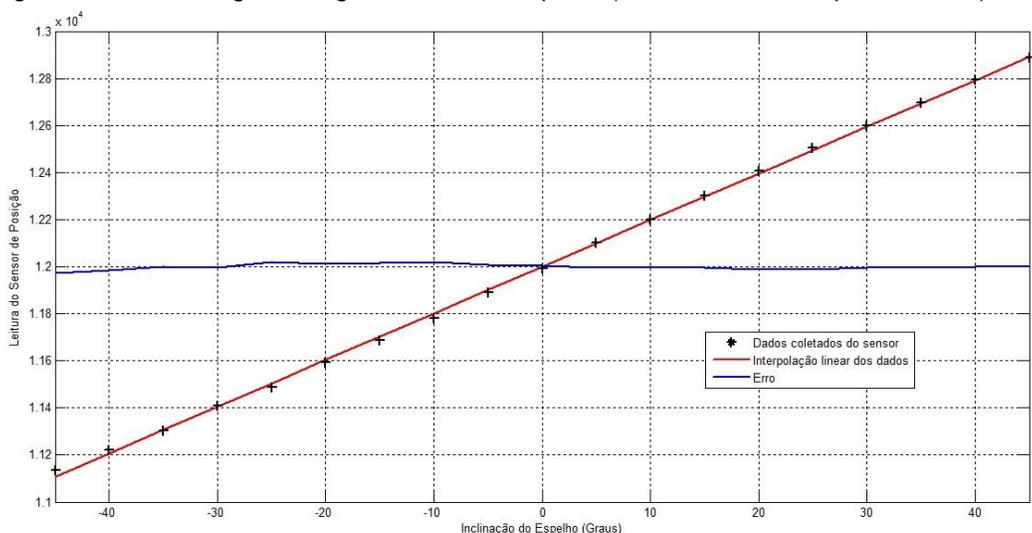


Fonte: Elaboração Própria.

#### 4.4 Calibração do sensor

Embora o sensor proposto apresente naturalmente uma característica praticamente linear, conforme ilustrado no gráfico da Figura 4.11, expresso em pontos de leitura do sensor por grau, os erros obtidos por uma interpolação de 1ª ordem podem chegar a  $0,8^\circ$ . Para contornar este problema, pode-se utilizar duas abordagens: (1) fazer uma interpolação através de funções mais complexas de ordem mais elevada; (2) dividir a faixa total de medição em intervalos e utilizar uma interpolação linear. Neste projeto, a segunda metodologia foi utilizada.

Figura 4.11. Leitura digital X ângulo da linha de espelho (valor medido e interpolado e erro).



Fonte: Elaboração Própria.

Para o procedimento de calibração selecionou-se cinco pontos espaçados dentro do intervalo de atuação desejado, de forma a viabilizar o processo de interpolação linear simples. Para os testes em bancada, selecionou-se os pontos  $-45^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $45^\circ$  para a calibração, e a partir

deles interpola-se com o valor fornecido pelo sensor para encontrar o correto posicionamento do sistema.

Com o intuito de validar a calibração e determinar a precisão do sensor, fixou-se um paquímetro de maneira que sua parte móvel desloque-se exatamente igual à parte móvel do sensor. Esta fixação pode ser assimilada analisando a Figura 4.6. Com isso pode-se ter um padrão de rastreamento capaz de exibir uma comparação, determinar a incerteza do sensor e corrigir possíveis erros sistemáticos.

É importante ainda ressaltar que a calibração, além de corrigir as não-linearidades, mostra-se de extrema necessidade, pois a cada nova confecção de um sensor, realizado manualmente, ou a simples substituição de algum elemento pode fazer com que existam diferenças, como, por exemplo, o modo em que as espiras são conectadas ao tubo e a não homogeneização do corpo metálico, gerando diferenças no momento da leitura, podendo prejudicar a medição. Portanto, caso seja necessário aumentar o fio que liga o sensor ao circuito oscilador (Figura 4.7), ou substituir a haste de sustentação do corpo metálico, assim como a substituição do próprio corpo, faz-se necessário a posterior calibração do sensor.

#### **4.5 Testes e conclusões da validade do sensor de posição**

O sensor proposto é uma alternativa simples e confiável, com características compatíveis e essenciais para aplicação em rastreadores solares ou sistemas posicionamento em concentradores solares, devido à característica de baixa velocidade dos movimentos.

O desenvolvimento do sensor ocorreu devido à necessidade de um sensor de posição robusto para medir o ângulo de inclinação da linha de espelho. O erro máximo encontrado nos experimentos chegou a 10 pontos ou 0,5%, o que não prejudica o funcionamento do sistema por estar dentro da margem de erro aceitável. Apesar disso, apresenta resolução de até 2000 pontos por excursão completa.

A validação do modelo é realizada através de medições experimentais. Com os resultados destas, identificou-se alguns problemas durante os testes, que foram corrigidos ou compensados, fazendo com que se obtivesse a devida confiabilidade para o uso do sensor.

Com a finalidade de verificar o grau de concordância entre valores medidos, obtidos por medições repetidas sob as mesmas condições, utilizou-se um paquímetro de modo a assegurar a veracidade da medição, assim como sua repetibilidade.

A calibração visa reduzir a incerteza de medição associada, tendo sido testada por meio de repetitivas averiguações com o auxílio um transferidor associado a um pêndulo, resultando em erros inferiores a  $0,1^\circ$ .

A compensação do efeito térmico no sistema foi testada a partir da estimulação condições mais severas em relação a grandes variações de temperatura, de  $18^\circ\text{C}$  a aproximadamente  $70^\circ\text{C}$ , para analisar a eficácia da compensação de temperatura implementada, estando funcionando efetivamente dentro do limite de  $0,3^\circ$ .

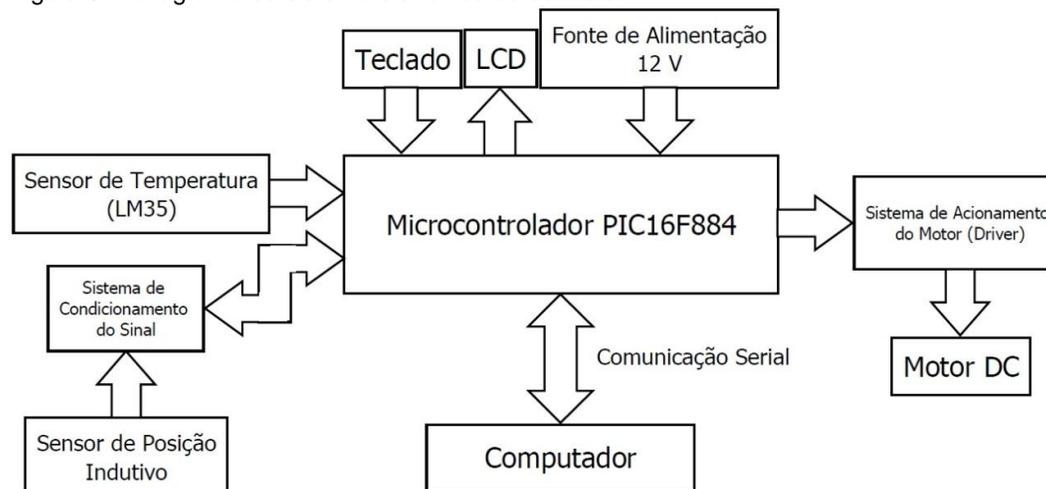
A exatidão de medição do sensor completo possui um grau de concordância entre valores medidos com erro médio aproximado de  $0,03^\circ$ , não excedendo os  $0,5^\circ$  propostos como máximo aceitável para o projeto.

A verificação da durabilidade do sensor em ambientes adversos é realizada através de sensores instalados no concentrador real, expostos às intempéries. De uma forma geral, o sensor atende a todas as especificações do projeto, como o tempo de resposta e o erro máximo de medição, revelando-se competente para tais atribuições, com componentes simples e fáceis de encontrar no mercado, além de necessitar de fácil montagem, sendo mais adequado entre as soluções pesquisadas.

## 5 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO CONCENTRADOR SOLAR

Com o intuito de utilizar o conhecimento adquirido ao longo do trabalho, desenvolveu-se um protótipo para validar os processos e componentes utilizados. O sistema eletrônico de controle do protótipo foi desenvolvido tendo como componente básico um microcontrolador (Figura 5.1), recebendo instruções de um computador conectado a partir de uma porta serial. Além de uma fonte de alimentação de 12 V, estão ligados ao microcontrolador, com o intuito de manipulá-lo localmente, um teclado com 12 teclas e um LCD com 2 linhas e 16 caracteres. Para fornecer o *feedback* do sistema analisado há a necessidade de 2 sensores: um sensor para detectar a posição do espelho e um sensor de temperatura, para verificar a variação de temperatura do ambiente e realizar a correção do posicionamento do espelho. Por fim, um motor DC de 12 V, similar aos utilizados para a movimentação de vidros de automóveis, foi instalado para realizar a movimentação desejada.

Figura 5.1: Diagrama do sistema eletrônico de controle.



Fonte: Elaboração Própria.

### 5.1 Concentrador Solar: Estrutura e Componentes

#### 5.1.1 Concentrador em escala natural

O concentrador em escala natural foi projetado e instalado em uma estação meteorológica instalada dentro do Campus do Pici da Universidade

Federal do Ceará, situada na latitude  $3^{\circ}44'42.74''\text{S}$  e longitude  $38^{\circ}34'55.81''\text{O}$ . O arranjo do sistema consiste em 12 linhas de espelhos planos dispostos lado a lado, cada uma com 0,15 m de largura e 18 m de comprimento. No centro das linhas de espelhos há um absorvedor composto por três tubos, cada um com 0,05 m de diâmetro, totalizando, também, uma largura de 0,15 m e 18 m de comprimento, posicionado 1,10 m acima das linhas dos espelhos, como exposto na Figura 5.2. Tanto as linhas de espelhos como o absorvedor têm seu comprimento posicionado em paralelo ao eixo Norte-Sul, devido ao projeto possuir somente um grau de liberdade, movimentando os espelhos de leste para oeste.

A estrutura de sustentação foi desenvolvida em aço galvanizado/alumínio, visando alta durabilidade e robustez. Dessa maneira, a estrutura mostrou-se viável, mecanicamente rígida e de fácil construção. Houve também uma preocupação em minimizar o efeito do sombreamento ocorrido entre as linhas de espelhos, encontrando uma distância ótima de 0,07 m entre cada uma.

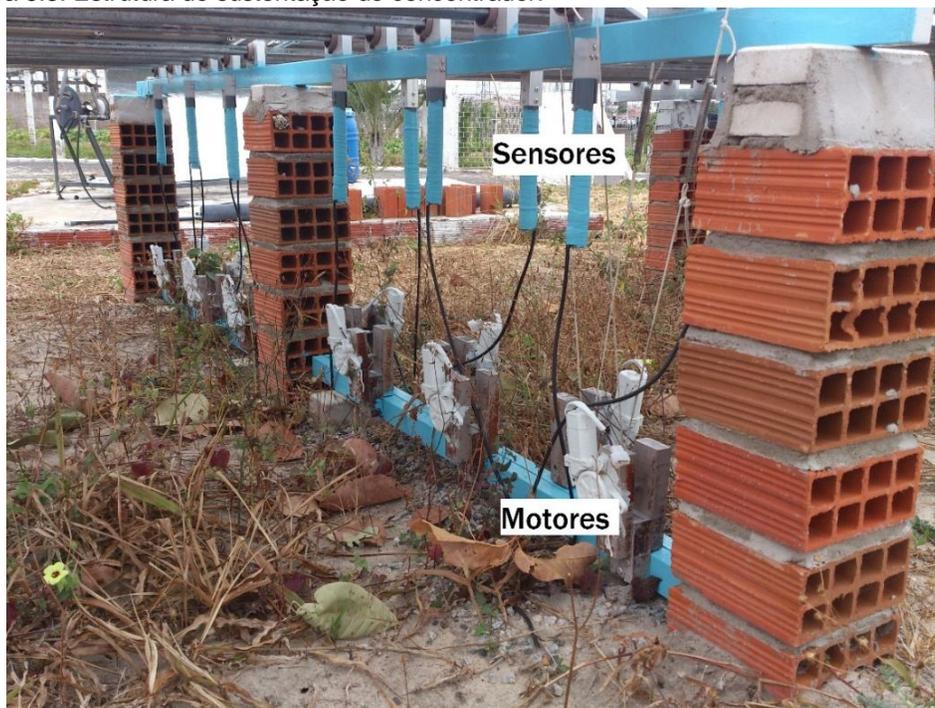
Figura 5.2: Concentrador construído em escala real.



Fonte: Elaboração própria.

A estrutura foi instalada a aproximadamente 0,9 m do solo, sustentada por colunas de tijolos. Embaixo da estrutura ficam localizados os sensores de posição e os motores para a movimentação dos espelhos, conforme a Figura 5.3.

Figura 5.3: Estrutura de sustentação do concentrador.

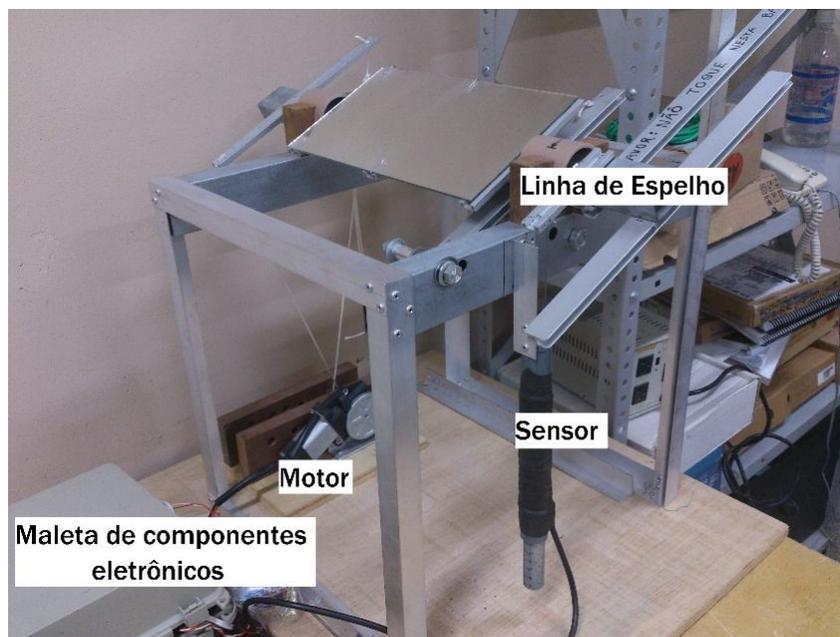


Fonte: Elaboração própria.

### 5.1.2 Protótipo do concentrador

O protótipo do concentrador criado para a realização do desenvolvimento do sistema de rastreamento e da automação em laboratório (Figura 5.4) é uma representação do concentrador real, tendo uma única representação de uma linha de espelho com seu comprimento reduzido para aproximadamente 0,26 m. O motor DC e o sensor de posição indutivo são os mesmos utilizados no concentrador em campo.

Figura 5.4: Protótipo de bancada.



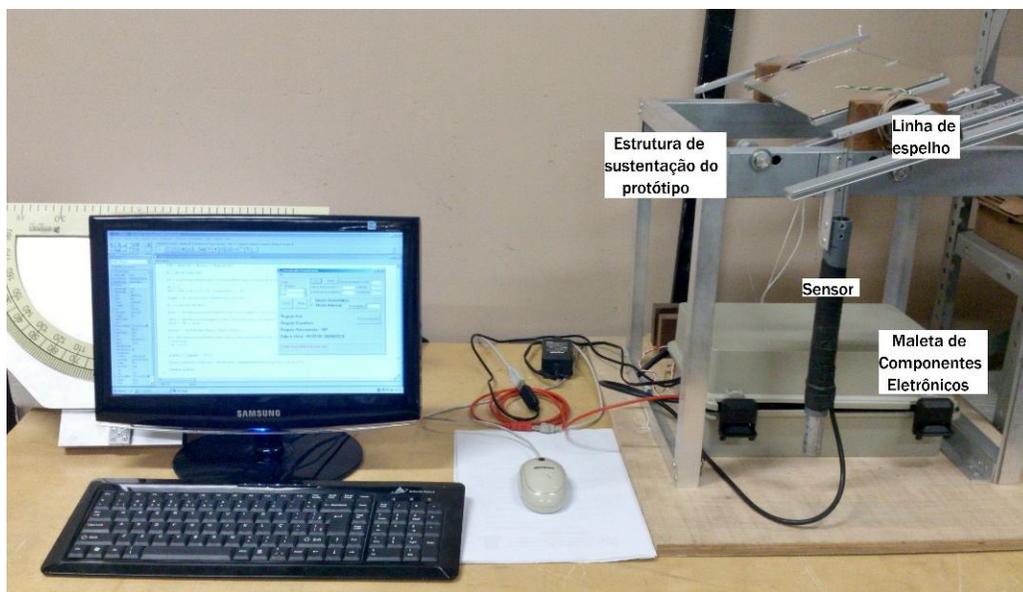
Fonte: Elaboração própria.

### 5.1.3 Bancada de Desenvolvimento

Para a implementação da parte de controle e automação dos circuitos que compõe o protótipo fez-se necessário o uso de uma bancada de desenvolvimento, localizada no laboratório do GPAR (Grupo de Pesquisa em Automação e Robótica) do Departamento de Engenharia Elétrica da UFC.

A bancada é composta do protótipo e de um computador equipado com um processador Pentium 4 de 3.2 GHz, memória RAM de 1Gb e HD de 100 Gb, utilizando o sistema operacional Windows XP, para a realização do desenvolvimento e gerenciamento dos *softwares* necessários, além de permitir a realização das simulações necessárias, apresentada na Figura 5.5.

Figura 5.5: Bancada de Desenvolvimento.



Fonte: Elaboração Própria.

#### 5.1.4 Maleta de componentes eletrônicos

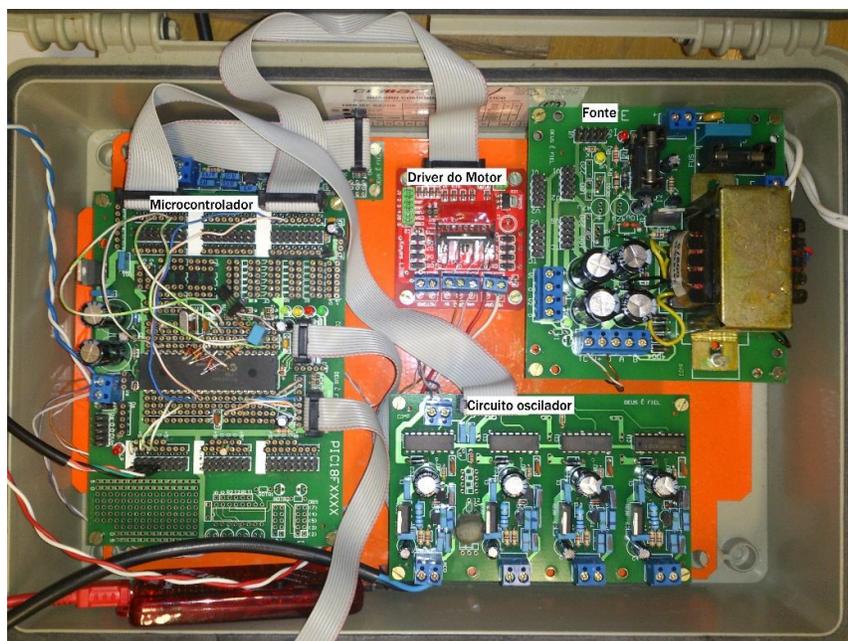
Compondo parte do protótipo, utilizou-se uma maleta plástica com travas (Figura 5.6) onde todos os componentes eletrônicos ficam localizados. Sua utilização é necessária quando o protótipo é levado para a realização de testes fora do laboratório, necessitando de um isolamento do sistema contra chuva, vento, poeira, insetos e outras possíveis formas de causar alguma influência no funcionamento do sistema, evitando-se danos aos componentes. Pode-se ver a disposição dos componentes dentro da maleta na Figura 5.7.

Figura 5.6: Maleta de proteção fechada com travas.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 5.7: Maleta de proteção e componentes eletrônicos.



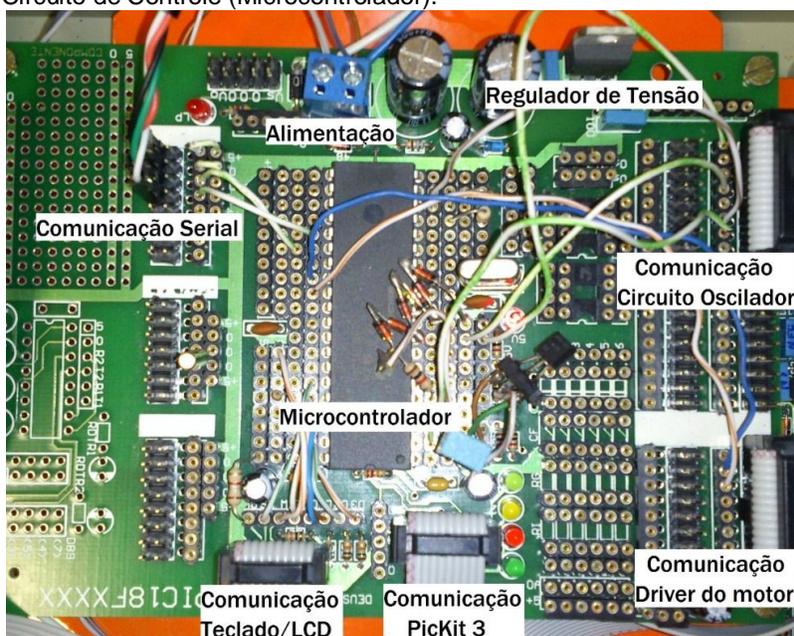
Fonte: Elaboração própria.

## 5.2 Circuitos Eletrônicos

### 5.2.1 Circuito de Controle / Microcontrolador

O circuito que realiza o gerenciamento e controle do sistema é exibido na Figura 5.8.

Figura 5.8: Circuito de Controle (Microcontrolador).



Fonte: Elaboração própria.

O circuito de controle é composto pelo microcontrolador PIC16F884 e conexões para os circuitos periféricos, como o oscilador, o dispositivo de gravação do microcontrolador, teclado e LCD.

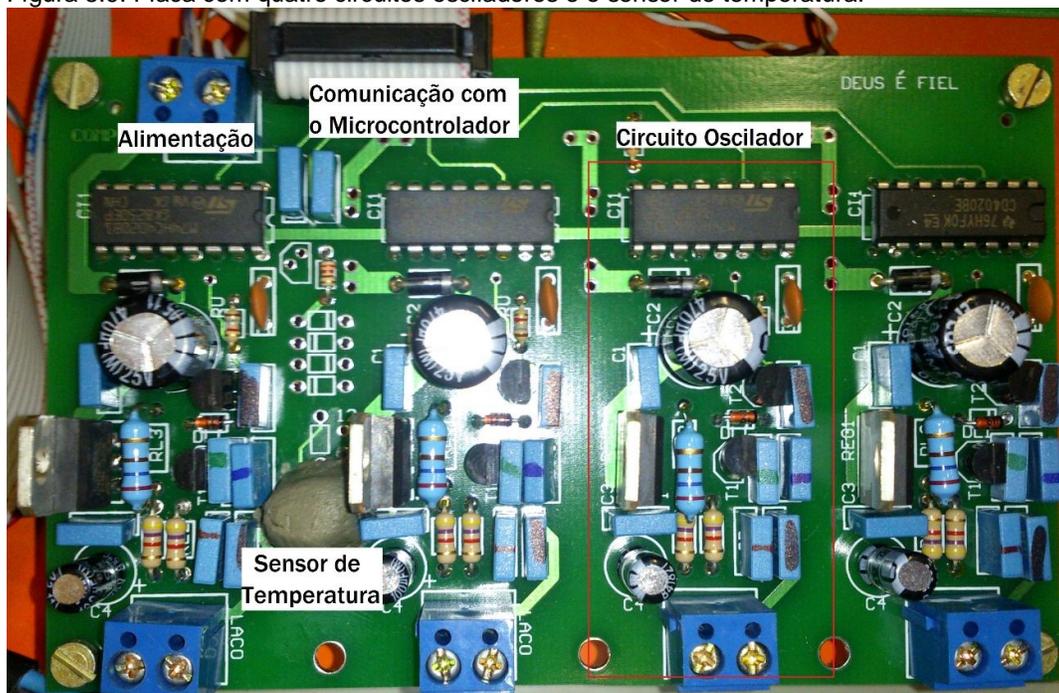
Rotinas programadas fazem o microcontrolador ler sensores, detectar teclas pressionadas no teclado, atualizar visualização do LCD, interpretar instruções recebidas provenientes do computador e gerar os estímulos necessários para outros componentes.

A dinâmica do circuito oscilador já foi apresentada no Capítulo 5 ao abordar o funcionamento do sensor indutivo.

### 5.2.2 Circuitos Periféricos

Como já mencionado no capítulo anterior, utiliza-se um circuito oscilador para compor o sistema (Figura 5.9), posteriormente desenvolvido para conter o sensor de temperatura LM35 e quatro osciladores em uma única placa, conforme apresentado no Capítulo 4 e ilustrado na Figura 5.9.

Figura 5.9: Placa com quatro circuitos osciladores e o sensor de temperatura.

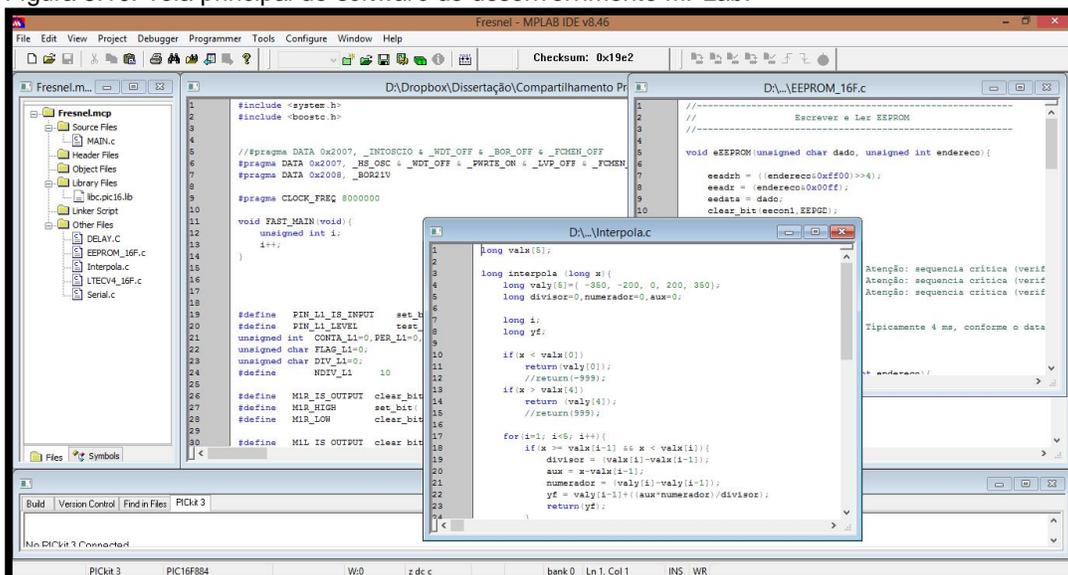


Fonte: Elaboração própria.

### 5.3 Ferramentas de projeto

A linguagem utilizada para o desenvolvimento dos programas referente ao microcontrolador foi C. Com isso, o compilador empregado para atender a essa opção foi a ferramenta *BoostC*, desenvolvido pela *SourceBoost Technologies*, podendo ser usado com PICs 12, 16 ou 18, além de ser compatível com o padrão ANSI. Este compilador foi integrado à plataforma de desenvolvimento de aplicações MPLab IDE (Figura 5.10), fornecido gratuitamente pela empresa Microchip Technology. Esta plataforma abrange uma vasta gama de microcontroladores desenvolvidos pela empresa, com uma interface amigável e total compatibilidade com o sistema operacional utilizado.

Figura 5.10: Tela principal do *software* de desenvolvimento MPLab.



Fonte: Elaboração Própria.

Utilizou-se, também, a possibilidade do MPLab de realizar uma integração com o programador PICKit 3, Figura 5.11, provendo um *hardware* de que realiza a programação do microcontrolador In-Circuit sem a necessidade de *sockets* ou adaptadores, conectado ao computador via USB e sendo executado em tempo real [MICROCHIP, 2010].

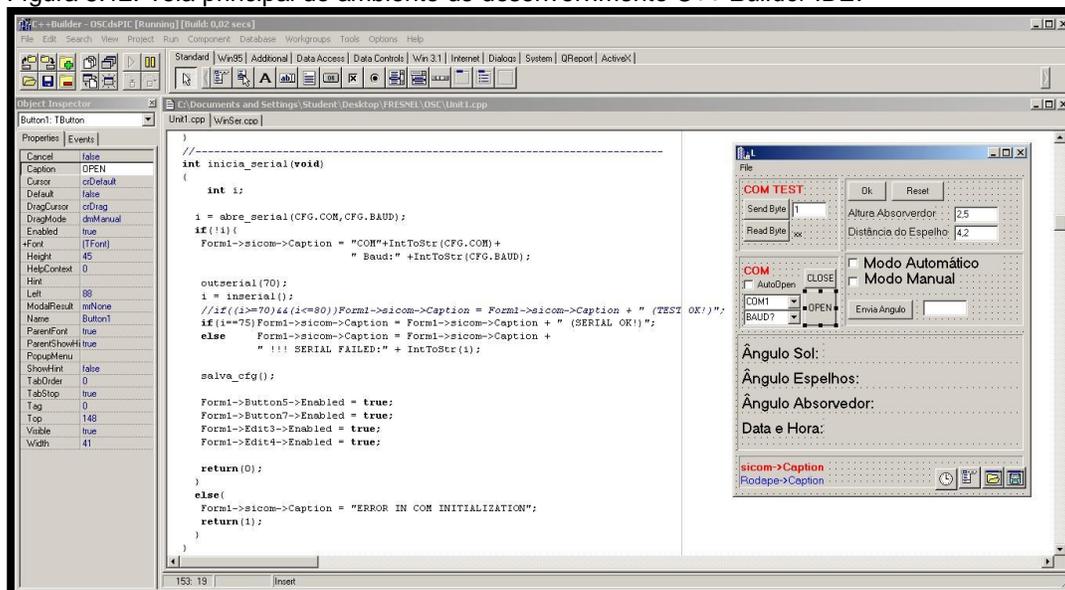
Figura 5.11: *Hardware* de programação PICKit 3.



Fonte: Elaboração Própria.

Para desenvolver o *software* de controle, empregou-se a linguagem de programação C++, através do ambiente de desenvolvimento C++ *Builder IDE*, Figura 5.12.

Figura 5.12: Tela principal do ambiente de desenvolvimento C++ *Builder IDE*.



Fonte: Elaboração Própria.

## 5.4 Outras Estruturas

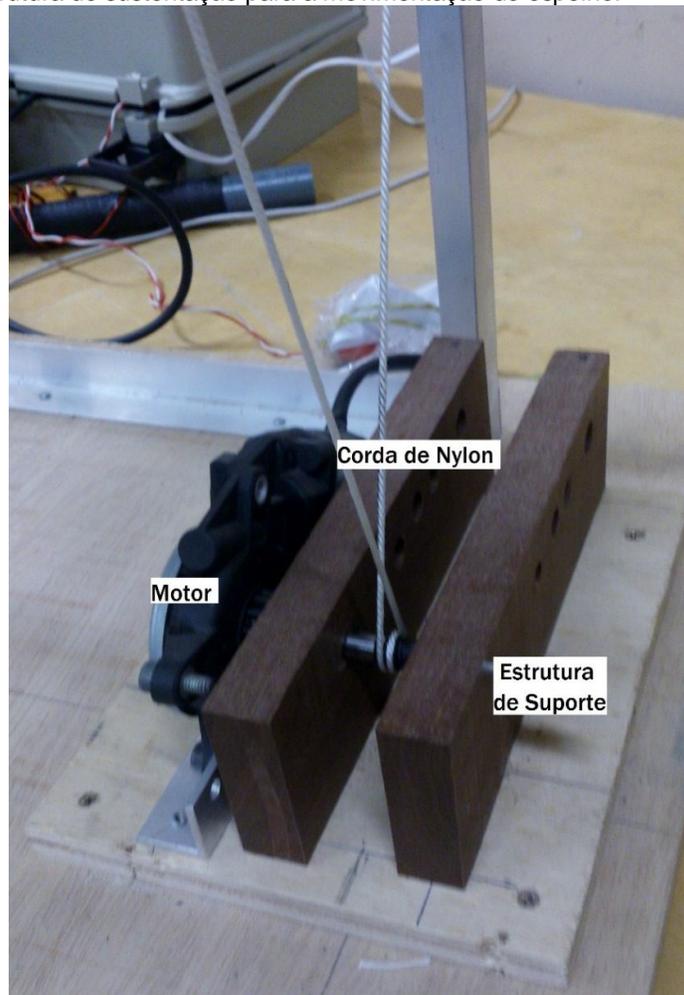
Visando a durabilidade e confiabilidade, sem esquecer o custo e a facilidade de obtenção, o sistema para o deslocamento do espelho consiste em um motor DC de 12 V similar àqueles utilizados para movimentação de vidros automotivos, uma estrutura de sustentação e uma corda de nylon para a movimentação, acoplados como exposto nas Figuras 5.13 e 5.14.

Figura 5.13: Motor DC responsável pela movimentação do espelho.



Fonte: Elaboração própria.

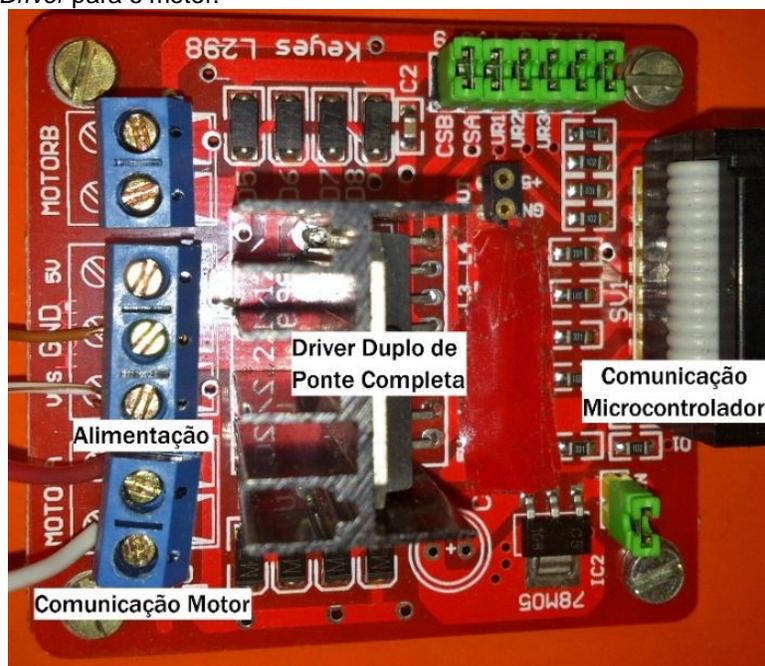
Figura 5.14: Estrutura de sustentação para a movimentação do espelho.



Fonte: Elaboração própria.

Para que o motor funcione é necessário a utilização de um sistema de acionamento (*driver*) que suporte tensões e correntes mais elevadas sem ignorar os níveis lógicos TTL padrão e conduzindo cargas indutivas tais como relés, solenoides e motores de passo ou DC. Para isso utilizou-se o circuito integrado L298, instalado em uma interface mostrada na Figura 5.15.

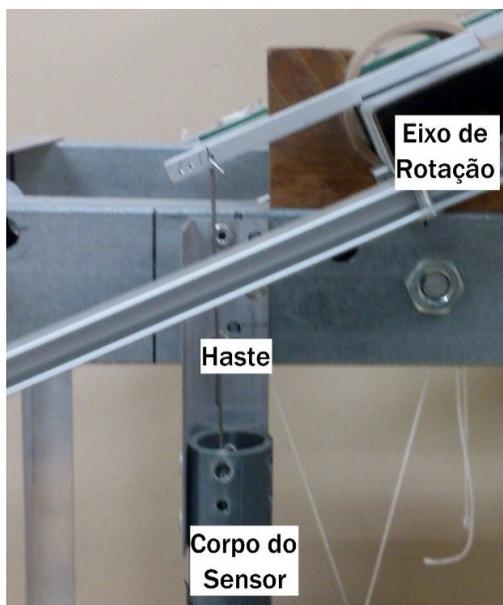
Figura 5.15: *Driver* para o motor.



Fonte: Elaboração própria.

Como o sensor foi desenvolvido para realizar uma medição linear e deve-se obter o deslocamento angular do espelho, alguns ajustes mecânicos foram feitos, tornando possível essa conversão. Fixou-se uma haste ao eixo de rotação e à parte móvel do sensor, situado no interior do corpo de sensor, como exibido na Figura 5.16. Dessa maneira o deslocamento da linha de espelho fará com que a haste desloque a parte móvel do sensor, realizando a medição. Isso fornece uma movimentação de  $0,045^\circ$  por ponto medido, ou aproximadamente 22 pontos medidos por grau de inclinação.

Figura 5.16: Haste de sustentação da parte móvel do sensor.



Fonte: Elaboração própria.

#### 5.4.1 Instrumentos para Interface

Para realizar a interface direta com o usuário, utilizou-se um LCD de 16 caracteres e 2 linhas, integrado a um teclado numérico (Figura 5.17). Através dessa estrutura pode-se manipular a posição da linha de espelho, calibrar o sensor de posição e rastrear um ângulo específico, dando liberdade ao usuário para manuseio do sistema.

Figura 5.17: Conjunto de teclado e LCD.



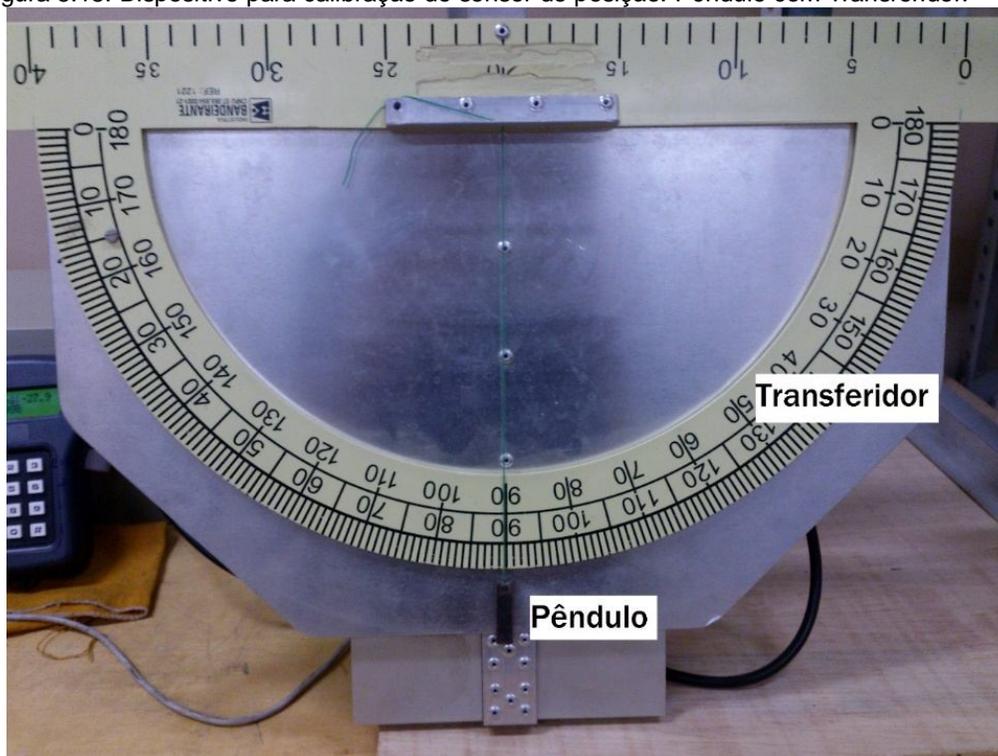
Fonte: Elaboração própria.

### 5.4.2 Aferição e Calibração

Compondo a relação dos equipamentos empregados para a calibração do sensor de posição indutivo, utilizou-se um transferidor acoplado a um pêndulo (Figura 5.18) visando a necessidade de poder posicionar a linha de espelho na correta angulação solicitada, podendo assim registrar posteriormente os valores no microcontrolador para realizar a interpolação.

O processo é realizado de forma manual e muito dependente do operador, uma vez que erros de leitura do equipamento no momento da calibração podem gerar uma inexatidão no instante que for necessário rastrear o ângulo solar.

Figura 5.18: Dispositivo para calibração do sensor de posição: Pêndulo com Transferidor.



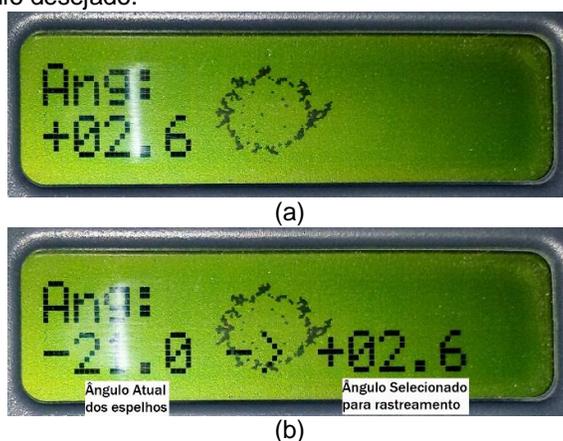
Fonte: Elaboração própria.

As angulações obtidas são independentes da nivelção do sistema, uma vez que o pêndulo não possui nenhuma ligação com o sistema, apenas atua conforme a gravidade.

## 5.5 Softwares Desenvolvidos

Para dar início ao desenvolvimento do projeto focou-se na realização do *software* que irá fornecer todas as funcionalidades necessárias ao microcontrolador. Inicialmente buscou-se implementar a movimentação do motor, parte importante para o funcionamento do sistema. Junto a esta movimentação, inseriu-se uma variável para controlar a largura do pulso, fazendo com que a velocidade do motor aumente ou diminua de acordo com este parâmetro. Para a realização de testes configurou-se um botão “+” no teclado para poder girar o motor no sentido horário e outro botão “-“ com o intuito de movimentá-lo no sentido anti-horário. Além desses botões, também utilizou-se um botão “Menu/Esc” que ao ser pressionado pode entrar no menu criado ou descartar alguma alteração feita dentro do menu, e um botão “Enter” que pode acessar um menu secundário onde pode-se movimentar a linha de espelho para um ângulo específico ajustado diretamente neste menu secundário ou pode salvar as modificações feitas no menu principal. Ao pressionar o botão “Enter” irá aparecer a Figura 5.19 (a) para se selecionar o ângulo que deseja posicionar a linha de espelho. Ao pressionar “Enter” mais uma vez inicia-se a busca do ângulo desejado e exibe-se a tela da Figura 5.19 (b) apresentando o ângulo em que a linha de espelho está posicionada e o ângulo que foi selecionado anteriormente.

Figura 5.19: (a) Tela de seleção do ângulo desejado do menu secundário; (b) Tela do rastreamento do ângulo desejado.

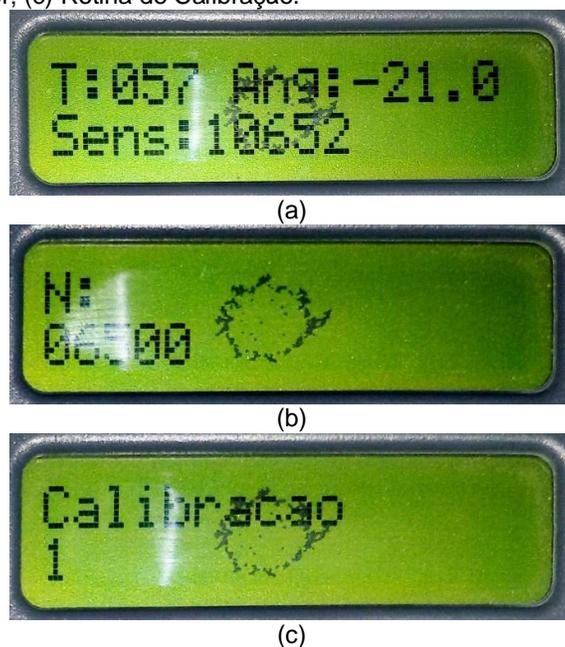


Fonte: Elaboração própria.

A leitura do sensor de temperatura LM35 é expressa por meio de um valor de tensão proporcional à temperatura, podendo este valor ser convertido

ou não para graus Celsius. Na tela principal da aplicação optou-se por exibir a leitura da temperatura do sensor sem convertê-la para graus Celsius, a leitura do sensor de posição e o ângulo em que o espelho está (Figura 5.20 (a)). Visando um melhor controle das variáveis do sistema criou-se um menu principal composto basicamente por duas funções, melhor visualizado na Figura 5.20 (b) e (c). A primeira é relacionada à velocidade de rotação do espelho, em que uma mudança na variável “N” proporciona uma modificação no tempo de acionamento do motor. O outro item que compõe o menu é para entrar na rotina de calibração do sensor de posição.

Figura 5.20: (a) Tela principal da aplicação; (b) Variável para controle do tempo de acionamento do motor; (c) Rotina de Calibração.



Fonte: Elaboração própria.

Funções secundárias foram utilizadas para auxiliar no desenvolvimento das funções pertinentes ao projeto. As rotinas para exibir dados no LCD, assim como as rotinas para ler o teclado, são de extrema importância para a interação com o usuário, sem a necessidade de outro dispositivo como um computador ou um celular.

Outro passo importante implementado foi a leitura dos dados fornecidos pelo sensor de posição, para o sistema estar informado da localização do espelho naquele determinado momento. Isso é feito periodicamente utilizando a interrupção de Timer0 do microcontrolador.

Atrelado a essa leitura, deve-se realizar a divisão da faixa de valores obtidos e realizar a interpolação linear desses intervalos para que o erro relacionado ao ângulo seja reduzido, como explicado no Capítulo 4.

Após a obtenção da leitura do sensor de posição deve ser feita a correção devido à sensibilidade térmica do circuito oscilador. Para tanto conectou-se o sensor a uma porta A/D do microcontrolador e calculando uma média dos 15 últimos valores medidos da temperatura. Com isso, torna-se possível realizar a correção da leitura do sensor em função do resultado dessa medição do sensor de temperatura.

Para o correto funcionamento do sensor de posição indutivo, deve-se calibrá-lo, como apresentado no Capítulo 5. Para dar início ao processo, deve-se acessar a rotina de calibração no menu da aplicação. Entrando na fase de calibração o sistema solicitará que posicione a linha de espelho no primeiro ângulo ( $-45^\circ$ ), que poderá ser feito através dos botões “+” e “-“. Ao chegar no ângulo desejado basta pressionar a tecla “Enter” e passar para o próximo ângulo ( $-20^\circ$ ), e assim por diante até finalizar os cinco pontos de interesse ( $-45^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $0$ ,  $20^\circ$  e  $45^\circ$ ). Após isso, a interpolação é realizada de forma automática. É interessante ressaltar que a calibração deve ser realizada quando o sistema atingir a estabilidade para uma certa temperatura devido à sensibilidade do sistema, podendo inserir erros na interpolação caso a calibração inicie-se em uma temperatura e termine em outra. Para evitar problemas deste tipo inseriu-se uma proteção que retornará um erro e cancelará a operação caso ocorra uma modificação da temperatura durante o processo de calibração, fazendo com que o usuário repita toda a operação.

Uma preocupação relevante à calibração é o fato de que os dados obtidos ficam registrados apenas na memória volátil do controlador, e uma vez em que o sistema é desligado toda a configuração é perdida, sendo necessário realizar a calibração do sistema novamente. Para evitar esse tipo de problema utilizou-se a memória EEPROM interna do microcontrolador para, após a finalização de cada processo de calibração, uma função é executada e tem a responsabilidade de salvar os dados na EEPROM para um uso futuro. De forma semelhante, ao ligar o sistema, é conferido se há algum dado relativo à

calibração. Caso haja, uma rotina realiza a leitura dessas informações e as restaura para o sistema.

Para o envio e recebimento de dados utilizou-se a comunicação serial, configurada por uma rotina na inicialização que define a taxa de transmissão e outros registradores necessários. Implementou-se uma outra função que trata do recebimento de diferentes tipos de dados, com a finalidade de identificar o que está sendo solicitado ao microcontrolador. Há também rotinas que possuem a função de enviar ou receber *bytes* e ângulos para serem tratados.

Uma das funções mais importantes neste desenvolvimento é a que realiza o rastreamento do ângulo solicitado. Várias questões devem ser levadas em consideração, como o grande tempo de resposta do sensor (cerca de 500 ms), limitando a velocidade do rastreamento. Basicamente o rastreamento consiste em ler o sensor de posição e realizar uma comparação do seu valor com o valor do ângulo procurado. Caso seja negativa, ajusta-se o sentido da rotação e a velocidade, acionando-se posteriormente o motor que irá movimentar a linha de espelho. Após esses procedimentos deve-se aguardar o tempo de atualização do sensor, cerca de meio segundo, para poder realizar a comparação novamente com o ângulo desejado. Esse ciclo se prolonga até o posicionamento correto ser encontrado e a rotina encerrada.

Para determinar a velocidade em que vai ocorrer a rotação, elaborou-se uma rotina baseada na técnica de controle de escalonamento de ganhos. Calcula-se a diferença entre o ângulo buscado e o ângulo atual. A partir dessa diferença seleciona-se a melhor largura de pulso, que está diretamente ligada à velocidade com que a rotação acontece. A relação entre as diferenças calculadas e as larguras de pulso atreladas foram determinadas a partir de várias experimentações práticas realizadas no protótipo desenvolvido.

Com o intuito de obter melhor entendimento e assimilação das rotinas implementadas, assim como a mais satisfatória visualização das técnicas utilizadas pode-se procurar o apêndice A, onde as funções estão expostas da maneira que foram implementadas e totalmente funcionais.

Com a finalidade de poder monitorar e coordenar a movimentação do espelho, desenvolveu-se um *software* para ser utilizado em um computador, utilizando a linguagem C. Na aplicação foi inserido um campo onde o usuário pode selecionar em qual porta serial do computador o sistema está conectado, assim como a velocidade de transmissão, podendo a conexão ser aberta ou fechada a critério do usuário. Para o usuário ficar informado no caso de haver algum erro, como o erro de inicialização, ou se a conexão foi bem sucedida, um campo de *feedback* foi inserido no rodapé do programa.

Após o ajuste da porta de comunicação, o usuário deve inserir alguns dados pertinentes à localização, como a longitude e latitude e o deslocamento angular que a linha de espelho se encontra utilizando como referência a linha norte-sul, e o posicionamento do absorvedor, com a altura e distância da instalação.

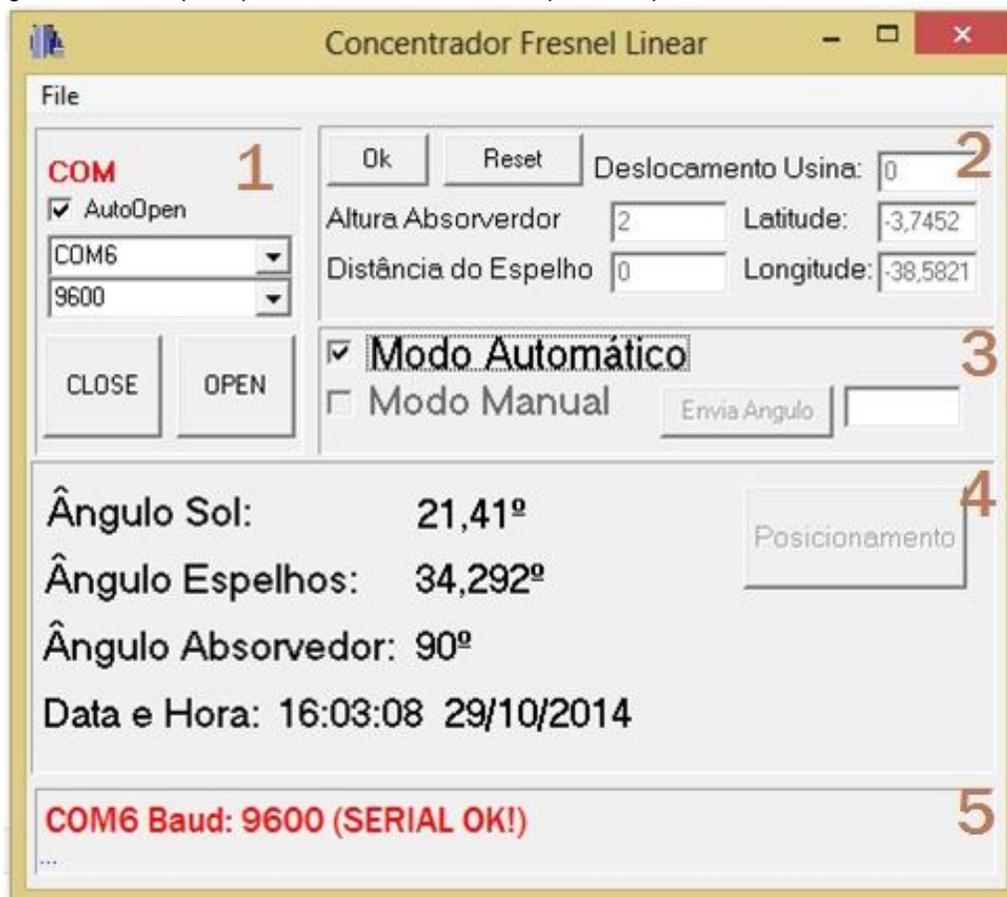
Em seguida, após a validação dos dados fornecidos, os modos de utilização, manual ou automático, estarão liberados. No modo manual o usuário pode colocar um valor qualquer para que o espelho seja posicionado ou pode-se selecionar o botão para o posicionamento destes em relação ao Sol. No modo automático, a cada 30 segundos o espelho modifica sua posição em detrimento da movimentação do Sol.

A cada atualização do posicionamento do espelho, um conjunto de dados é exibido ao usuário, a fim de mantê-lo devidamente informado. Estes dados consistem no ângulo que o Sol está naquele momento, o ângulo em que o espelho deve estar e o ângulo que o absorvedor foi instalado em relação à linha de espelho, além da data e da hora fornecidas automaticamente pelo próprio computador.

O *software* desenvolvido pode ser melhor e mais intuitivamente entendido ao observar a Figura 5.21 analisando as diversas estruturas separadas em quadros. O número “1” indica o quadro reservado para a configuração da porta da comunicação serial. O campo “2” é onde deve ser inserido os dados relativos ao posicionamento do controlador (latitude, longitude), ao deslocamento da linha de espelho em relação ao eixo Norte-Sul e à posição do absorvedor. A escolha do modo de operação manual ou

automática é realizada no campo “3”. O número “4” exibe os dados referentes aos ângulos do Sol, do absorvedor e da linha de espelho, além da data e hora. Por último, o campo “5” expõe o *status* da comunicação serial do sistema.

Figura 5.21: Tela principal do *software* de controle para computadores.



Fonte: Elaboração própria.

## 5.6 Testes com o protótipo

### 5.6.1 Movimentação esperada do sistema

Para o desenvolvimento da aplicação proposta, o espelho deve se movimentar modificando sua angulação de leste para oeste, seguindo a variação de posição do Sol durante o dia. A partir disso, pode-se exibir o comportamento desejado da linha de espelho, exemplificado na Figura 5.22.

Essa movimentação deve ocorrer durante o seu período de funcionamento, ou seja, durante o dia. Com o rastreamento da posição do Sol em utilização e levando em consideração que a angulação do Sol se modifica

aproximadamente  $0,25^\circ$  a cada minuto, a atualização da posição do espelho deve ocorrer periodicamente no intervalo de 30 segundos para evitar o desvio do seu reflexo.

Figura 5.22: Movimentação esperada do sistema.



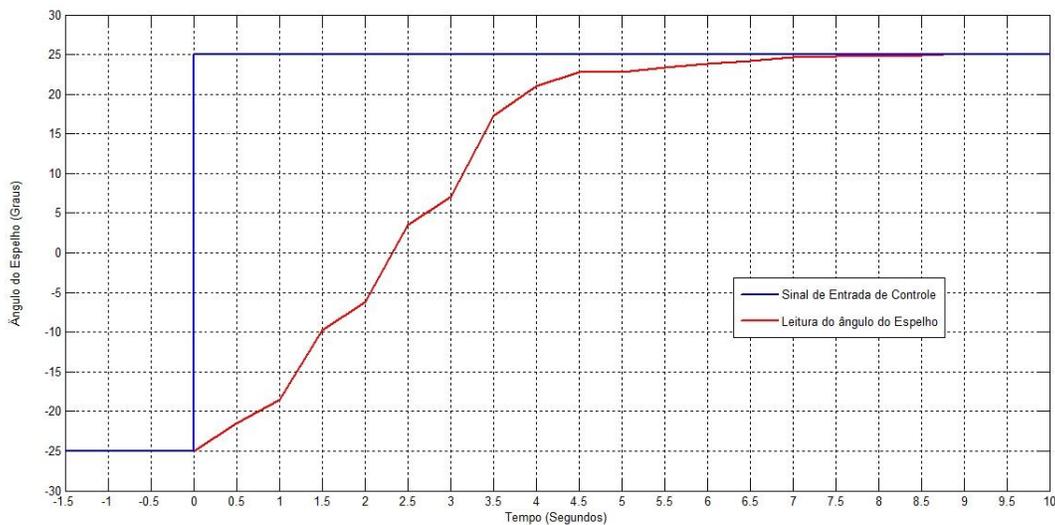
Fonte: Elaboração própria.

O primeiro teste realizado é com o intuito de certificar que o controle proposto é eficiente para a aplicação. Como resultado de uma resposta degrau onde o sistema se encontra com o espelho inclinado a  $-25^\circ$ , sendo enviado um ângulo de referência de  $25^\circ$  do controlador implementado pode ser observada na Figura 5.23 (a).

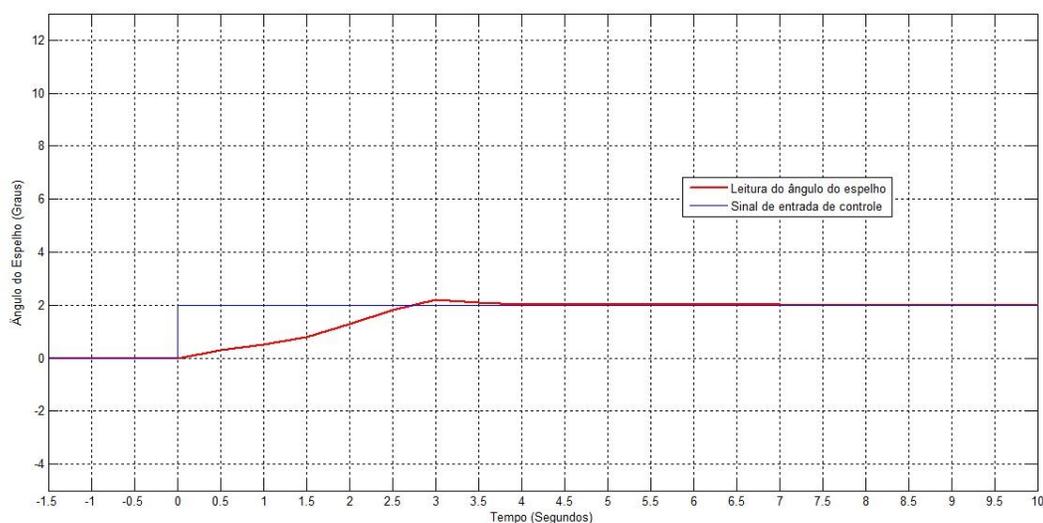
Analisando o gráfico gerado na Figura 5.23 (a) nota-se pequenas divergências na inclinação da curva em alguns trechos, o que ocorre devido à dificuldade pontuais quando o tempo de acionamento do motor é grande, dificultando a atualização do sensor de posição ou para ângulos maiores que  $20^\circ$  na movimentação do sistema de tração da linha de espelho, composta de um fio no *nylon* ligando o motor e o eixo de rotação da linha.

Na Figura 5.23 (b) tem-se a resposta degrau quando a linha de espelho está inclinada em  $0^\circ$ , tendo como ângulo de referência  $15^\circ$ . Esta segunda situação é mais próxima da realidade, uma vez que a correção feita entre os intervalos de atualização do rastreamento abrange diferenças da ordem de décimos de graus.

Figura 5.23: Resposta degrau do controlador para: (a) ângulo inicial de  $-25^\circ$  e ângulo de referência de  $25^\circ$  (b) ângulo inicial de  $0^\circ$  e ângulo de referência de  $2^\circ$



(a)



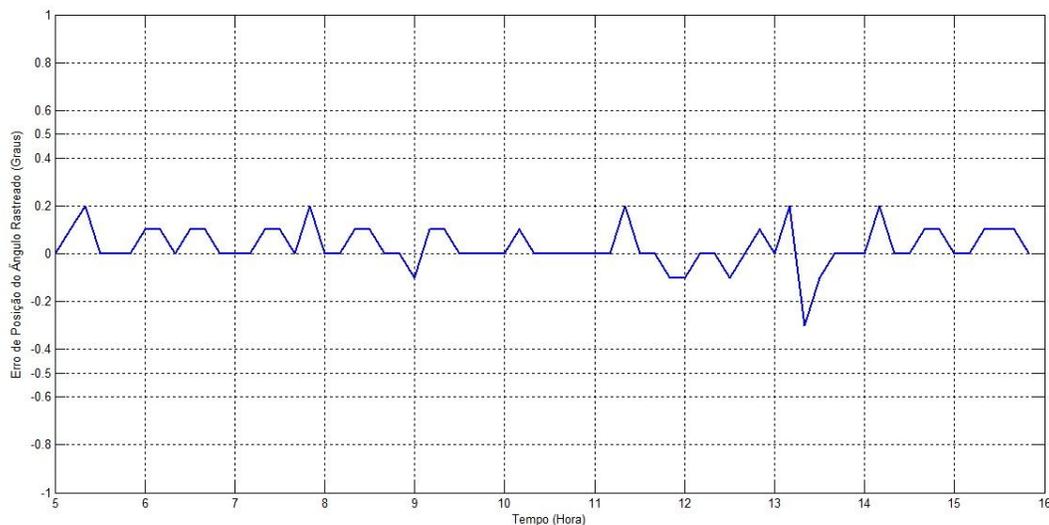
(b)

Fonte: Elaboração própria.

O teste seguinte visa a obter o valor do erro entre a medida esperada do ângulo solicitado e o rastreamento ocorrido durante um dia. Quanto menor o erro obtido, maior é a confiança do controle desenvolvido.

Dessa maneira a Figura 5.24 exibe este erro no decorrer do dia 05/03/2015, levando em consideração um absorvedor instalado a um ângulo de  $60^\circ$  em relação à linha de espelho.

Figura 5.24: Erro de Posição do Ângulo de Rastreamento.



Fonte: Elaboração própria.

A partir da análise da Figura 5.24, constata-se que o erro máximo obtido é de  $0,3^\circ$ , além de notar que a maior concentração do erro ocorre quando há necessidade da linha de espelho estar com inclinações maiores que  $20^\circ$ . Contudo, o erro médio obtido é de aproximadamente  $0,029^\circ$ .

### 5.6.2 Teste do rastreamento no protótipo

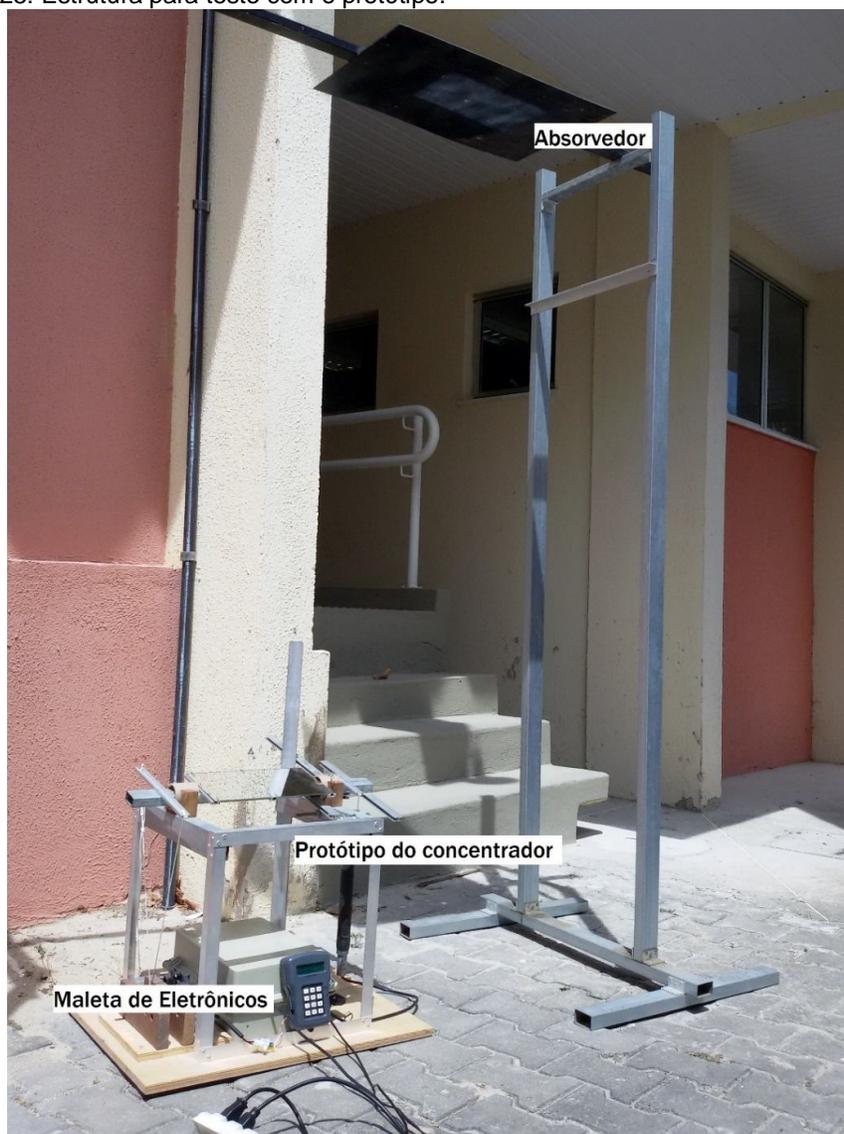
Após ter a rotina de rastreamento totalmente implementada, levou-se o protótipo para um local exposto ao Sol com o intuito de testá-lo. Posicionou-se o eixo do espelho do protótipo e, com o auxílio de uma estrutura de sustentação, uma placa pintada de preto para assumir o papel de absorvedor, conforme a Figura 5.25.

Depois de ter o sistema alinhado no sentido Norte-Sul, calibrou-se o protótipo com a finalidade de mitigar erros oriundos da falta de nivelamento do sistema.

Após deixar o sistema operacional, iniciou-se o *software* em um computador conectado ao protótipo e configurou-se os dados necessários para a correta comunicação serial. Inseriu-se, também, os dados relativos à disposição do sistema, como altura e distância do absorvedor, a Latitude e Longitude, necessários para seu funcionamento.

Ao iniciar a rotina de posicionamento da linha de espelho é realizada a primeira atualização do sistema, onde é localizada a angulação correta para poder refletir o Sol no absorvedor. As seguintes atualizações ocorrem para poder corrigir a angulação da linha de espelho de acordo com a movimentação do Sol entre os espaços de tempo em que o espelho ficava em repouso.

Figura 5.25: Estrutura para teste com o protótipo.



Fonte: Elaboração própria.

Durante os testes realizados, o reflexo do Sol permaneceu dentro da área do absorvedor delimitada como exibido na Figura 5.26. O teste demonstra a capacidade do sistema em conseguir manter o reflexo dos raios solares em um absorvedor.

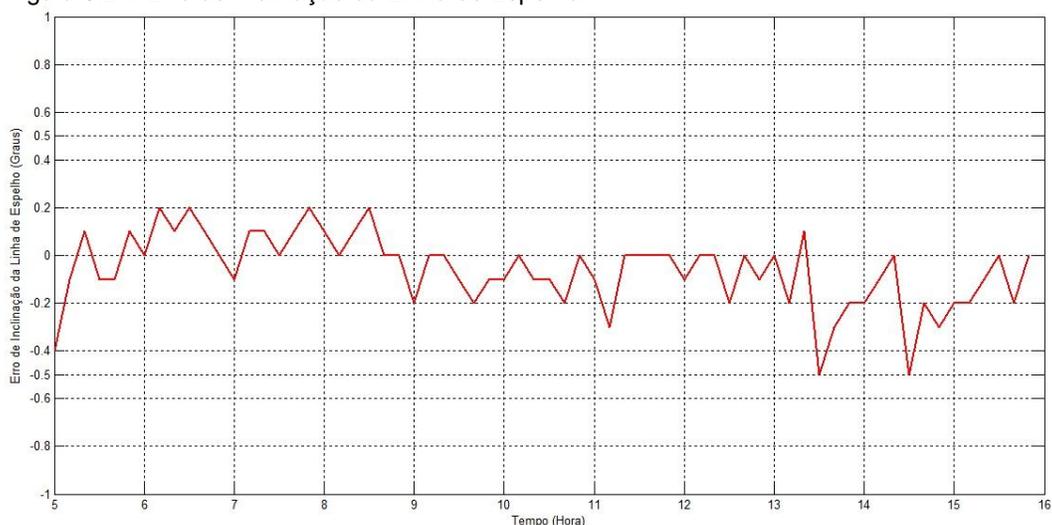
Figura 5.26: Reflexo do Sol no absorvedor.



Fonte: Elaboração própria.

Prosseguindo com a validação do sistema, realizou-se o cálculo do erro referente à inclinação da linha de espelho. Desse modo quanto menor o erro obtido, maior é a precisão alcançada pelo sistema de rastreamento desenvolvido. A Figura 5.27, realizada com os dados obtidos do dia 05/03/2015, adota o ângulo de  $60^\circ$  como o ângulo do absorvedor.

Figura 5.27: Erro de Inclinação da Linha de Espelho.

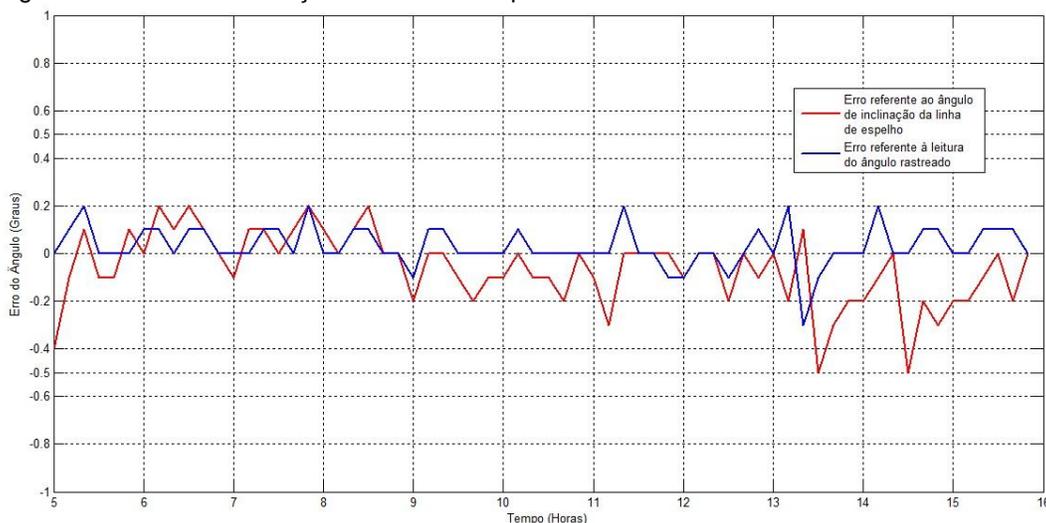


Fonte: Elaboração própria.

Avaliando a curva obtida na Figura 5.27, o maior desvio encontrado é de  $0,5^\circ$ , ocorrido quando a inclinação da linha de espelho está localizada em ângulos maiores que  $20^\circ$ . O erro encontrado, tomando como base o limite estabelecido para o desenvolvimento do projeto, é condizente à resposta esperada do sistema aos estímulos aplicados. Finalizando a análise, o erro médio é de próximo a  $0,063^\circ$ .

Sobrepondo os dois gráficos de erro encontrados, expresso na Figura 5.28, nota-se que o erro de inclinação da linha de espelho é ligeiramente maior que o erro de posição do ângulo de rastreamento, o que é esperado uma vez que o erro no ângulo do espelho é função da posição rastreada pelo controlador.

Figura 5.28: Erro de Inclinação da Linha de Espelho.



Fonte: Elaboração própria.

Além do rastreamento periódico ocorrido devido à movimentação do Sol, o controlador demonstrou a capacidade de retornar ao valor correto caso haja alguma perturbação gerada por um agente externo que desvie o reflexo do absorvedor, como por exemplo algo esbarre na linha de espelho.

Com a aplicação destes testes, conseguiu-se validar o sistema de automação desenvolvido, desde a movimentação e os componentes eletrônicos utilizados, assim como o controlador empregado, ambos atuando conforme os padrões previamente definidos no decorrer do trabalho.

## 6 CONCLUSÕES

Como um dos principais motivadores no desenvolvimento do protótipo de concentrador, a necessidade da diversificação da matriz energética brasileira nos leva a busca pelo desenvolvimento de um sistema para gerar energia térmica ou elétrica a partir do Sol. Com isso a escolha da metodologia a ser empregada na confecção do concentrador solar é de extrema importância. A escolha de concentradores do tipo Fresnel linear na presente pesquisa deve-se principalmente à facilidade de utilização de espelhos planos. Devido a ser estreito, o espelho tende a sofrer menos com a ação dos ventos aumentando sua estabilidade, além de possuir uma estrutura leve e de simples montagem.

O sensor desenvolvido e utilizado para a medição do deslocamento da linha de espelho no protótipo foi projetado para suprir a necessidade de um dispositivo que interpretasse o movimento esperado com uma alta robustez e sem esquecer a resolução, precisão e repetitividade, características indispensáveis para a obtenção de êxito no projeto. O desenvolvimento do sensor se mostrou eficaz, com outros componentes instalados no sistema e na interpolação usada, realizando de maneira correta os testes no protótipo. O tempo de atualização da leitura do valor interpretado pelo sensor chega em torno de 500 ms. Entretanto, não possui muito impacto no projeto uma vez que trata-se de um sistema lento, com variações de  $0,25^\circ$  a cada minuto durante o dia. Outro ponto com que deve-se observar é que cada sensor confeccionado possui medições diferentes, devendo ser feita a calibração a cada substituição ou sempre que houver necessidade.

Os resultados apresentados na leitura correta do ângulo pelo sensor com a divisão da faixa de atuação do sensor em intervalos e a realização de uma interpolação de primeira ordem em cada uma destas apresentou um erro médio de aproximadamente  $0,03^\circ$ . Isso deve-se pelo fato do sensor ser projetado apresentando espontaneamente uma característica aproximadamente linear. Para a validação do funcionamento do sensor de posição utilizado, realizou-se uma correção em função da variação de temperatura. A correção empregada forneceu um erro máximo de  $0,3^\circ$ , dentro do limite de  $0,5^\circ$  admitido pelo projeto.

A escolha da realização do rastreamento da posição solar a partir de um equacionamento matemático mostrou-se confiável, uma vez que os instrumentos utilizados não possuem precisão para detectar o erro, não influenciando na aplicação. A partir da virtualização do rastreamento diminuiu-se a probabilidade de defeitos, devido a utilização de componentes físicos passíveis de falhas na leitura do sensor de posição, diminuindo a necessidade de manutenção. Um problema deste método está relacionado à inserção errônea de dados no aplicativo de rastreamento, como a data e hora e a posição geográfica, provocando distorções no cálculo do rastreamento.

No que diz respeito à escolha do controlador, tem-se que o fato de ser possível a identificação de uma variável prontamente mensurável e correlata à dinâmica do projeto, no caso o passo do motor que movimenta a linha de espelho, fez com que o foco se voltasse à técnica de escalonamento de ganho. A compensação das modificações no sistema é realizada de acordo com a alteração do parâmetro de controle escolhido, analisando as condições de operação. Experimentalmente caracterizou-se as variações do ganho de acordo com a leitura das variáveis do sistema. Com isso, é fácil notar que a escolha da técnica de escalonamento de ganho é adequada devido possuir uma variável para realizar o escalonamento, além de fornecer respostas condizentes às esperadas para o projeto e simples implementação. Os valores obtidos para os ganhos mostraram-se eficazes uma vez que o rastreamento da variável é realizado de maneira a não exceder o tempo limite da aplicação e com uma precisão de 0,5%.

Observou-se que considerando uma espera de cerca de 500 ms para a atualização do valor medido pelo sensor, em situações onde a variação do ângulo seja grande, por exemplo de  $-25^{\circ}$  a  $25^{\circ}$ , o posicionamento do espelho para o ângulo correto não demora mais que 20 segundos, tempo suficiente pois não há interesse em atualizar o sistema com menos de 30 segundos, visto que a movimentação do Sol quase não ocorre em intervalos de tempo pequenos.

O programa desenvolvido com o intuito de manejar o microcontrolador, englobando também a implementação do controlador escalonador de ganho, tem a finalidade de administrar as funções mais básicas

do sistema, como a movimentação do motor, leitura dos sensores, a calibração do sistema, o protocolo de comunicação com outros *softwares* e a rotina de rastreamento. De maneira geral, o programa desenvolvido conseguiu suprir as necessidades impostas pelo projeto, como a movimentação da linha de espelho, a calibração e o rastreamento, atingindo seu objetivo principal. Entretanto, o *software* desenvolvido para uso em um computador, tem como princípio básico o cálculo da posição solar e o envio do ângulo formado entre o plano horizontal e o Sol, com vértice na linha de espelho posicionada no eixo norte-sul, para o microcontrolador. Com isso, foi implementado também o protocolo para comunicação. O *software* que realiza o cálculo de rastreamento do ângulo do Sol solicita algumas informações imprescindíveis para liberar a utilização das funções. A instrução de rastreamento solar pode ser de forma automática, com atualizações a cada 30 segundos, ou manual.

Desta forma, os testes realizados comprovam a funcionalidade do projeto através da constatação do erro máximo na inclinação da linha de espelho ser  $0,5^\circ$ , conseguindo realizar o rastreamento do Sol e movimentar sua linha de espelho de maneira a refletir a luz solar no absorvedor. Com isso, percebe-se que a proposta do trabalho, que compreende a validação e automação de um protótipo de um concentrador solar Fresnel linear é alcançada.

## **6.1 Trabalhos Futuros**

Como trabalho futuro, deseja-se realizar a migração do sistema do protótipo para o sistema real, colocando todas as linhas de espelhos em pleno funcionamento, sendo cada microcontrolador responsável pelo controle de duas linhas. Isso engloba a configuração e instalação de todos os controladores, sensores e motores do sistema real, assim como suas devidas calibrações.

Espera-se poder aprimorar o sistema ainda mais, com uma maior automação do sistema, inserindo um outro microcontrolador para atuar como mestre, gerindo o funcionamento dos demais microcontroladores que irão movimentar diretamente os motores das linhas de espelhos. Este

microcontrolador-mestre deverá possuir, além dos dados já inseridos nos *softwares* utilizados, a data e a hora para uma completa independência do sistema, podendo funcionar de forma autônoma apenas necessitando de interferência no caso de manutenção.

Após essas modificações, planeja-se a realização de um teste mais completo e de longa duração, utilizando todas as linhas de espelhos e tomando como período de funcionamento as horas de iluminação solar plena, com o intuito de realizar uma análise da performance do sistema e correções de eventuais erros, além de analisar também a variação de temperatura ocorrida no absorvedor no decorrer do teste.

Com intuito de facilitar a vida do usuário planeja-se utilizar um segundo software voltado para os dispositivos móveis que utilizam a plataforma Android, a partir da IDE Eclipse, na linguagem de desenvolvimento Java Android. As funcionalidades e sua inserção de dados é bastante semelhante ao primeiro software desenvolvido. Com a sua implementação já iniciada, utiliza-se o GPS do dispositivo móvel para adquirir sua latitude e longitude, aumentando a precisão e confiabilidade desse dado.

A comunicação entre a aplicação e o software será realizada através do protocolo de comunicação *bluetooth*. Para tornar o hardware do projeto compatível a este protocolo, adicionou-se um módulo *bluetooth* serial HC-06, que adapta os protocolos serial e *bluetooth* sem grandes modificações no sistema.

Modificações visando deixar mais simples a maneira de inserir os dados relativos ao absorvedor sem a necessidade de medir a altura e distância deste à linha de espelho são almejadas. A inserção de rotinas de manutenção também é planejada para facilitar a correção de possíveis defeitos. Também é de se esperar que surjam mais funcionalidades a serem utilizadas conforme exigências expostas em avaliações mais profundas.

Alguns dos resultados apresentados neste trabalho podem ser encontrados na publicação:

NEGREIROS, I. S. REIS, L. L. N. DAHER, S. Sensor de Posição Indutivo de Alta Resolução e Baixo Busto. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE

AUTOMÁTICA, XX, 2014, Belo Horizonte. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática**. Belo Horizonte, 2014. p. 486-491.

## **BIBLIOGRAFIA**

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília. 3ª Ed. 2008. 236p.

ALMEIDA, G. S. M. **Pesquisa e Desenvolvimento de um Sistema Termoelétrico do tipo *Linear Fresnel Reflector***. 2013. Dissertação

(Mestrado em Energias Renováveis – Conversão Elétrica e Utilização Sustentável) - Faculdade de ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

ASTRÖM, K. J. HÄGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design, and Tuning**, 2º Ed. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society. 1995.

ASTRÖM, K. J. WITTENMARK B. **Adaptive Control**. 2º Ed. Addison-Wesley. 1995.

BRASIL. Resolução Normativa N°482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Brasília, DF. 2012.

BURGI, A. S. **Avaliação do potencial técnico de geração elétrica termossolar no brasil a partir de modelagem em sig e simulação de plantas virtuais**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Mestrado em Planejamento Energético. Rio de Janeiro. 2013.

CANAVARRO, D. C. S. **Modelização de campos de colectores Solares lineares do tipo Fresnel: aplicação a um concentrador inovador do tipo CLFR**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física Tecnológica) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

CARVALHO, P. **Geração eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003. 146p.

CARVALHO, P.; BORGES NETO, M. R. **Geração de energia elétrica: Fundamentos**. 1. Ed. São Paulo: Érica, 2012. 158p.

CRESEB. **Tutorial de Geracão Heliotérmica**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=561>>. Acesso em 13 novembro 2014.

CSP WORLD. **Concentrated Solar Power and Renewable Energy news**. Disponível em: <<http://www.csp-world.com/cspworldmap/projeto-helioterm>> Acesso em: Fevereiro de 2015.

DAHER, Sérgio. **Desenvolvimento de um Concentrador Fresnel Linear para Aproveitamento da Energia Solar**. Fortaleza: CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico; 22 de maio de 2012.

DANISI, A.; MASI, A.; LOSITO, R.; PERRIARD, Y., "**Electromagnetic model of an ironless inductive position sensor**", In: Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International, pp.69,74, 13-16. 2012a.

DANISI, A.; MASI, A.; LOSITO, R.; PERRIARD, Y., "**Modelling and compensation of thermal effects on an Ironless Inductive Position Sensor**", In: Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE , pp.2149,2156, 15-20. 2012b.

DORF, R. C. Bishop R. H. **Sistemas de Controle Modernos**, 8ª Ed. 2001. LTC – Livros Tecnicos e Científicos Editora S.A.

ELETROBRAS. **Na trilha da Energia**. Disponível em: <<http://www.eletrabras.com/elb/trilhadaenergia/main.asp>>. Acesso em: 6 de novembro de 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) E MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS (MME). **Balanco energético nacional 2014 – ano base 2013**. Rio de Janeiro. 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) E MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS (MME). **Balanco energético nacional 2013 – ano base 2012**. Rio de Janeiro. 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) E MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS (MME). **Plano decenal de expansão de energia 2020**. Brasília. 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 28 de novembro de 2013.

FERREIRA, C. **Estudo Comparativo entre as Técnicas de Controle Fuzzy, PI e Adaptativo Aplicado ao Processo de Fabricação de Papel Reciclado Utilizando a Ferramenta Delta Tune**. Universidade Estadual de Londrina. Mestrado em Engenharia Elétrica. Londrina. 2009.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). **Atlas Solarimétrico do Ceará 1963 – 2008**. Fortaleza. 2010. 94p.

GOLBY, J. Sensor Review. **Advances in inductive position sensor technology**. Cambridge. 30/2, pp. 142–147. 2010.

GOODWIN, G. C. Graebe S. F. Salgado, M. E. **Control System Design**, 1ª Ed. Prentice Hall. 2000.

HAYT, W. H.; Buck, J. A. **Eletromagnetismo**, LTC, 6ª Ed. 2003.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerias e termos associados**. 1ª Ed. 2012

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Renewable Energy Technologies - Cost Analysis Series: **Concentrating solar Power**. v.1: Power Sector, n. 2/5, Junho, 2012.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA), IEA-ETSAP. **Concentrating solar Power: Technology Brief**. 2013.

KALOGIROU, S. A. **solar energy engineering: processes and systems**. 1ª ed. Academic Press, Elsevier, EUA, 2009.

MALAGUETA, D. C., SORIA, R., SZKLO, A. S., DUTRA, R. M., SCHAEFFER, R. **Análise do uso de gás natural na hibridização de plantas termosolares (CSP) na bacia do São Francisco (BA)**. In: Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2012, Rio de Janeiro. Anais da Rio Oil & Gas Expo and Conference. 2012.

MENDES, F. J. JOYCE, A. GIESTAS, M. HORTA, P. BRITES, M. J. **Armazenamento de energia solar térmica**. Lisboa: LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 22p, 2010.

MICROCHIP Technology Inc. PIC16F882/883/884/886/887 Data Sheet: folha de dados do PIC16F884, DS41291D, 2007.

MICROCHIP Technology Inc. PICkit™ 3 Programmer/Debugger User's Guide. DS51795B, 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 7 de novembro de 2013.

MOYA, E. Z. **Estudo Preliminar del Estado del Arte de los Sistemas Solares Térmicos de Concetración – Proyecto Solefex**. CIEMAT – Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas; Ministérios de Economia y Competitividade – Gobierno de España. 2013.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia do Controle Moderno**, 5ª Ed. Pearson Prentice Hall. 2010.

PACHECO, F. Energias Renováveis: breves conceitos. **Conjuntura & Planejamento**, Salvador, v. 1, n. 149, p. 4-11, out. 2006.

PIGOZZO, V. C. **Análise Experimental de um Sistema solar com Concentrador Cilíndrico Parabólico**. Universidade Federal de Santa Catarina. Mestrado em Engenharia Mecânica. Florianópolis. 2013.

REININGER, T. Welker, F. Von Zeppelin, M. **Sensors and Actuators. Sensors in position control applications for industrial automation**. Esslingen, A 129, pp. 270–274, 2006.

SILVA JR., Vidal P. **Microcontroladores PIC 16F e 18F: teoria e prática**. Instituto Newton C Braga (NCB). 1ª Edição. São Paulo. 2013

TRÍPOLE, E. C. S. **Potencial de utilização de fibras óticas no desenvolvimento de concentradores Solares**. 2004. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

TUBOSOL PE2. **Usina solar Fresnel Linear Puerto Errado 2**. Disponível em: <<http://www.puertoerrado2.com/>>. Acesso em 15 abril 2014.

WEBSTER, J. G; et. al. **Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook**. CRC Press LCC. 1999.

WONG, F. Y. **Inductive Position/Velocity Sensor Desing and Servo Control of Linear Motor**. Master of Science in Mechanical Engineering – Departament of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Tecnology, Massachusetts, 1995.

## **APÊNDICE A – ROTINAS BÁSICAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE RASTREAMENTO NO MICROCONTROLADOR**

### **a. Interrupção para leitura do sensor**

```

//-----
//                               Interrupção
//-----
void interrupt( void ){
    tmr0|=0xC0;

    if(test_bit(intcon,TOIF)){
        clear_bit( intcon, TOIF );
        aa++;
        if(aa&0x01){
            set_bit(porta,5);
        }
        else{
            clear_bit(porta,5);
        }
    }

    CONTA_L1++;
    if(CONTA_L1&0x8000){
        CONTA_L1=0;
        PER_L1=32222;
    }
    if(PIN_L1_LEVEL){
        if(!FLAG_L1){
            DIV_L1++;
            if(DIV_L1>NDIV_L1){
                PER_L1=CONTA_L1;
                CONTA_L1=0;
                DIV_L1=0;
            }
        }
        FLAG_L1=1;
    }
    else{
        FLAG_L1=0;
    }
}
}

```

## b. Leitura da temperatura – conversor AD

```

//-----
//          Leitura da Temperadtura (AD)
//-----
void le_ad(void){
    unsigned char i;

    adcon0 = 0x41;
    delay_us(5);
    set_bit(adcon0,1);
    i=0;
    while(test_bit(adcon0,1)){
        i++;
        if(!i)
            break;
    }
    adh = adresh;
    adl = adresl;
    Tlm35=(int)(adh<<8)+(int)adl;
    TAVG_tmp += Tlm35;
    iTAVG++; if(iTAVG>=15){iTAVG=0; TAVG=TAVG_tmp/15; TAVG_tmp=0;}
}

```

### c. Pulso motor

```

//-----
//          Pulso Motor
//-----
void Pulso_Motor_A(unsigned char dir, int n){
    unsigned int j;

    for(j=1; j<=n; j++){
        if(!dir)
            M1R_LOW;
        else
            M1L_LOW;
    }
    M1R_HIGH;
    M1L_HIGH;
}

```

### d. Correção do ângulo a partir da temperatura

```

//-----
//          Correção de Temperatura
//-----
long AjusTemp (int Temp){
    if (Temp < 50) return (280);
    else if (Temp >= 50) return (385);
}

```

### e. Interpolação dos dados de sensor para gerar o ângulo

```
//-----  
//                               Interpolação Ângulo  
//-----  
long interpola (long x){  
    long valy[5]={ -450, -200, 0, 200, 450};  
    long divisor=0,numerador=0,aux=0;  
  
    long i;  
    long yf;  
  
    if(x < valx[0])  
        return(valy[0]);  
        //return(-999);  
    if(x > valx[4])  
        return (valy[4]);  
        //return(999);  
  
    for(i=1; i<5; i++){  
        if(x >= valx[i-1] && x < valx[i]){  
            divisor = (valx[i]-valx[i-1]);  
            aux = x-valx[i-1];  
            numerador = (valy[i]-valy[i-1]);  
            yf = valy[i-1]+((aux*numerador)/divisor);  
            return(yf);  
        }  
    }  
    return(0);  
}
```

**f. Rotinas para ler e escreve na EEPROM**

```

//-----
//                               Escrever EEPROM
//-----
void eEEPROM(unsigned char dado, unsigned int endereco){

    eeadrh = ((endereco&0xff00)>>4);
    eeadr = (endereco&0x00ff);
    eedata = dado;
    clear_bit(eecon1,EEPGD);
    set_bit(eecon1,WREN);
    clear_bit(intcon,GIE);

    eecon2=0x55;
    eecon2=0xAA;
    set_bit(eecon1,WR);

    set_bit(intcon,GIE);
    delay__ms_NFT(8);
    clear_bit(eecon1,WREN);
}

//-----
//                               Ler EEPROM
//-----
unsigned char lEEPROM(unsigned int endereco){
    unsigned char dado;

    eeadrh = ((endereco&0xff00)>>4);
    eeadr = (endereco&0x00ff);
    clear_bit(eecon1,EEPGD);
    set_bit(eecon1,RD);
    dado = eedata;
    return(dado);
}

//-----
//                               Escrever Inteiro EEPROM
//-----
void eEEPROM_INT(unsigned int dado, unsigned int end){
    unsigned char byte;

    byte = (dado&0xff00)>>8; eEEPROM(byte,end);
    byte = (dado&0x00ff);   eEEPROM(byte,end+1);
}

//-----
//                               Ler Inteiro EEPROM
//-----
unsigned int lEEPROM_INT(unsigned int end){
    unsigned int msb;
    unsigned char lsb;

    msb = lEEPROM(end);
    lsb = lEEPROM(end+1);

    return((msb<<8) + lsb);
}

```

#### g. Salvar Valores Obtidos na EEPROM

```
//-----  
//           Salvando Valores EEPROM  
//-----  
void SaveValues (void){  
    int i;  
    int valor[5];  
  
    valor[0] = EEPROM_INT(0);  
    valor[1] = EEPROM_INT(2);  
    valor[2] = EEPROM_INT(4);  
    valor[3] = EEPROM_INT(6);  
    valor[4] = EEPROM_INT(8);  
  
    OFF_L1 = valor[2];  
    OFF_Tlm35 = EEPROM_INT(10);  
  
    for(i=0; i<5; i++){  
        valx[i] = valor[i] - OFF_L1;  
    }  
}
```

#### h. Tratamento, configuração, leitura e escrita na USART

```

//-----
//                               Configuração USART
//-----
void Cfg_Serial(void){// Baud 9600 @ XTAL 12 MHz Error 0,16%
    baudctl = 0x08;    //BRG16
    spbrgh = 0x00;
    spbrg = 0x4D;    //77
    txsta = 0x20;    //TXEN
    rcsta = 0xB0;    //SREN SPEN CREN
}

//-----
//                               Lê Byte
//-----
unsigned char readbyte(unsigned char* c){
    unsigned int j;
    j=65000;
    while(j--){
        if(UC_RXSTA){
            c[0] = (unsigned char)UC_RxReg;
            return(0);
        }
    }
    return(1);
}

//-----
//                               Envia Byte
//-----
unsigned char sendbyte(unsigned char c){
    unsigned int j;
    j=65000;
    while(j--){
        if(UC_TXSTA){
            UC_TxReg=c;
            return(0);
        }
    }
    return(1);
}

```

```

//-----
//          Envia Angulo Serial
//-----
void EnvAng(void){
    sendbyte((ANG&0x00ff));
    sendbyte(((ANG&0xff00)>>8));
}

//-----
//          Recebe Angulo Serial
//-----
void RecAng(void){
    unsigned char lsb, msb;
    sendbyte(0xCC);
    readbyte(&lsb);
    readbyte(&msb);
    AngSerial = (int)((unsigned int)(msb<<8) + lsb);
}

//-----
//          Limpa Serial
//-----
void LimpaSerial(){
    txsta.TXEN = 0;
    rcsta.CREN = 0;

    txsta.TXEN = 1;
    rcsta.CREN = 1;
}

//-----
//          Trata Serial
//-----
int trata_serial(void){
    unsigned char c;

    if(UC_RXSTA){
        c = UC_RxReg;
        if(c==0xAA){
            EnvAng();
            LimpaSerial();
            return(7);
        }
        else
        if(c==0xAB){
            RecAng();
            LimpaSerial();
            return(9);
        }
        else{
            sendbyte(c + 5);
            delay__ms(250);
            LimpaSerial();
            return(5);
        }
    }
    return(0);
}

```

## i. Rotina de Calibração do Sensor de Posição

```

//-----
//                               Calibração
//-----
void calibracao (void){
    unsigned int TempInic, aux, i = 0;
    int AngCali[5] = {-45,-20,0,20,45};
    unsigned int SaveMem[6] = {0,2,4,6,8,10};

    le_ad();
    TempInic = TAVG;
    apaga_lcd(); delay_ms(250);
    while(1){
        if (i==5) break;
        else{
            linha1();
            epal_lcd("Posicao "); enum_lcd(AngCali[i],2,1,0);

            aux = le_tec4();
            if (aux==COD_TEC_PLUS){Pulso_Motor_A(0,n);}
            if (aux==COD_TEC_MINUS){Pulso_Motor_A(1,n);}
            if (aux==COD_TEC_ENTER){
                le_ad();
                if (TAVG==TempInic){
                    EEPROM_INT(PER_L1, SaveMem[i]);
                    i++;
                }
                else{
                    SimuCali();
                    break;
                }
                delay_ms(250);
            }
        }
    }
    le_ad();
    if (TAVG == TempInic){ EEPROM_INT(TAVG, SaveMem[5]);}
    else{SimuCali();}
    SaveValues();
}

```

## j. Tabela do Escalonamento de Ganho

```
//-----  
//                               Escalonamento  
//-----  
void Vel(int Dif, int Angulo){  
    if ((Dif < 5 && Dif > -5) || Angulo > 449 || Angulo < -449){  
        n = 1150;  
    }  
    if ((Dif < 10 && Dif > 5) || (Dif > -10 && Dif < -5)){  
        n = 2000;  
    }  
    else if ((Dif < 25 && Dif > 10) || (Dif > -25 && Dif < -10)){  
        n = 3500;  
    }  
    else if ((Dif < 50 && Dif > 25) || (Dif > -50 && Dif < -25)){  
        n = 5500;  
    }  
    else if ((Dif < 150 && Dif > 50) || (Dif > -150 && Dif < -50)){  
        n = 12000;  
    }  
    else if (Dif > 150 || Dif < -150){  
        n = 30000;  
    }  
}
```

#### k. Rotina de Rastreamento

```

//-----
//                               Rastreamento
//-----
void Traking (int AngFoco){
    int y = 1;
    int k, Dif;

    apaga_lcd();
    while(y){
        if(ANG == AngFoco){
            delay_ms(250);
            Val_Int = PER_L1-Var_Aux-OFF_L1;
            ANG = (int) interpola(Val_Int);
            delay_ms(250);
            if (ANG == AngFoco){
                y=0;
                n = 5000;
                break;
            }
        }
        else if (ANG > AngFoco)
            k = 0;
        else
            k = 1;

        Dif = AngFoco - ANG;
        Vel(Dif, ANG);
        Pulso_Motor_A(k,n);

        delay_ms(100);

        linha1();
        epal_lcd("Ang:");
        linha2();
        enum_lcd(ANG,3,1,1);
        epal_lcd(" -> "); enum_lcd(AngFoco,3,1,1);
        delay_ms(250);
        le_ad();
        Delta_T = TAVG-OFF_T1m35;
        Var_Aux = Var_Temp*Delta_T/100;
        Val_Int = PER_L1-Var_Aux-OFF_L1;
        delay_ms(250);
        ANG = (int)interpola(Val_Int);

        if (ANG == AngFoco){
            delay_ms(250);
        }
    }
    apaga_lcd();
}

```

**a. Visão geral**

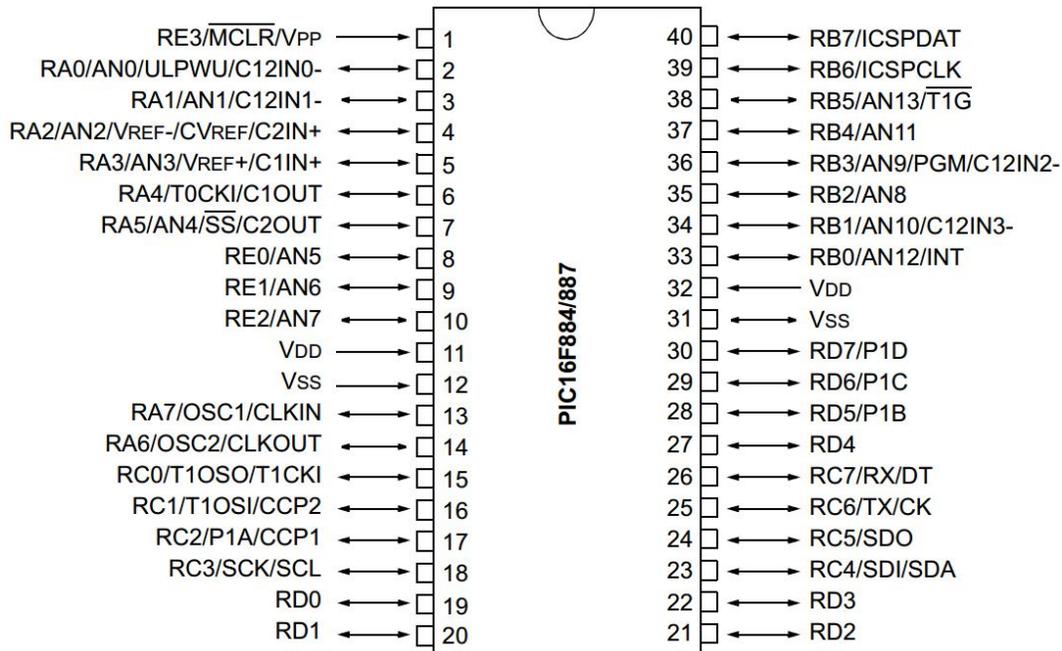
Como uma das características principais do 16F884 aponta-se uma vasta gama de periféricos compondo internamente sua estrutura. Dentre esses pode-se destacar as seguintes especificações:

- 35 Pinos de O/I com direcionamento único;
- Memória para programação com 4096 palavras;
- Memória de dados dividida:
  - 256 bytes de SRAM;
  - 256 bytes de EEPROM;
- 14 canais para conversão A/D com 10 bits de resolução;
- 1 EUSART;
  - Suporte aos protocolos RS-485, RS-232 e LIN 2.0;
  - Detecção Automática de Baud;
- Suporte para I<sup>2</sup>C nos modos mestre e escravo e para SPI em todos os 4 modos;
- 2 Módulos Analógicos de comparadores;
- Três interrupções por Timer:
  - Timer0 – temporizador/contador de 8 bits;
  - Timer1 – temporizador/contador de 16 bits;
  - Timer2 – temporizador de 8 bits;
- ICSP – In-Circuit Serial Programming;

**b. Pinagem do microcontrolador**

A pinagem do microcontrolador PIC16F884 é exibida na Figura 1 deste anexo. Suas funcionalidades são descritas a seguir.

Figura 1 - ANEXO: Pinagem do microcontrolador PIC16F884.



Fonte: MICROCHIP, 2007.

- Pino 1 (RE3/MCLR/V<sub>PP</sub>) – Porta I/O (Porta E) ou *Master Clear Reset*.
- Pino 2 (RA0/AN0/ULPWU/C12IN0-) – Porta I/O (Porta A), entrada analógica ADC, entrada analógica negativa para o comparador C1/C2 ou entrada para o *Ultra Low-Power Wake-up*.
- Pino 3 (RA1/AN1/C12IN1-) – Porta I/O (Porta A), entrada analógica ADC ou entrada analógica negativa para o comparador C1/C2.
- Pino 4 (RA2/AN2/V<sub>REF-</sub>/CV<sub>REF</sub>/C2IN+) – Porta I/O (Porta A), entrada analógica ADC, entrada de tensão de referência negativa para ADC e CV<sub>REF</sub>, saída da tensão de referência do comparador ou entrada analógica positiva para o comparador C2.
- Pino 5 (RA3/AN3/V<sub>REF+</sub>/C1IN+) – Porta I/O (Porta A), entrada analógica ADC, entrada de tensão de referência positiva para ADC e CV<sub>REF</sub> ou entrada analógica positiva para o comparador C1.
- Pino 6 (RA4/T0CKI/C1OUT) – Porta I/O (Porta A), entrada de *clock* para o Timer0 ou saída digital do comparador C1.
- Pino 7 (RA5/AN4/SS/C2OUT) – Porta I/O (Porta A), entrada analógica ADC, entrada de seleção de escravo ou saída digital do comparador C2.
- Pino 8 (RE0/AN5) – Porta I/O (Porta E) ou entrada analógica ADC

- Pino 9 (RE1/AN6) – Porta I/O (Porta E) ou entrada analógica ADC
- Pino 10 (RE2/AN7) – Porta I/O (Porta E) ou entrada analógica ADC
- Pino 11 (V<sub>DD</sub>) – Pino de alimentação.
- Pino 12 (V<sub>SS</sub>) – Pino de Terra.
- Pino 13 (RA7/OSC1/CLKIN) – Porta I/O (Porta A), conexão do cristal/ressonador ou entrada do *clock*.
- Pino 14 (RA6/OSC2/CLKOUT) – Porta I/O (Porta A), conexão do cristal/ressonador ou saída do *clock*.
- Pino 15 (RC0/T1OSO/T1CKI) – Porta I/O (Porta C), saída do oscilador do Timer1 ou entrada do *clock* do Timer1.
- Pino 16 (RC1/T1OSI/CCP2) – Porta I/O (Porta C), entrada do oscilador do Timer1 ou entrada de captura e saída de comparação do comparador C2.
- Pino 17 (RC2/P1A/CCP1) – Porta I/O (Porta C), saída do PWM ou entrada de captura e saída de comparação do comparador C1.
- Pino 18 (RC3/SCK/SCL) – Porta I/O (Porta C), *clock* do SPI ou *clock* do I<sup>2</sup>C.
- Pino 19 (RD0) – Porta I/O (Porta D).
- Pino 20 (RD1) – Porta I/O (Porta D).
- Pino 21 (RD2) – Porta I/O (Porta D).
- Pino 22 (RD3) – Porta I/O (Porta D).
- Pino 23 (RC4/SDI/SDA) – Porta I/O (Porta C), I/O de dados do SPI ou do I<sup>2</sup>C.
- Pino 24 (RC5/SDO) – Porta I/O (Porta C) ou saída de dados da serial.
- Pino 25 (RC6/TX/CK) – Porta I/O (Porta C), saída serial assíncrona ou I/O do *clock* síncrono.
- Pino 26 (RC7/RX/DT) – Porta I/O (Porta C), entrada serial assíncrona ou I/O de dados seriais síncronos.
- Pino 27 (RD4) – Porta I/O (Porta D).
- Pino 28 (RD5/P1B) – Porta I/O (Porta D) ou saída PWM.
- Pino 29 (RD6/P1C) – Porta I/O (Porta D) ou saída PWM.
- Pino 30 (RD7/P1D) – Porta I/O (Porta D) ou saída PWM.

- Pino 31 ( $V_{SS}$ ) – Pino de Terra.
- Pino 32 ( $V_{DD}$ ) – Pino de alimentação.
- Pino 33 (RB0/AN12/INT) – Porta I/O (Porta B), entrada analógica ADC ou interrupção disparada por borda externa.
- Pino 34 (RB1/AN10/C12IN3-) – Porta I/O (Porta B), entrada analógica ADC ou entrada analógica do comparador C1/C2.
- Pino 35 (RB2/AN8) – Porta I/O (Porta B) ou entrada analógica ADC.
- Pino 36 (RB3/AN9/PGM/C12IN2-) – Porta I/O (Porta B), entrada analógica ADC, pino de habilitação da programação serial *Low-voltage In-Circuit* ou entrada analógica do comparador C1/C2.
- Pino 37 (RB4/AN11) – Porta I/O (Porta B) ou entrada analógica ADC.
- Pino 38 (RB5/AN13/T1G) – Porta I/O (Porta B), entrada analógica ADC ou entrada da porta do Timer1.
- Pino 39 (RB6/ICSPCLK) – Porta I/O (Porta B), *clock* da programação serial *In-Circuit*.
- Pino 40 (RB7/ICSPDAT) – Porta I/O (Porta B), dados da programação serial *In-Circuit*.