

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**Marcio Freitas Dutra**

**Utilização da Plataforma Arduino para Instrumentação de um Coletor Solar  
Aquecedor de Ar**

**Bagé, 2014**



**MARCIO FREITAS DUTRA**

**Utilização da Plataforma Arduino para Instrumentação de um Coletor Solar  
Aquecedor de Ar**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente.

Orientador: Professor Dr. Allan Seeber

**Bagé, 2014**

**MARCIO FREITAS DUTRA**

**Utilização da Plataforma Arduino para Instrumentação de um Coletor Solar  
Aquecedor de Ar**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26, Agosto de 2014.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Allan Seeber  
Orientador  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Jocemar Parizzi  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes  
(UNIPAMPA)

Dedico este trabalho a minha família. Ao meu Pai Valdecir Moreira Dutra, minha mãe Lidia Freitas e meu irmão Mauricio Freitas Dutra. Sem eles nada do que faço seria possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a minha família, sempre acreditaram na minha capacidade e incentivaram meus estudos. Agradeço ao professor Allan Seeber, seu interesse e conhecimento foram imprescindíveis para a realização desse trabalho. Agradeço a todos os técnicos envolvidos na realização deste trabalho, todos demonstraram vontade de ajudar nas horas necessárias. Agradeço aos colegas e professores que de alguma forma ajudaram na realização deste trabalho. Agradeço a minha tia Maria de Fátima, seu amparo foi importante em muitos momentos. Agradeço a minha noiva Cristiane Bittencourt, minha grande companheira nesta longa caminhada.

“A força de uma sociedade está em sua capacidade de controlar pequenos e grandes fluxos de energia”.

ALVIN TOFFLER

## RESUMO

Uma das alternativas para diminuir o consumo de energia elétrica em residências e indústrias que necessitam de aquecimento de ar é utilizar a energia solar. O sol é uma fonte de energia que tem sido explorada cada vez mais para o aquecimento de fluidos tais como água e ar. A tecnologia que utiliza o coletor solar para aquecimento de fluidos já é bem estudada e difundida na comunidade científica, sendo que muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos nesta área. Este presente trabalho realizou a instrumentação de um coletor solar plano projetado para funcionar como aquecedor de ar. A construção do coletor solar nesse estudo faz parte do trabalho, porém, o objetivo principal do trabalho foi realizar uma instrumentação confiável para um coletor solar térmico (Aquecedor de ar). Para isto foi utilizado ferramentas de fácil aquisição para qualquer aluno, hardwares e softwares de baixo custo e fácil acesso como o sensor LM35 e o Microsoft Excel, e livres como Arduino e PLX-DAQ. Para a aquisição de dados confiáveis o sistema exigiu um filtro físico, os dados foram refinados através de um filtro digital e foram considerados confiáveis para análise de um coletor solar térmico.

Palavras-Chave: energia solar, coletor solar térmico, instrumentação, hardwares e softwares acessíveis, dados confiáveis.

## **ABSTRACT**

One of the alternatives for reducing the consumption of electricity in homes and industries that require heating of air is to use solar energy. The Sun is energy source that has been exploited increasingly for the heating of fluids such as water and air. The technology used by solar collector for heating fluids already is well studied and widely used in scientific community, and many studies have been developed in this area. This present work carried out the instrumentation of a solar collector plan designed to work as an air heater. The instrumentation consisted of the installation of temperature sensors connected to a platform of open source code. It was built a solar collector for experimental assembly. Were used tools for easy purchase for any student, hardware and software, low cost and easy access as the sensor LM35 and Microsoft Excel, and free as Arduino and PLX-DAQ. To improve the quality and accuracy of measured signals were constructed two filters, a digital and a physical one.

Keywords: solar energy, solar thermal collector, instrumentation, accessible hardware and softwares, reliable data

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Média Global de Radiação Solar Incidente no Plano Horizontal.....	18
Figura 2- Fluxograma das aplicações práticas de energia solar .....	19
Figura 3- A estrutura do Sol .....	21
Figura 4- Relação Terra-Sol.....	22
Figura 5- Espectro eletromagnético .....	23
Figura 6- Movimento da Terra em torno do Sol e as estações do ano.....	24
Figura 7- Quantidade de energia incidente em diferentes ângulos .....	25
Figura 8- Estrutura de um coletor plano .....	29
Figura 9- Transmitância do vidro em função do comprimento de onda.....	30
Figura 10- Variação da transmitância com o ângulo de incidência .....	30
Figura 11- Perdas de calor do absorvedor para o ambiente .....	33
Figura 12- Circuito de resistência equivalente.....	33
Figura 13- Curva de resposta em frequência para um filtro passa-baixa ideal .....	35
Figura 14- Circuito RC.....	35
Figura 15- Estrutura geral do filtro de Kalman.....	36
Figura 16- Sistema de aquisição de dados generalizado .....	38
Figura 17- Amostragem, quantificação e codificação de um sistema de aquisição...39	
Figura 18- Sensor LM35.....	40
Figura 19- Blocos Arduino UNO .....	41
Figura 20- Ambiente de programação.....	43
Figura 21- Interface PLX-DAQ .....	44
Figura 22- Caixa do coletor .....	45
Figura 23- Coletor solar com o acréscimo de isolantes térmicos .....	46
Figura 24- Coletor solar térmico finalizado.....	47
Figura 25- Disposição dos coolers e suas conexões .....	47
Figura 26- Apresentação dos sensores internos .....	49
Figura 27- Apresentação do sensor externo .....	49
Figura 28- Circuito filtro passa-baixas .....	50
Figura 29- Montagem do filtro passa-baixas .....	50
Figura 30- Localização do laboratório utilizado .....	51
Figura 31- Gráfico tensão aplicada X vazão de ar .....	53

Figura 32- Gráfico temperatura registrada 07/07/2014 (4 volts).....	54
Figura 33- Gráfico temperatura registrada 08/07/2014 (8 volts).....	54
Figura 34- Gráfico temperatura registrada 09/07/2014 (12 volts).....	54
Figura 35- Analise de desempenho do sistema de aquisição de dados: etapas .....	55
Figura 36- Gráfico temperatura registrada 15/08/2014 (4 volts).....	57
Figura 37- Gráfico temperatura registrada 08/08/2014 (8 volts).....	58
Figura 38- Gráfico temperatura registrada 14/08/2014 (12 volts).....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dados para ar e água a 25°C e 1 bar.....	26
Tabela 2- <i>Coolers</i> ligados em cada etapa.....	48
Tabela 3- Tensão no sistema forçado aplicada no dia .....	51
Tabela 4- Coleta de dados Teste 2 .....	52
Tabela 5- Etapa interior do edifício.....	55
Tabela 6- Etapa equilíbrio térmico.....	56
Tabela 7- Etapa interior do edifício 15/08/2014.....	57
Tabela 8- Etapa interior do edifício.....	59
Tabela 9- Etapa equilíbrio térmico.....	59

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica

CPU- Unidade Central de Processamento

IBEAS- Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento

IDE- *Integrated Development Environment*

JACEE- Jornada de Atualização em Computação, Elétrica e Eletrônica

PLX\_DAQ- *Parallax Data Acquisition*

RAM- *Random Access Memory*

ROM- *Read Only Memory*

SAD- Sistema de Aquisição de Dados

## LISTA DE SÍMBOLOS

Abreviatura	Nome	Unidade
$T$	Temperatura	[K]
$G_{sc}$	Constante Solar	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$\rho$	Densidade	$\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
$I$	Insolação Solar	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$E_z$	Ângulo Zênite	[ $\theta$ ]
$R_f$	Refletância	Adimensional
$\alpha$	Absorbância	Adimensional
$\tau$	Transmitância	Adimensional
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	$\left[\left(\frac{W}{m^2 K^4}\right)\right]$
$\eta$	Eficiência	Adimensional
$C_p$	Calor específico	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
$r$	Coefficiente de resistência Térmica	$[m^2 K / (W)]$
$h$	Coefficiente de Transferência de Calor	$[W / (m^2 K)]$
$L$	Comprimento	[m]
$K$	Coefficiente de Condutividade Térmica	$[W / (mK)]$
$V$	Velocidade	$\left[\frac{m}{s}\right]$
$\omega_c$	Frequência de Corte	[Hz]
$\omega_k$	Frequência Ruidosa	[Hz]
$X_c$	Capacitância Reativa	[ $\Omega$ ]
$G_v$	Ganho	Adimensional
$\nu_k$	Ruído do Sensor	[Hz]

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1 Objetivo geral .....	19
1.2 Objetivos específicos .....	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
2.1 O Sol .....	20
2.2 Fundamentos da radiação .....	21
2.2.1 Radiação solar durante o ano .....	23
2.2.2 Interação da radiação solar com os materiais .....	25
2.3 O coletor solar .....	27
2.3.1 Coletor de placa plana .....	28
2.3.2 Vidros .....	29
2.3.3 Desempenho de um coletor plano .....	30
2.3.4 Transferência de calor em um coletor e seus coeficientes .....	32
2.4 Filtros .....	33
2.4.1 Tipos de filtros .....	34
2.4.2 Filtro Passa-Baixas .....	34
2.4.3 Filtro Passa-Baixa RC .....	35
2.4.4 O filtro de Kalman .....	35
2.4.4.1 Algumas definições na análise do Filtro de Kalman .....	36
2.5 Sistema de aquisição de dados .....	37
2.5.1 Sensores .....	40
2.5.2 Plataforma .....	40
2.5.3 Visualização e armazenamento de dados .....	43
<b>3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO</b> .....	44
3.1 Construção do coletor solar .....	45
3.2 Montagem do sistema forçado de ar .....	47
3.2.1 Dados de vazão do sistema forçado de ar .....	48
3.3 Instalação dos sensores .....	48
3.4 Metodologia de testes com o coletor solar térmico .....	50
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	52
4.1 Construção do Coletor Solar Térmico .....	52

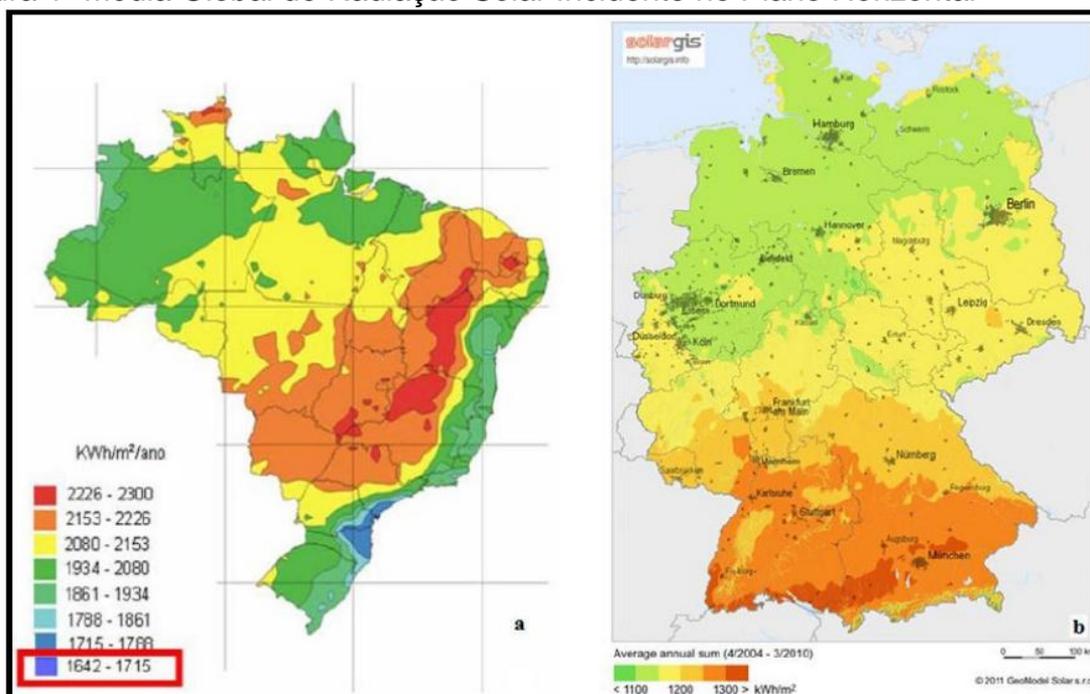
4.2 Dados de vazão de ar do sistema forçado .....	53
4.3 Resultados dos testes com o coletor solar térmico .....	53
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>59</b>
5.1 Sugestões de trabalhos futuros.....	60
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>64</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O sol é uma fonte perene, silenciosa e não poluente de energia, sendo responsável por todas as formas de vida no nosso planeta. Diariamente, o sol transmite uma grande quantidade de energia através de ondas eletromagnéticas. Ao chegar a Terra, é responsável pelos fenômenos que ocorrem na atmosfera sendo a principal fonte de energia externa que interage com os gases atmosféricos. Porém, a maior parte dessa energia não é absorvida pelos gases que compõe a atmosfera, chegando à superfície terrestre. Essa energia gera todos os processos naturais, como, por exemplo, a fotossíntese que combina a energia luminosa do sol com o dióxido de carbono da atmosfera para armazenar energia nas plantas. A energia a partir do sol é uma grande e inesgotável fonte de recursos. Uma vez que se possuam os recursos para converter esta energia em energia utilizável, o combustível é livre e nunca estará sujeito a altos e baixos do mercado. O aproveitamento de energia solar é uma das formas mais simples e abundantes de obtenção de energia limpa. A energia solar em aquecedores, já vem sendo usada no Brasil desde a década de 60, época em que surgiram as primeiras pesquisas na área de tecnologias solares (ANEEL, 2006).

Um estudo publicado pela *European Photovoltaic Industry* indicou que em 2012, a capacidade mundial fotovoltaica instalada era de 102 GW, enquanto a energia solar térmica concentrada atingiu um valor de 2.550 MW. Enquanto isso, seu desenvolvimento ainda se mostra relativamente tímido no Brasil, que, apesar de contar com um potencial de radiação expressivo, tem apenas 6,7 MW de capacidade fotovoltaica instalada, os quais representam menos de 0,01% da matriz elétrica, de acordo com dados de 2013 do Banco de Informações de Geração, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2006). De acordo com a Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha (2014), o Brasil possui uma irradiação solar anual em superfícies horizontais de cerca de 1500 até 2400 kWh/m<sup>2</sup>, na Alemanha os valores são de 900-1220 kWh/m<sup>2</sup> como pode ser observado na figura 1. A área com a menor irradiação solar no sul do Brasil se encontra até 20% mais irradiada do que a área mais irradiada da Alemanha.

Figura 1- Média Global de Radiação Solar Incidente no Plano Horizontal

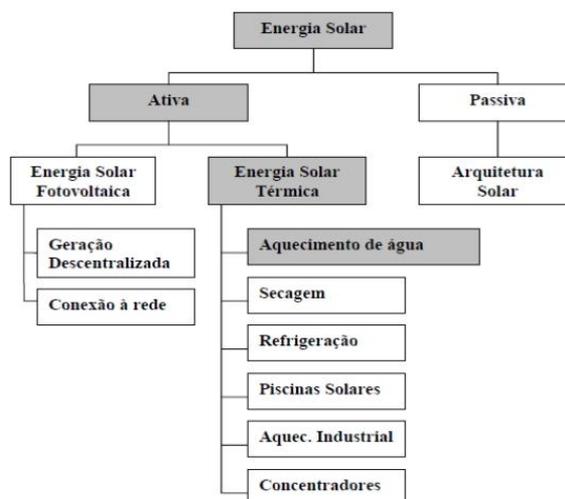


Fonte: IBEAS, 2013  
Brasil (a); Irradiação Solar na Alemanha (b)

Nota-se que o Brasil, com grande potencial para aproveitamento de energia solar, possui uma importante vantagem sobre a Alemanha, no que diz respeito aos níveis de radiação solar. No entanto, apesar de apresentar melhores condições climatológicas, na comparação mercadológica, o Brasil está atrás do país europeu (IBEAS, 2013).

A energia solar, que é obtida diretamente do sol, pode ser utilizada na forma passiva onde seu uso mais comum é na arquitetura bioclimática, e também na forma ativa, meio em que se utilizam dispositivos capazes de convertê-la diretamente em energia elétrica, a exemplo dos painéis fotovoltaicos, ou em energia térmica, através de coletores planos e concentradores (TOLMASQUIM, 2003). Na figura 2 é apresentado um fluxograma das aplicações práticas da energia solar.

Figura 2- Fluxograma das aplicações práticas de energia solar



Fonte: Tolmasquim (2003)

O estudo do coletor solar térmico, que visa à secagem de produtos como alimentos, biomassa, entre outros, é de grande importância, visto que se apresenta como uma grande alternativa energética de enorme potencial em nosso país.

### 1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo a instrumentação de um coletor solar plano projetado para funcionar como aquecedor de ar.

### 1.2 Objetivos específicos

Para alcançar a meta proposta no objetivo geral, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- Conceção e construção de um coletor solar térmico (Aquecedor de Ar)
- Instalação de sensores de temperatura
- Construção e instalação de um sistema forçado para o deslocamento de ar no interior do coletor solar térmico
- Utilização de ferramentas de fácil aquisição (hardwares e softwares)
- Construção de um filtro físico e um filtro digital para refinar os dados de leitura

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foi abordado uma visão geral dos conceitos de energia solar. Para nos ajudar na concepção e construção do coletor solar térmico foram discutidos alguns pontos relevantes. Também foi levantado conteúdo literário para a construção do sistema de aquisição de dados, por último discutimos uma maneira de refinar tais dados (Filtragem dos dados).

### 2.1 O Sol

O sol é uma esfera constituída por plasma extremamente quente, seu diâmetro é de  $1,39 \times 10^9$  m com uma distância média de  $1,5 \times 10^{11}$  m da terra (DUFFIE, 2006). Com uma temperatura efetiva de corpo negro de 5777 K, o sol é efetivamente um reator contínuo de energia (TIWARI, 2008). A natureza da geração de energia no sol é ainda uma questão sem resposta. Medidas espectrais tem confirmado a presença de quase todos os conhecidos elementos do sol. Entretanto, 80 por cento do sol é composto por hidrogênio e 19 por cento de hélio. Portanto, os restantes 100 elementos mais observados compõe uma pequena fração na composição do sol. É geralmente aceito que a reação termonuclear hidrogênio-hélio seja a fonte de energia do sol. Ainda, porque tal reação não foi duplicada em laboratório, não estão exatamente claros quais são os mecanismos de reação, qual o papel dos fluxos turbulentos no sistema sol, e como proeminências solares e manchas solares são criadas (GOSWAMI, et al., 2000).

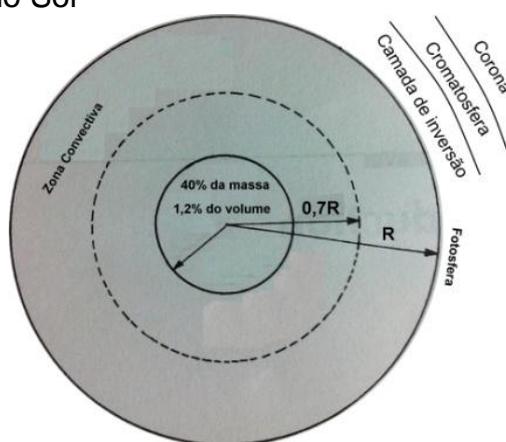
De acordo com Tiwari (2008) varias reações de fusão têm sido sugeridas para fornecer a energia irradiada pelo sol, a mais importante vem a ser a que quatro prótons de hidrogênio combinam-se para formar um núcleo de hélio, nesta reação parte da massa é convertida em energia. A reação pode ser observada na equação 1:



O sol é, em efeito, um reator de fusão contínuo, nele encontram-se gases retidos por forças gravitacionais como se estivessem em um recipiente (DUFFIE, 2006). É estimado que 90 por cento da energia do sol é gerada na região de 0 a  $0,23R$ , onde

$1R$  é o raio do sol, a densidade média  $\rho$  e a temperatura  $T$  nesta região são de  $10^5$   $\text{kg/m}^3$  e aproximadamente  $8 - 40 \times 10^6$   $K$ , respectivamente. Na distância de  $0,7R$  do centro, a temperatura cai para aproximadamente  $1,3 \times 10^5$   $K$  e a densidade para  $70$   $\text{kg/m}^3$ . Por conseguinte, para  $r > 0,7R$  começa a ser uma importante zona de convecção, é sabido que a região  $0,7R < r < R$  é a zona convectiva. A camada exterior a esta zona é chamada de fotosfera. A borda da fotosfera é nitidamente definida, apesar de sua baixa densidade. Acima da fotosfera há uma camada de gases frios com vários quilômetros de espessura, esta é a camada de inversão. No exterior desta camada fica a camada referida como cromosfera, sua espessura é de aproximadamente  $10.000$   $\text{km}$ . Esta é uma camada de gases com temperaturas mais elevadas do que a fotosfera, porém uma menor densidade. Ainda podemos destacar a corona, camada de baixa densidade e temperatura muito alta de aproximadamente  $10^6$   $K$  (TIWARI, 2008). Um diagrama esquemático da estrutura do sol pode ser observado na Figura 3.

Figura 3- A estrutura do Sol



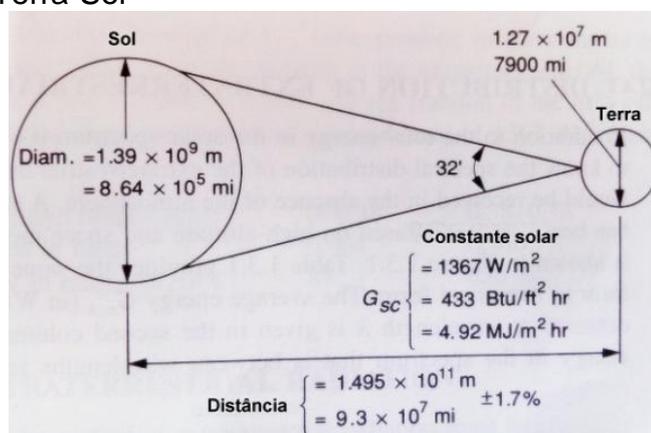
Fonte: Adaptado de Tiwari (2008)

## 2.2 Fundamentos da radiação

A radiação emitida pelo sol até a terra através do espaço tem uma intensidade quase fixa de radiação fora da atmosfera terrestre. A constante solar  $G_{sc}$  é a energia vinda do sol por unidade de tempo recebida por uma unidade de área com sua superfície perpendicular a direção de propagação da radiação, na distância média entre exterior da atmosfera terrestre e sol (DUFFIE, 2006). A figura 4 mostra a

relação terra sol. Nota-se que o autor assumiu o valor de  $1367 \text{ W/m}^2$  para a constante  $G_{sc}$ .

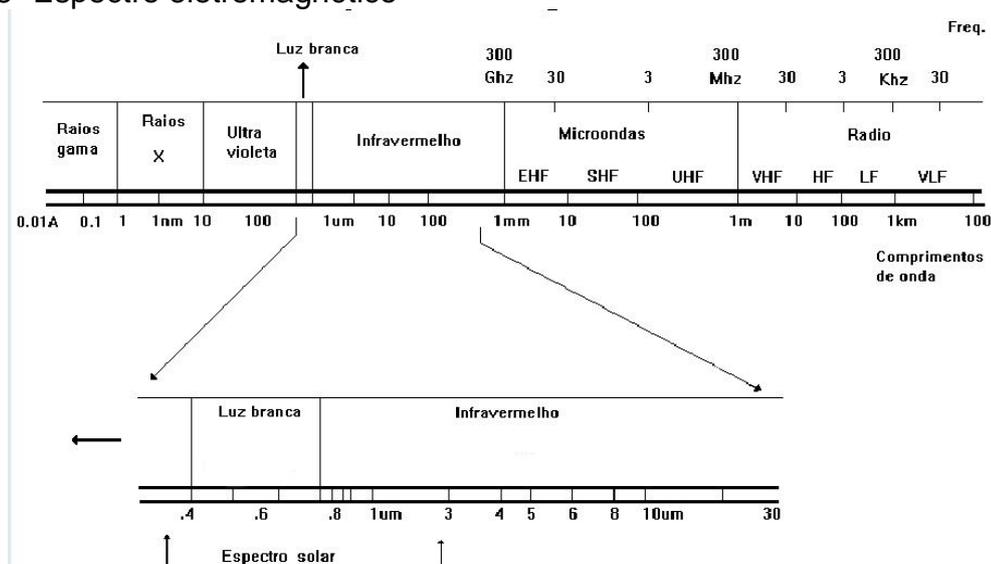
Figura 4- Relação Terra-Sol



Fonte: Duffie (2006)

Radiação térmica é um tipo de energia eletromagnética. Todos os corpos emitem radiação térmica, devido suas temperaturas serem maior do que zero Kelvin. Quando um corpo está aquecido, seus átomos, moléculas ou elétrons são elevados a níveis mais altos de atividade chamados de estados de excitação. Entretanto, eles tendem a retornar a estados mais baixos de energia, e nesse processo energia é emitida em forma de ondas eletromagnéticas. Mudanças nos estados de energia resultam em um rearranjo dos estados eletrônicos, rotacional e vibracional dos átomos e moléculas. Uma vez que estes rearranjos envolvem diferentes quantidades de energia, alterações e modificações destas energias são relatadas com frequência. A radiação emitida por um corpo é distribuída em uma faixa de comprimento de ondas. Usualmente considera-se uma porção do espectro eletromagnético como demonstrado na figura 5. O comprimento de onda é associado com os vários mecanismos não nitidamente definidos; radiação térmica é usualmente considerada ficar dentro da banda de aproximadamente  $0,1$  a  $100 \mu\text{m}$ , enquanto a radiação solar tem a maior parte de sua energia entre  $0,1$  e  $3 \mu\text{m}$  (GOSWAMI et al., 2000)

Figura 5- Espectro eletromagnético



Fonte: Adaptado de Goswami et al. (2000)

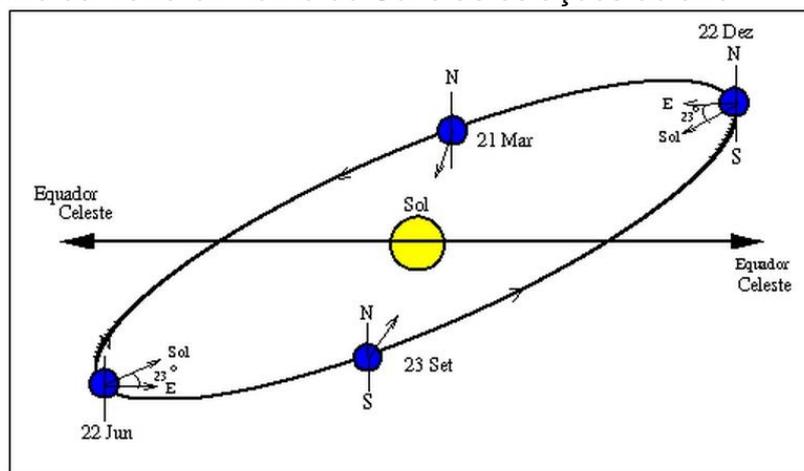
Energia solar é uma forma de radiação eletromagnética com comprimento de onda variando entre aproximadamente  $0,3 \mu\text{m}$  e  $3 \mu\text{m}$ , que corresponde a faixa de ultravioleta, visível e infravermelho. Muito dessa energia está concentrada na zona do visível e infravermelho. A radiação incidente, às vezes chamada de insolação, é medida como irradiância, ou a potência por unidade de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) (GOSWAMI et al., 2000).

### 2.2.1 Radiação solar durante o ano

De acordo com Saraiva (2004), a Terra realiza uma trajetória elíptica em torno do Sol, tendo o Sol como um dos focos da elipse (figura 6). O movimento aparente do Sol visto do referencial Terra ocorre na eclíptica, que é o plano da órbita da Terra ao redor do Sol. Embora a órbita da Terra em torno do Sol seja uma elipse, a distância da Terra ao Sol varia somente 3%, sendo menor em janeiro, onde no hemisfério sul é verão e no norte é inverno. O eixo de rotação da Terra está inclinado  $23^\circ 27'$  em relação à eclíptica ocasionando as estações do ano. Devido a essa inclinação, à medida que a Terra orbita em torno do Sol, os raios solares incidem mais diretamente em um hemisfério ou em outro, proporcionando mais horas com luz durante o dia a um hemisfério ou a outro e, portanto, aquecendo mais um hemisfério ou a outro. Durante o ano, o Sol ocupa quatro posições características na eclíptica: 21 de março, o Sol cruza o Equador, indo do hemisfério sul para o hemisfério norte,

22 de julho, o Sol está na máxima declinação norte, incidindo diretamente na região do Trópico de Câncer na Terra; 23 de setembro, Sol cruza o Equador, indo do hemisfério norte para o hemisfério sul e 22 de dezembro, o Sol está na máxima declinação sul incidindo diretamente na região do Trópico de Capricórnio na Terra (figura 6).

Figura 6- Movimento da Terra em torno do Sol e as estações do ano



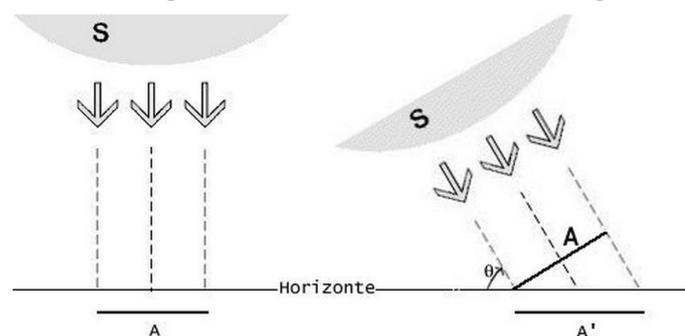
Fonte: Oliveira Filho (2004)

No Equador todas as estações são muito parecidas, à medida que se afasta do equador as estações ficam mais acentuadas e as diferenças tornam-se máximas nos pólos. Quando se refere à quantidade de energia que chega até a superfície terrestre, a insolação solar ( $I$ ) é definida como a quantidade de energia solar que atinge uma unidade de área da Terra (equação 2), que corresponde a insolação solar no zênite ( $Ez$ ) dividido pela área ( $A$ ). Considerando que o Sol está a uma inclinação  $\theta$  em relação ao horizonte, a mesma energia é espalhada por uma área (equação 3). Isto significa que a variação da altura máxima do Sol para um lugar (devido à inclinação da órbita), promove uma variação da área iluminada na superfície da Terra, o que leva a uma variação na insolação (OLIVEIRA FILHO, 2004). A variação desta área pode ser melhor visualizada na figura 7.

$$I = \frac{Ez}{A} \tag{2}$$

$$A' = \frac{A}{\sin(\theta)} \tag{3}$$

Figura 7- Quantidade de energia incidente em diferentes ângulos



Fonte: Oliveira Filho (2012)

### 2.2.2 Interação da radiação solar com os materiais

O espectro da radiação solar extraterrestre cobre um intervalo de comprimentos de onda de 0,2 até 25  $\mu\text{m}$ . A intensidade da radiação varia com o comprimento de onda. Quando a luz solar de comprimento de onda 0,3 - 3,0  $\mu\text{m}$  atinge um objeto, por exemplo, uma cobertura solar, de acordo com a estrutura da superfície (material, rugosidade, cor). Superfícies claras refletem mais, comparadas com superfícies escuras. A proporção de radiação refletida (especialmente com superfícies de vidro) é também dependente do ângulo de incidência da radiação. A radiação que não é refletida é absorvida pelo objeto, ou no caso de objetos de material translúcido é também transmitida através desses objetos. A parte absorvida é convertida em radiação térmica de comprimento de onda 3,0 - 30  $\mu\text{m}$  e radiada de acordo com a estrutura da superfície. Este processo é descrito fisicamente, como o grau de reflexão, absorção e transmissão de um corpo (ALTENER, 2004). Sendo, portanto, o grau de reflexão ( $Rf$ ) (equação 4), grau de absorção ( $\lambda$ ) (equação 5), grau de transmissão ( $\tau$ ) (equação 6), apresentados respectivamente pelas equações a seguir:

$$Rf = \frac{\text{Radiação Refletida}}{\text{Radiação Incidente}} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\text{Radiação Absorvida}}{\text{Radiação Incidente}} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{\text{Radiação Transmitida}}{\text{Radiação Incidente}} \quad (6)$$

Algumas variáveis são dependentes do material e do comprimento de onda. Em tecnologia solar térmica, aplica-se a lei de Stefan-Boltzmann, que diz que um corpo emite radiação correspondente à 4ª potência da sua temperatura para um corpo termicamente negro, equação 7.

$$G = \sigma \times T^4 \quad (7)$$

Onde

$G$  = Radiação média emitida ( $W/m^2$ )

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8}$ ) ( $W/m^2K^4$ )

$T$  = Temperatura absoluta da superfície de um corpo ( $K$ )

Os sistemas solares para aquecimento ambiente através do aquecimento de ar são comparáveis a sistemas solares cujo meio de transferência de calor é um líquido. Contudo, o ar, o meio de transferência de calor nestes sistemas solares, tem características físicas diferentes da água, o que conduz a consequências profundas. Uma comparação das diferentes propriedades torna esta questão mais clara (ALTENER, 2004). Segundo o autor, as características do ar (tabela 1) apresentam como consequência uma velocidade de aquecimento rápida podendo alcançar temperaturas úteis mesmo a níveis baixos de radiação, a condutividade térmica também é outro fator ser considerado no processo, juntamente com o fluxo mássico elevado, necessitando de dimensionamento e instalações específicas.

Tabela 1- Dados para ar e água a 25°C e 1 bar

	Ar	Água
Densidade	1,185 Kg/m <sup>3</sup>	998,200 Kg/m <sup>3</sup>
Capacidade calorífica específica c (massa)	0,28 Wh/Kg K	1,16 Wh/Kg K
Condutividade Térmica	0,026 W/m K	0,559 W/m K

Fonte: Altener, 2004

O ar apresenta como meio de transferência de calor a vantagem de necessitar de uma estrutura mais simples para o sistema, devido ao ar não congelar e nem ferver como no aquecimento de água. Uma vantagem genérica da utilização

dos sistemas solares térmicos de aquecimento ambiente é a capacidade de utilizar temperaturas baixas, obtendo-se um efeito positivo na eficiência do coletor sem as perdas na transferência de calor decorrentes do aquecimento da água (ALTENER, 2004). As desvantagens desse sistema seriam decorrentes da capacidade térmica mais baixa e da baixa condutividade térmica, em comparação com os líquidos, sendo necessárias tubagens de maior diâmetro e permutadores de maiores dimensões para a transferência de calor. De um modo geral, estas propriedades permitem um sistema muito simples para o aquecimento solar direto de ambiente, visto que não é necessário um circuito separado para esta tarefa. O ar que passa através dos coletores pode ser diretamente introduzido no ambiente (ALTENER, 2004).

### **2.3 O coletor solar**

Coletor de energia solar é um tipo especial de trocador de calor que transforma energia solar radiativa em energia térmica. É um dispositivo que absorve a radiação solar, converte-a em calor, e transfere esse calor por um fluido (geralmente ar, água ou óleo) ao acumulador. A energia solar coletada é transportada do fluido circulante diretamente para o espaço de condicionamento ou um tanque de armazenamento de energia térmica, a partir do qual pode ser retirada para o uso a qualquer momento (KALOGIROU, 2004). Ainda de acordo com Kalogirou (2004), existem basicamente dois tipos de coletores solares: os sem concentração e os com concentração. Os coletores sem concentração, chamados coletores planos, tem a mesma área para interceptar e para absorver radiação solar, enquanto um coletor solar de concentração tem geralmente superfície côncava de reflexão para interceptar e concentrar a radiação do sol para um feixe menor de área de recepção, aumentando assim o fluxo de radiação. Neste trabalho discutiremos os coletores sem concentração.

### 2.3.1 Coletor de placa plana

O coletor de placa plana é o coração de qualquer sistema de coleta de energia solar, designado para uma operação com baixa variação de temperatura (ambiente até 60°C) ou média variação de temperatura (ambiente até 100°C) (TIWARI, 2008).

Coletores planos podem ser designados para aplicações que requerem entrega de energia a temperaturas moderadas, até talvez 100°C acima da temperatura ambiente. Eles usam tanto a radiação direta como a difusa, não necessitam de rastreamento do sol, e requerem pouca manutenção. Eles são mecanicamente mais simples do que os coletores concentradores. Sua maior aplicação esta na área de aquecimento de água, aquecimento residencial, condicionamento de ar, e processos industriais que necessitam de aquecimento (DUFFIE, 2006).

Um simples coletor plano consiste em uma superfície absorvedora (normalmente preta), uma armadilha para reter as perdas por radiação da superfície absorvedora (tal como o vidro, que transmite radiação solar com comprimento de ondas curtas, mas bloqueia as ondas longas vindas do absorvedor), o meio de transferência de calor é por ar, água etc. O sistema também é composto por alguns isolamentos atrás do absorvedor (GOSWAMI, et al. 2000).

Coletores planos são normalmente fixados permanentemente em uma determinada posição. Os coletores devem ser orientados diretamente para o equador, virado a sul no hemisfério norte e norte no hemisfério sul. O ótimo ângulo de inclinação é igual à latitude do local com variação do ângulo de mais ou menos 10 - 15°, dependendo da aplicação (KALOGIROU, 2004).

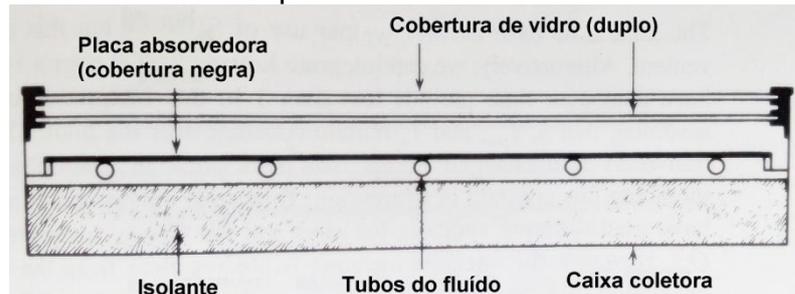
De acordo com Tiwari (2008) um coletor plano consiste normalmente nos seguintes componentes.

- Vidros que podem ser de uma ou mais folhas ou algum outro material com transmitância apropriada.
- Tubos, estabilizadores ou passagens para conduzir ou direcionar a transferência de calor do fluido da entrada até a saída.
- Placa absorvedora que pode ser plana, ondulada ou com ranhuras contendo tubos, estabilizadores ou passagens ligadas a ele.
- Entradas e saídas de tubulações.

- Isolantes que minimizem as perdas pela parte traseira do coletor assim como pelas laterais.
- Recipiente ou carcaça que envolva todos os outros componentes os protegendo de poeira, umidade etc.

Na figura 8 pode ser visualizada a estrutura básica de um coletor solar plano.

Figura 8- Estrutura de um coletor plano

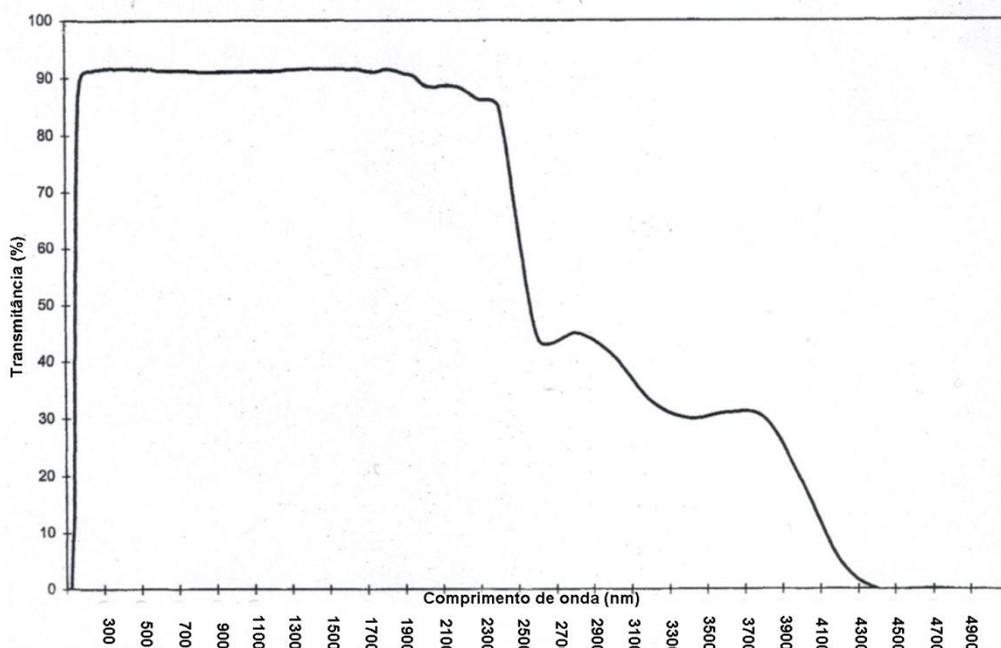


Fonte: Adaptado de Duffie (2006)

### 2.3.2 Vidros

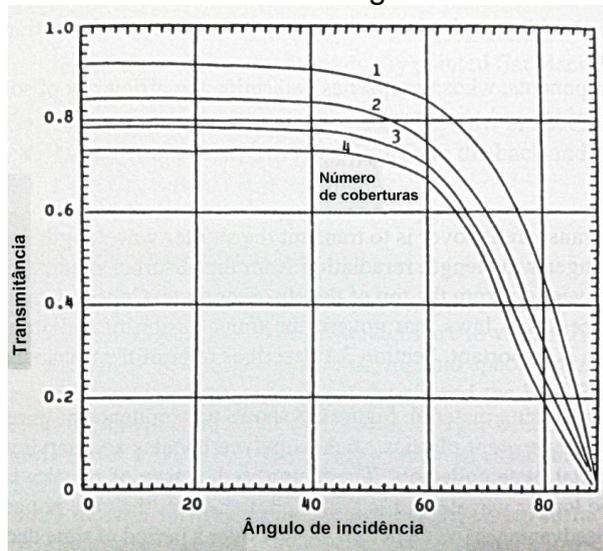
O propósito de se usar uma cobertura de vidro transparente é transmitir comprimentos de ondas curtas da radiação solar, porém bloquear comprimentos de onda longos irradiados do absorvedor plano, além de reduzir a perda por convecção no topo do absorvedor plano. Vidro é o material mais usado na construção da cobertura transparente. A figura 9 mostra a transmitância do vidro em função do comprimento de onda. Plásticos transparentes bem como policarbonatos e acrílicos também são usados como cobertura para os coletores planos. A principal desvantagem de plásticos é que possuem alta transmitância em ondas longas, portanto, eles não são usados como boas coberturas para coletores. Outra desvantagem é a deterioração devido ao longo período de tempo exposto a radiação ultravioleta. A grande vantagem fica por conta de sua alta resistência a impactos. Embora vidro possa quebrar facilmente, essa desvantagem pode ser minimizada pelo uso de vidro temperado. A fim de minimizar a perda de calor pelo topo do coletor, mais de um vidro pode ser usado. Entretanto com o aumento do número de coberturas de vidro, a transmitância sofre um decréscimo (GOSWAMI, et al., 2000). A figura 10 demonstra o efeito causado pelo acréscimo de camadas de vidro na cobertura.

Figura 9- Transmitância do vidro em função do comprimento de onda



Fonte: Adaptado de Goswami et al. (2006)

Figura 10- Variação da transmitância com o ângulo de incidência



Fonte: Adaptado de Goswami et al. (2006)

### 2.3.3 Desempenho de um coletor plano

Para Tiwari (2008) o desempenho de um coletor pode ser determinado através de um teste em ambiente fechado (*indoor tests*) usando um simulador, ou testes ao ar livre (*outdoor tests*) simulando condições em estado estacionário. De acordo Goswami et al. (2000) o desempenho térmico de qualquer tipo de coletor

solar térmico pode ser avaliado por um balanço de energia que determina a parte da radiação de entrada entregue como energia útil para o fluido de trabalho. Para um coletor plano com uma área  $A_c$  este balanço energético para a placa absorvedora é:

$$I_c A_c \tau_s \alpha_s = q_u + q_{loss} + de_c/dt \quad (8)$$

Onde:

$I_c$  = radiação solar incidente sobre a superfície coletora

$\tau_s$  = transmitância solar efetiva da cobertura do coletor

$\alpha_s$  = absorvância solar da superfície do coletor plano

$q_u$  = taxa de transferência de calor do absorvedor para o fluido de trabalho

$q_{loss}$  = taxa de transferência de calor (perda térmica) entre o coletor e o ambiente

$de_c/dt$  = taxa de energia interna armazenada no coletor

A eficiência instantânea de um coletor  $\eta_c$  é simplesmente a razão entre a energia total útil e a energia total entregue, ou:

$$\eta_c = \frac{q_u}{A_c I_c} \quad (9)$$

Em prática, a eficiência deve ser medida ao longo de um período finito de tempo, um teste padrão de desempenho utiliza um tempo de 15 ou 20 minutos, enquanto que para projeto, o desempenho ao longo de um dia e sobre um período mais longo é torna-se importante. Então temos uma eficiência média (GOSWAMI et al., 2000).

$$\eta_c = \frac{\int_0^t q_u dt}{\int_0^t A_c I_c dt} \quad (10)$$

Onde  $t$  é o período de tempo que o desempenho é medido.

Para Charters e Window (1978) o procedimento normal para o teste de um coletor, é operar o coletor em um banco de ensaios em condições de funcionamento quase constantes, ou seja, a radiação e outras condições são essencialmente constantes durante um tempo suficientemente longo, para a temperatura de saída e

o ganho útil tornassem constantes. A eficiência é calculada a partir de uma cuidadosa medida de incidência de radiação, temperatura de entrada e saída do fluido, temperatura ambiente e a taxa de fluxo do fluido através do coletor. A taxa de energia útil do coletor é dada pela seguinte equação:

$$Q_u = m C_f (T_{fo} - T_{fi}) \quad (11)$$

Onde  $m$  é a taxa de fluxo do fluido através do coletor,  $C_f$  é o calor específico do fluido,  $T_{fo}$  e  $T_{fi}$  temperatura de entrada e saída do fluido de trabalho respectivamente.

A eficiência instantânea do coletor é dada por:

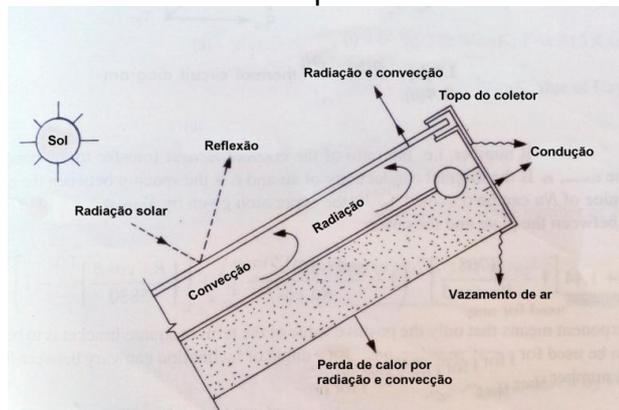
$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c I(t)} \quad (12)$$

Onde  $A_c$  é a área do coletor e  $I(t)$  é a radiação incidente no coletor ( $W/m^2$ ).

### 2.3.4 Transferência de calor em um coletor e seus coeficientes

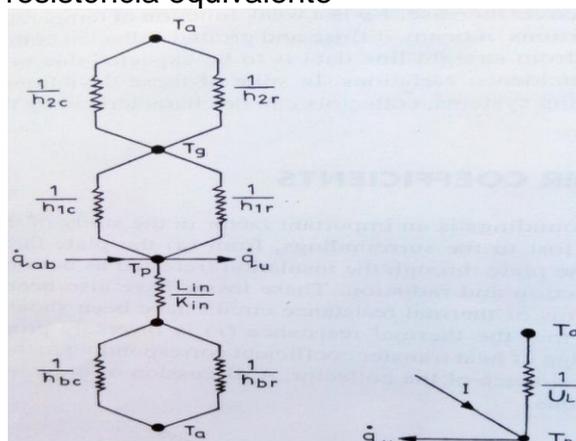
A perda térmica para o ambiente é um fator importante do estudo do desempenho de um coletor solar térmico. Calor é perdido para o ambiente, da placa através da cobertura de vidro (referida como perda pelo topo) e da placa através do isolante (referida como perda inferior). Essas perdas são por condução, convecção e radiação. Estas perdas podem ser visualizadas na figura 11. O circuito equivalente de perdas térmicas e suas resistências são mostrados na figura 12. Aqui é importante mencionar a resistência térmica ( $r$ ) que é inversamente proporcional ao coeficiente de transferência de calor ( $h$ ). O conhecimento do coeficiente de transferência de calor correspondente ao fenômeno é essencial para uma análise do desempenho de um coletor (TIWARI, 2008).

Figura 11- Perdas de calor do absorvedor para o ambiente



Fonte: Tiwari (2008)

Figura 12- Circuito de resistência equivalente



Fonte: Tiwari (2008)

## 2.4 Filtros

Idealmente, a função do filtro é permitir ou rejeitar a passagem de uma faixa de frequências presente em sua entrada, impondo forte atenuação às frequências rejeitadas e nenhuma atenuação às frequências permitidas (MARKUS, 2008). Na sua definição mais simples, filtro é um circuito que apresenta um comportamento típico em função da frequência do sinal a ele aplicado, permitindo a passagem de sinais com certas frequências, enquanto suprime sinais com outras frequências (BRADSHAW, 1987). Para Caetano (1995) os filtros são classificados quanto à tecnologia e componentes empregados na sua construção e quanto à função que deverá ser executada por ele num circuito eletrônico.

### 2.4.1 Tipos de filtros

De acordo com Mussoi (2004) podemos classificar os filtros de acordo com a tecnologia empregada da seguinte forma:

- Filtros Passivos: São os filtros construídos apenas com os elementos passivos dos circuitos, ou seja, resistores, capacitores e indutores.
- Filtros ativos: São os filtros que empregam na sua construção elementos passivos associados a algum elemento ativo amplificador, como por exemplo, transistores e amplificadores operacionais.
- Filtros digitais: São os filtros que empregam tecnologia digital na sua construção, implementados através da programação de um sistema microprocessado.

Ainda de acordo com Mussoi (2004) classificamos os filtros quanto à função executada como a seguir:

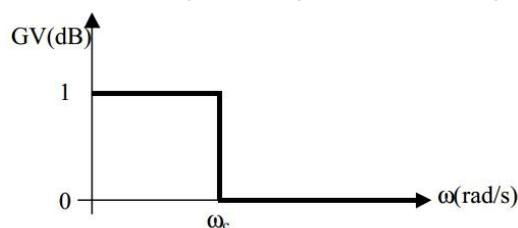
- Filtros Passa-Baixas;
- Filtros Passa-Altas;
- Filtros Passa-Faixa (Passa-Banda);
- Filtros Rejeita-Faixa (Rejeita-Banda);

Por conveniência neste trabalho foi abordado os filtros Passa-Baixas e um filtro digital, o filtro de Kalman, posteriormente discutido.

### 2.4.2 Filtro Passa-Baixas

Para sinais de frequência abaixo da frequência de corte do filtro, o ganho é unitário, ou seja, o módulo do sinal de entrada é igual ao de saída. Para frequências acima da frequência de corte ( $\omega c$ ) o ganho ( $Gv$ ) é zero, ou seja, o módulo do sinal de saída é atenuado até zero (MUSSOI, 2004). Na prática, porém, não se obtém resposta em frequência de um filtro passa-baixa como apresentado na figura 13.

Figura 13- Curva de resposta em frequência para um filtro passa-baixa ideal

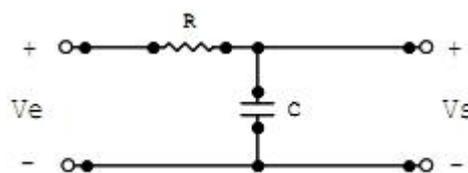


Fonte: Mussoi (2004)

### 2.4.3 Filtro Passa-Baixa RC.

Para Mussoi (2004) um circuito RC como apresentado na figura 14 pode comportar-se como um filtro passivo Passa-Baixa. Para sinais de baixa frequência, o capacitor apresenta alta reatância, ( $X_c \gg R$ ) e seu comportamento tende a um circuito aberto. Desta forma, a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o capacitor de saída. Para sinais de altas frequências, o capacitor apresenta baixa reatância, ( $X_c \ll R$ ) e seu comportamento tende a um curto circuito. Desta forma, a maior parcela da tensão de entrada ( $V_e$ ) estará sobre o resistor e a tensão sobre o capacitor de saída ( $V_s$ ) será muito pequena.

Figura 14- Circuito RC



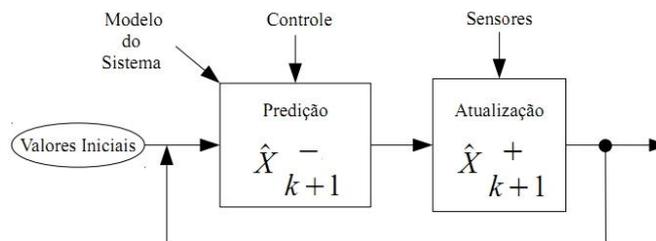
Fonte: Mussoi (2004)

### 2.4.4 O filtro de Kalman

O notável filtro de Kalman, formulado em espaço de estados para sistemas dinâmicos lineares, fornece uma solução recursiva ideal para o problema de filtragem. É aplicado em sistemas permanentes e transientes. É uma solução recursiva em que o cálculo de cada atualização estimada é feito a partir da estimativa anterior e dos novos dados de entrada, portanto somente a estimativa anterior requer armazenamento. Além de eliminar a necessidade de armazenar os últimos dados observados, o filtro de Kalman é computacionalmente mais eficiente

do que o cálculo da estimativa direta, de todos os dados do passado observados em cada passo do processo de filtragem (HAYKIN, 2001). O filtro de Kalman é uma das ferramentas de estimativa mais úteis disponíveis hoje em dia, proporcionando um método repetitivo de estimar o estado de um sistema dinâmico na presença de ruído. O filtro de Kalman pode produzir estimativas dos valores reais das medições, e os seus valores calculados associados ao prever um valor, estimar a incerteza do valor previsto, bem como, o cálculo de uma média ponderada do valor previsto e o valor medido. O maior peso é dado para o valor com o menor grau de incerteza (THRUN,2005). A figura 15 mostra a estrutura geral do filtro de Kalman e suas duas fases: predição e correção.

Figura 15- Estrutura geral do filtro de Kalman



Fonte: Cruz (2013)

#### 2.4.4.1 Algumas definições na análise do Filtro de Kalman

Brown (1996) faz algumas definições:

- Variável de Estado ( $x$ ): representa a variável de estudo do modelo matemático para a previsão dos dados futuros, “A” e “C” são matrizes de estados e ruído respectivamente. O filtro linear usa modelo linear. O futuro é o presente com alguma correção, corrompido por um ruído ( $\omega k$ ). A propagação da covariância do estado atual ( $P_{k+1}$ ) é calculada da seguinte forma:

$$P_{k+1} = \overline{(x_{k+1} - \bar{x}_{k+1}) \times (x_{k+1} - \bar{x}_{k+1})^T} \quad (13)$$

$$P_{k+1} = AP_kA^T + CQC^T \quad (14)$$

O vetor variável de estado atualizada ( $\hat{x}_{atualizado}$ ) pode ser dado por:

$$\hat{x}_{atualizado} = \hat{x}_{k+1} + \frac{P_{k+1} \times H^T}{R} \times (Z_k - H \hat{x}_{k+1}) \quad (15)$$

A melhor covariância atual ( $P_{atualizado}$ ) quando se tem medida  $Z_k$ , é aquela que zera o erro entre medida e variável:

$$erro = x - \hat{x}_{atualizado} \quad (16)$$

$$P_{atualizado} = P_{k+1} - \frac{P_{atualizado} \times H^T}{H P_{atualizado} H^T + R} \quad (17)$$

O ganho do Filtro de Kalman  $K_k$  será dado por:

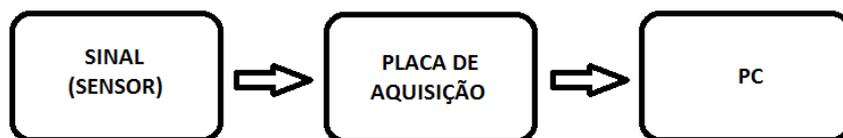
$$K_k = \frac{H^T \times P_{k+1}}{R + H \times P_{k+1}} \quad (18)$$

## 2.5 Sistema de aquisição de dados

A aquisição de dados, utilizando como recurso computadores pessoais ou industriais, é o processo pelo qual um fenômeno físico real é transformado num sinal elétrico proporcional e convertido em um formato digital para posterior visualização, armazenamento, processamento e análise. Em muitas aplicações existentes, a aquisição de dados não fica apenas na aquisição, mas também compreende ações de controle sobre os sistemas em estudo. O controle corresponde ao processo pelo qual os sinais digitais provenientes dos computadores são convertidos em sinais apropriados para atuar em diversos equipamentos de controle (SERRANO, 2004).

Como pode ser observado na figura 16, um sistema de aquisição é composto por uma série de elementos. Nesta figura, pode-se visualizar um sistema de aquisição generalizado. Este sistema é estruturado através de elementos de hardware, mas também é necessário elementos de software para estabelecer certas funcionalidades para realizar uma operação correta (NAVARRO, 2012).

Figura 16- Sistema de aquisição de dados generalizado



Fonte: Adaptado de Navarro (2012)

Ainda de acordo com Navarro (2012) o primeiro elemento de um sistema de aquisição é conhecido como transdutor ou sensor, porque ele converte um tipo de energia física em outro tipo de energia. Eles têm a função de medir a magnitude de interesse. Neste caso a temperatura gera uma energia térmica que é convertida em energia elétrica. Geralmente a quantidade de energia convertida para o sensor é muito pequena. Em seguida o sinal de saída deve ser condicionado para adaptá-lo às seguintes fases do processo.

Conseqüentemente existem diferentes parâmetros a considerar na performance de um sistema de aquisição. De acordo com Pallás (2006) alguns destes parâmetros são os seguintes:

- Faixa de Medição: é definido como pelo o máximo e mínimo valor que pode ser medido por um sensor, e este obter um comportamento aceitável.
- Sensibilidade: é a relação entre a grandeza de entrada e saída na ausência de erros. Se a relação é constante na faixa de medição, o sensor é linear.
- Resolução: esse parâmetro é definido como a menor alteração na variável de entrada que pode ser detectado na saída
- Precisão: a precisão define o grau de concordância entre o resultado e o valor da grandeza medida.

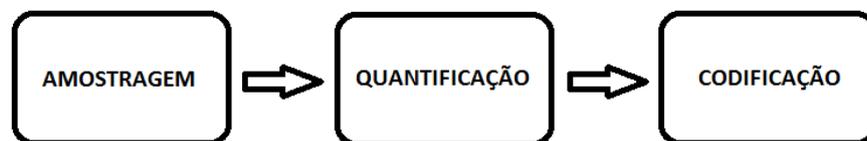
Neste trabalho a plataforma selecionada inclui sensor de temperatura, um módulo de Arduino e um computador. Cada um dos elementos tem certa limitação quanto aos parâmetros citados acima.

O segundo elemento envolvido no sistema de aquisição neste trabalho é o módulo de Arduino. De acordo com a sua estrutura de pinos analógicos e digitais este módulo pode receber a informação a partir do sensor ou outro dispositivo externo. No entanto, o conversor analógico-digital oferecido pelo Arduino tem uma limitação

de dez bits. Em seguida, a faixa de medição deve estar entre 0 e 1024 (JACEE, 2012).

E finalmente nosso ultimo elemento envolvido é o computador. O computador processa os dados do Arduino conectado a este através de uma série de comunicação. O sinal de entrada em um sistema de aquisição pode ser analógico ou digital. O sinal analógico do sensor tem que ser convertido em um sinal digital, utilizando um sistema conversor analógico-digital (NAVARRO, 2012). Ainda segundo Navarro (2012) esta conversão é dividida em três estágios, como pode ser visualizado na figura 17.

Figura 17- Amostragem, quantificação e codificação de um sistema de aquisição



Fonte: Adaptado de Navarro (2012)

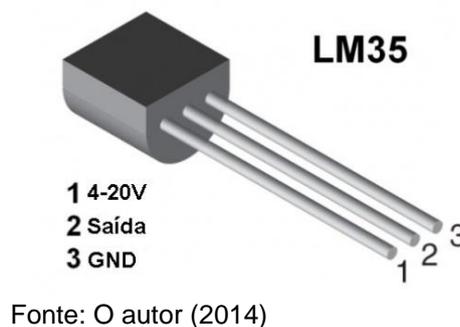
- Amostragem: O processo de amostragem é a conversão dos sinais contínuos para os sinais discretos. Conseqüentemente, o sinal é medido em específicos períodos de tempo. A frequência de amostragem é determinada pelo critério de Nyquist, que diz que deve ser pelo menos duas vezes a banda passante do sinal.
- Quantificação: nesta fase, que representa a amplitude do sinal utilizando um número finito em certo período de tempo. Se o conversor tem  $n$  bits, existem  $2^n$  valores ou estados que podem ser representados.
- Codificação: finalmente, a última etapa define a representação do valor atribuído para o sinal através de uma combinação de símbolos, 1 e 0 na codificação binária.

Em seguida, o sinal está pronto para ser processado por um código de aplicação, o qual vai determinar um sinal de saída de acordo com as exigências específicas.

### 2.5.1 Sensores

Neste tópico é dada atenção especial ao sensor utilizado no trabalho, este sensor é o LM35. O sensor LM35 é um sensor de precisão, ele apresenta uma saída de tensão linear relativa à temperatura em que ele se encontrar no momento em que for alimentado por uma tensão de 4-20 Vdc, tendo em sua saída um sinal de 10 mV para cada Grau Celsius de temperatura, sendo assim, apresenta uma boa vantagem com relação aos demais sensores de temperatura calibrados em Kelvin, não necessitando nenhuma subtração de variáveis para que se obtenha uma escala de temperatura em Graus Celsius. O LM35 não necessita de qualquer calibração externa para fornecer com exatidão, valores de temperatura com variações de  $\frac{1}{4}^{\circ}\text{C}$  ou até mesmo  $\frac{3}{4}^{\circ}\text{C}$  dentro da faixa de temperatura de  $-55^{\circ}\text{C}$  à  $150^{\circ}\text{C}$ . O sensor LM35 é apresentado com vários tipos de encapsulamentos, sendo o mais comum o TO-92, que mais se parece com um transistor (Figura 18), e oferece ótima relação custo benefício, por ser o mais barato dos modelos e propiciar a mesma precisão dos demais. A grande diversidade de encapsulamentos se dá devido à alta gama de aplicações deste integrado. Estas informações são relativas ao manual do produto que pode ser acessado em <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>.

Figura 18- Sensor LM35



### 2.5.2 Plataforma

A plataforma é definida como o sistema que serve como uma base para executar uma série de elementos, hardware ou software. Para implementar o sistema de aquisição foi decidido usar o Arduino, seu sistema é *open-source*, ou

seja, pode ser produzido ou usado por todos sem a necessidade de pagamento de direitos autorais.

O hardware do Arduino é muito simples (figura 19), porém muito eficiente, neste trabalho utilizamos o Arduino UNO. Esse hardware é composto pelos seguintes blocos (JACEE, 2012).

Figura 19- Blocos Arduino UNO



Fonte: JACEE, 2012

- Fonte de alimentação

Responsável por receber a energia de alimentação externa, que pode ter uma tensão de no mínimo 7 Volts e no máximo 35 Volts e uma corrente mínima de 300 mA. A fonte filtra e depois regula a tensão de entrada para duas saídas: 5 Volts e 3,3 Volts. O requisito deste bloco é entregar as tensões de 5 e 3,3 Volts para que a CPU e os demais circuitos funcionem (JACEE, 2012).

- Núcleo CPU

O núcleo de processamento de uma placa Arduino é um micro controlador, uma CPU, um computador completo, com memória RAM, memória de programa (ROM), uma unidade de processamento de aritmética e os dispositivos de entrada e saída. Tudo em um chip só. E é esse chip que possui todo hardware para obter dados externos, processar esses dados e devolver para o mundo externo. Os desenvolvedores do Arduino optaram em usar a linha de micro controladores da empresa ATMEL. A linha utilizada é a ATMega.

Existem placas Arduino oficiais com diversos modelos desta linha, mas os mais comuns são as placas com os chips ATmega8, ATmega162 e ATmega328p. Esses modelos diferem na quantidade de memória de programa (ROM) e na configuração dos módulos de entrada e saída disponíveis (JACEE, 2012)

- **Entradas analógicas**

Temos disponíveis no Arduino Uno 6 entradas analógicas. Ao contrário de uma entrada digital, que nos informa apenas se existe ou não uma tensão aplicada em seu pino, a entrada analógica é capaz de medir a tensão aplicada. Através da entrada analógica, conseguimos utilizar sensores que convertem alguma grandeza física em um valor de tensão que depois é lido pela entrada analógica (JACEE, 2012).

- **Entradas digitais**

No total temos disponíveis 20 pinos que podem ser utilizados como entradas digitais. Os 14 pinos digitais mais os 6 pinos analógicos, podem ser programados para serem entradas digitais. Quando um pino é programado para funcionar como entrada digital, através do programa que escrevemos colocamos um comando que ao ser executado efetua a "leitura" da tensão aplicada ao pino que está sendo lido. Então, após a execução deste comando, sabemos se o pino encontra-se em um estado "alto" ou "baixo". Na prática, o programa pode saber se um pino está alimentado com 0 (zero) ou 5 Volts. Essa função é utilizada geralmente para identificar se um botão está pressionado, ou um sensor está "sentindo" alguma coisa no mundo externo. Note que a função de entrada digital apenas entrega 0 ou 1, sem tensão ou com tensão. Não é possível saber quanta tensão está sendo aplicada no pino. Para isso usamos as entradas analógicas (JACEE, 2012).

- **Saídas digitais**

Com uma saída digital podemos fazer com que um pino libere 0 volts ou 5 volts. Com um pino programado como saída digital, podemos acender um led, ligar um relé, acionar um motor, dentre diversas outras coisas. Podemos programar o Arduino para no máximo 20 saídas digitais, porém podemos utilizar um ou mais pinos para controlar um bloco de pinos (JACEE, 2012).

- **O Software**

Quando tratamos de software na plataforma do Arduino, podemos referir-nos: ao ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino e ao software desenvolvido por nós para enviar para a nossa placa (figura 20). O ambiente de desenvolvimento do Arduino é um compilador GCC (C e C++) que usa uma interface gráfica construída em Java. Basicamente se resume a um programa IDE muito simples de se utilizar e de estender com bibliotecas que podem ser facilmente encontradas. As funções da IDE do Arduino são basicamente duas: Permitir o desenvolvimento de um software e enviá-lo à placa para que possa ser executado (JACEE, 2012).

Figura 20- Ambiente de programação



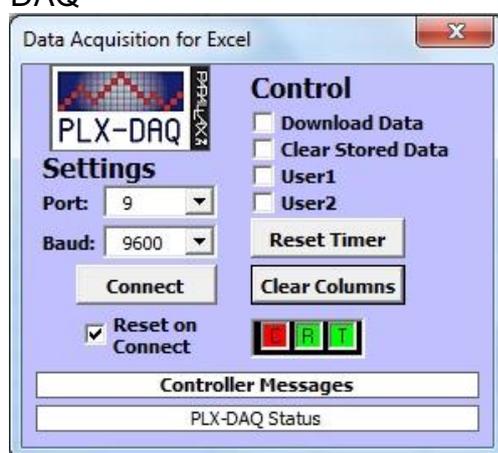
Fonte: JACEE, 2012

### 2.5.3 Visualização e armazenamento de dados

A comunicação entre o Arduino e o computador é mantida através da interface USB em que o Arduino está conectado. A interface USB é reconhecida como uma porta serial COM. Esta interface é utilizada para transmitir todas as informações entre o computador e o Arduino. Para fins de depuração, a comunicação de dados através desta interface pode ser exibido na tela do laptop usando o monitor COM incluídos no ambiente de *front-end* Arduino. No entanto, os dados adquiridos devem ser salvos em um arquivo de texto para processamento futuro. Esta tarefa pode ser feita usando o software de registrador de dados que grava todas as informações (PÉREZ et al, 2013).

O software de Aquisição de Dados Parallax (PLX-DAQ) é uma ferramenta que é adicionada ao software Microsoft Excel e pode adquirir até 26 canais de troca de dados com qualquer microcontrolador Parallax. O PLX-DAQ fornece uma fácil análise em planilhas de dados coletados em campo, através de sensores e monitoramento em tempo real do equipamento. O software é *open-source* e sua interface com o usuário pode ser visualizado na figura 21. Estas informações e o download do PLX-DAQ encontram-se disponíveis em (<http://www.parallax.com/downloads/plx-daq>).

Figura 21- Interface PLX-DAQ



Fonte: O Autor (2014)

### 3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Através da revisão bibliográfica fica claro que para instrumentar um coletor solar térmico, necessita-se de dados de temperatura interna e externa ao coletor. Nesta seção é demonstrado o método que foi utilizado para adquirir tais dados. O sistema de aquisição de dados utilizou o sensor de temperatura LM35, sensor que possui baixo custo, ótima precisão, e grande difusão no mercado, também utilizou a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino, dispositivo de software e hardware livres. Para realizar a leitura de dados e gráficos foi utilizado o software livre PLX-DAQ, este software realiza a leitura de dados recebidos pelo computador através do Arduino, os dados são armazenados e visualizados pelo software Microsoft Excel utilizando um computador portátil.

### 3.1 Construção do coletor solar

O coletor solar foi projetado para funcionar como um aquecedor de ar, sua caixa foi construída em madeira com dimensões de 96 centímetros de comprimento e 48 centímetros de largura. Foram abertos orifícios para o encaixe dos *coolers*, duas aberturas para *coolers* de entrada e uma abertura para o *cooler* de saída. Para direcionar o fluxo de ar foram utilizadas hastes de madeira, o conjunto pode ser visto na figura 22.

Figura 22- Caixa do coletor



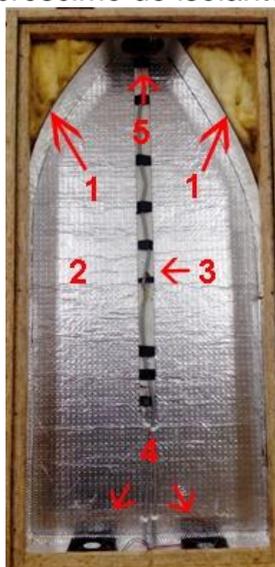
Fonte: O Autor (2014)

1-Fundo do coletor, 2- Hastes de direcionamento do fluxo

3- Orifício de saída de ar, 4- Orifício de entrada de ar

O fundo e as laterais internas do coletor foram revestidos com uma manta aluminizada, este material possui uma superfície refletora funciona como isolante, diminuindo as perdas térmicas. Entre caixa coletora e hastes de direcionamento de ar foi colocado lã de vidro, esta funciona como isolante térmico preenchendo este espaço inutilizado criado pelas hastes, este conjunto pode ser visualizado na figura 23.

Figura 23- Coletor solar com o acréscimo de isolantes térmicos



Fonte: O autor (2014)  
1-Lã de vidro, 2-Manta aluminizada  
3-Sensores, 4-Entrada de ar  
5-Saída de ar

Para funcionar como absorvedor foi utilizada uma chapa galvanizada, a superfície desta chapa foi coberta com tinta preta fosca, aumentando a transferência de calor entre superfície absorvedora e fluido de circulação (ar). Foi utilizado um vidro com 3 mm de espessura para a cobertura do coletor, silicone líquido foi utilizado para vedar o encaixe com a caixa coletora. Para dar suporte ao coletor foi utilizado um cavalete com uma inclinação de  $47^\circ$  com a horizontal, esta inclinação foi calculada através do programa Radiasol, ela é a melhor inclinação média anual para a região de estudo. O coletor solar pode ser visualizado na figura 24.

Figura 24- Coletor solar térmico finalizado



Fonte: O autor (2014)

### 3.2 Montagem do sistema forçado de ar

O sistema forçado foi construído com o intuito de se obter uma vazão controlada de ar na saída do coletor. Para sua construção foram utilizados três *coolers* com alimentação de 12 volts e 0,15 Amperes. Dois deles foram posicionados na parte inferior e um na parte superior do coletor (figura 25). Foi utilizada uma fonte variável de corrente contínua para alimentação dos *coolers*. Estes foram interligados em paralelo, logo a tensão aplicada nos terminais dos *coolers* era a mesma para todos. Foi montado um interruptor liga/desliga para cada *cooler*, com a intenção de se ter um maior controle de vazão de ar na saída do coletor.

Figura 25- Disposição dos coolers e suas conexões



Fonte: O autor (2014)

1-Cabos de conexão ligados em paralelo, 2-Cooler de saída, 3- Interruptores dos coolers  
4 e 5-Coolers de saída

### 3.2.1 Dados de vazão do sistema forçado de ar

Para o levantamento de dados de vazão foi realizado um teste com o coletor à temperatura ambiente (18C<sup>o</sup>). Com o auxílio de um anemômetro tipo ventoinha, a medida de velocidade do ar foi realizada na saída do coletor. Os testes foram realizados em três etapas: na primeira etapa o *cooler* de saída foi retirado. Foram ligados apenas os *coolers* de entrada e foi aplicada uma tensão de 4 volts. Os dados de velocidade obtidos com o anemômetro eram anotados. Era acrescentado 1 volt a cada leitura até a tensão chegar aos 12 volts. Na segunda etapa apenas o *cooler* de saída era ligado. O procedimento de medida de velocidade era o mesmo. A primeira leitura com uma tensão de 4 volts aplicada, variando de 1 em 1 volt até 12 volts. Na terceira etapa todos os *coolers* eram ligados. As leituras eram realizadas com as mesmas variações das anteriores. A tabela 2 demonstra quais os *coolers* eram ligados em cada etapa.

Tabela 2- *Coolers* ligados em cada etapa

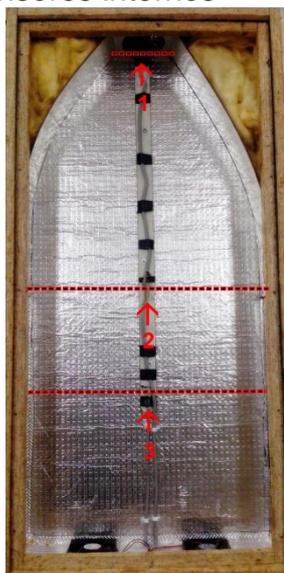
Etapa	Entradas	Saída
1	x	
2		x
3	x	x

Fonte: O Autor (2014)

### 3.3 Instalação dos sensores

Os sensores foram distribuídos ao longo do coletor, foram utilizados quatro sensores LM35. Três dos sensores foram instalados no interior do coletor em regiões que chamamos de “baixo”, “meio” e “saída” do coletor (figura 26). O quarto sensor foi instalado na parte exterior do coletor e o chamamos de “ambiente”. Com este tivemos o cuidado em fixá-lo em um ponto onde não existisse incidência direta de radiação solar, ou seja, na parte de trás do coletor (figura 27), não afetando nas leituras obtidas.

Figura 26- Apresentação dos sensores internos



Fonte: O autor (2014)  
1-Saída, 2- Médio, 3- Baixo

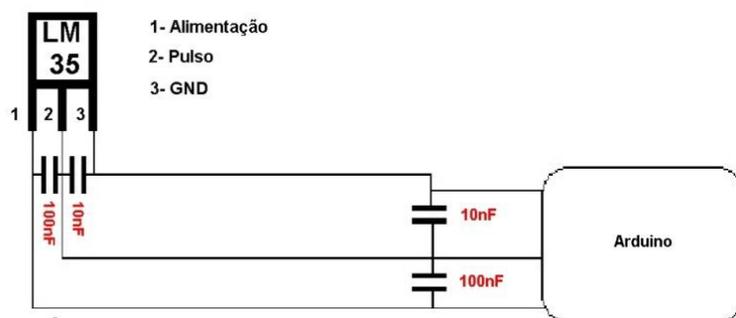
Figura 27- Apresentação do sensor externo



Fonte: O autor (2014)  
1-Ambiente

Utilizando o compilador do Software Arduino implementamos dois códigos, um com uma leitura direta do sensor (Apêndice A), e outro aplicando o filtro de Kalman (Apêndice B) através das equações (13, 14, 15, 17, 18). Foi realizada uma primeira análise do comportamento dos sensores. Em um momento os sensores foram conectados diretamente ao módulo Arduino. Em outro momento foram utilizados dois cabos coaxiais de 3,5 metros de comprimento para fazer a conexão entre sensor e Arduino. Com esta análise ficou claro que os sensores precisariam no mínimo de um filtro físico para um funcionamento aceitável. O filtro escolhido foi o passa-baixas, montado na saída do sensor, e na chegada do módulo Arduino. Um capacitor de  $10nF$  foi montado entre terra e sinal, e um capacitor de  $100nF$  montado entre pulso e alimentação (figura 28). O filtro no lado dos sensores foi montado diretamente ao cabo coaxial, para a montagem no lado do Arduino foi confeccionado um circuito em uma placa de circuito impresso (figura 29).

Figura 28- Circuito filtro passa-baixas



Fonte: O autor (2014)

Figura 29- Montagem do filtro passa-baixas



Fonte: O autor (2014)

1-Frente da placa, 2- Verso da placa

### 3.4 Metodologia de testes com o coletor solar térmico

O Coletor solar em estudo encontra-se no laboratório 1112 da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA). Este laboratório possui um acesso com o exterior da edificação direcionado a noroeste (figura 30). Foram realizados diferentes tipos de testes para o levantamento de dados do coletor solar térmico.

- Teste 1: Através de sites meteorológicos foram escolhidos três dias ensolarados seguidos. Nestes três dias não havia nebulosidade no horário de testes. No primeiro dia (07/07/2014), as medidas foram realizadas com uma tensão de 4 volts nos terminais do sistema forçado. No segundo (08/07/2014) com 8 volts e no terceiro (09/07/2014) com 12 volts. Nestes testes apenas os *coolers* de saída permaneceram ligados, o *cooler* de entrada foi removido. A tabela (3) demonstra como qual tensão era aplicada em um referente dia.

Tabela 3- Tensão no sistema forçado aplicada no dia

Tensão Aplicada no Sistema Forçado	Teste 1 (Dias)
4 volts	07/07/2014
8 volts	08/07/2014
12 volts	09/07/2014

Fonte: O autor (2014)

Figura 30- Localização do laboratório utilizado



Fonte: Adaptado de Google Earth (2014)

O experimento começava com o coletor solar na parte interna do laboratório, os *coolers* eram ligados na tensão referente ao dia. O programa (Apêndice A) era compilado e o PLX-DAQ era habilitado para receber dados da porta USB onde estava conectado Arduino e computador. A cada dez segundos o sistema realizava uma leitura de temperatura, o teste 1 teve duração de duas horas, totalizando 720 leituras. O teste 1 começou sempre no mesmo horário pra todos dias de coleta de dados (13 horas, 17 minutos e 52 segundos). Passados dez minutos, o coletor solar térmico era posicionado no exterior do edifício. A face do coletor solar térmico (superfície do absorvedor) era posicionada sempre na mesma direção, tendo a parede do edifício como referência e colocando sempre paralelo a este. A seta na figura 30 demonstra a direção da face do coletor utilizada em todos os testes. O teste 1 teve a duração de duas horas, sendo dez (10) minutos no interior do prédio e uma hora e cinquenta minutos no exterior do edifício.

- Teste 2: O teste 2 teve uma metodologia parecida com o teste 1, porém, neste teste a hora de início da aquisição de dados foi diferente para cada dia. No teste 2 o coletor solar permanecia 20 minutos no interior do edifício, e 1 hora e 40 no lado de fora do edifício com a face paralela a este (figura 30). No teste 2 foi acrescentado ao código do programa o filtro digital de Kalman (Apêndice B). Os dados foram armazenados e visualizados da mesma forma que o teste 1, com o auxílio do Arduino, PLX-DAQ, Microsoft Excel e um computador portátil. A tensão aplicada no sistema forçado para um referente dia pode ser observada na tabela 4.

Tabela 4- Coleta de dados Teste 2

Tensão Aplicada no Sistema Forçado	Teste 2 (Kalman) (Dias)
4 volts	15/08/2014
8 volts	08/08/2014
12 volts	14/08/2014

Fonte: O Autor (2014)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

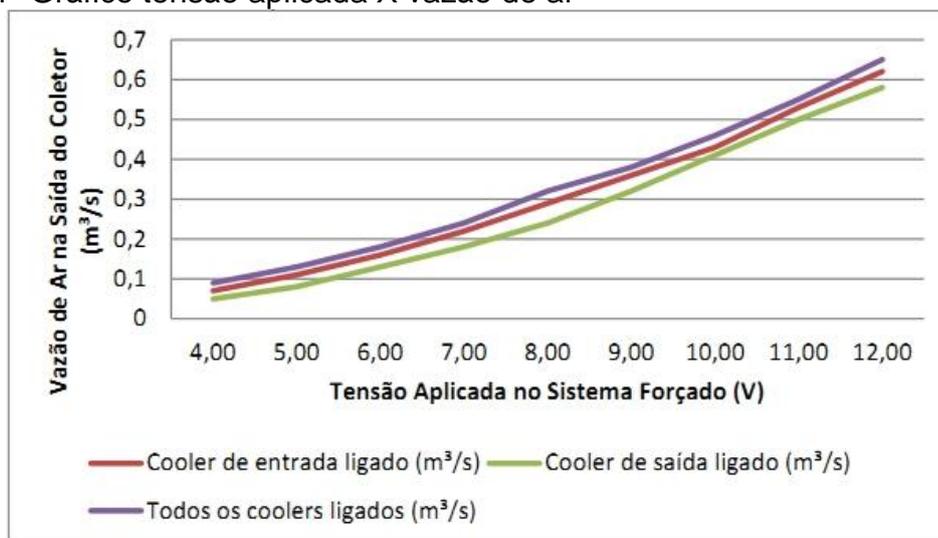
### 4.1 Construção do Coletor Solar Térmico

Como evidenciado pela literatura, o coletor solar térmico é um equipamento de simples funcionamento e com poucas partes constituintes. Foi necessário tempo e procura de materiais na construção do coletor. Uma atenção especial na construção do coletor pode ser dada para o material utilizado como isolante térmico para fundo e laterais do coletor, a manta asfáltica luminizada. Este material possui em um dos lados uma cola adesiva que facilitou sua fixação junto à caixa coletora. Como este aparato é utilizado em telhados para obstrução de goteiras, acredita-se ser um material com grande resistência a intempéries.

## 4.2 Dados de vazão de ar do sistema forçado

Como discutido na metodologia os dados de vazão foram realizados em três etapas. O gráfico da figura 31 demonstra os resultados obtidos com os testes de vazão de ar na saída do coletor.

Figura 31- Gráfico tensão aplicada X vazão de ar



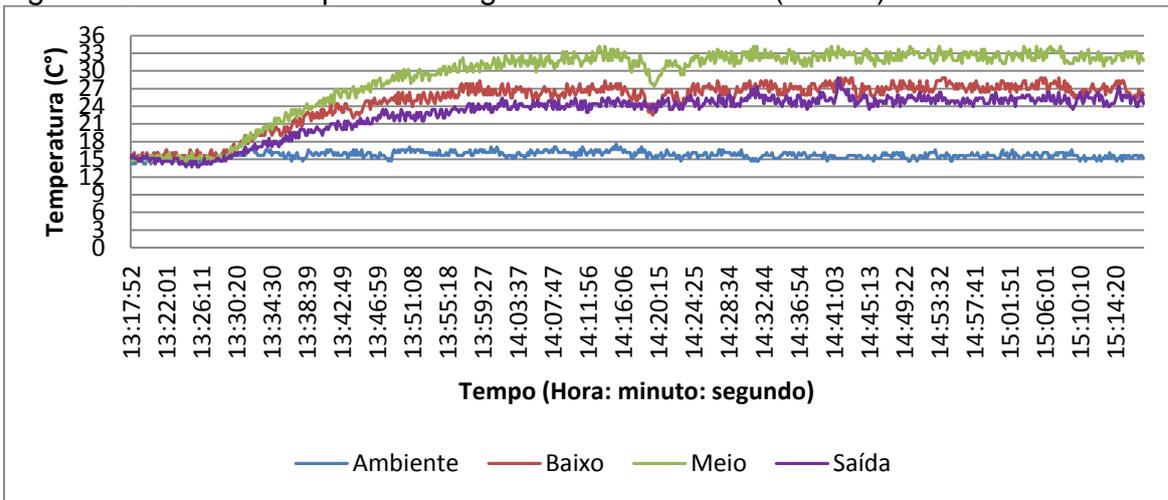
Fonte: O Autor (2014)

Como neste trabalho não chegamos a discutir o desempenho do coletor solar térmico, e na verdade estamos preocupados com o desempenho do sistema de aquisição de dados, os resultados quantitativos obtidos com o sistema de vazão não são relevantes. Foi considerável no presente trabalho obter vazões controladas na saída do coletor, tornando esta uma constante nos instantes de testes.

## 4.3 Resultados dos testes com o coletor solar térmico

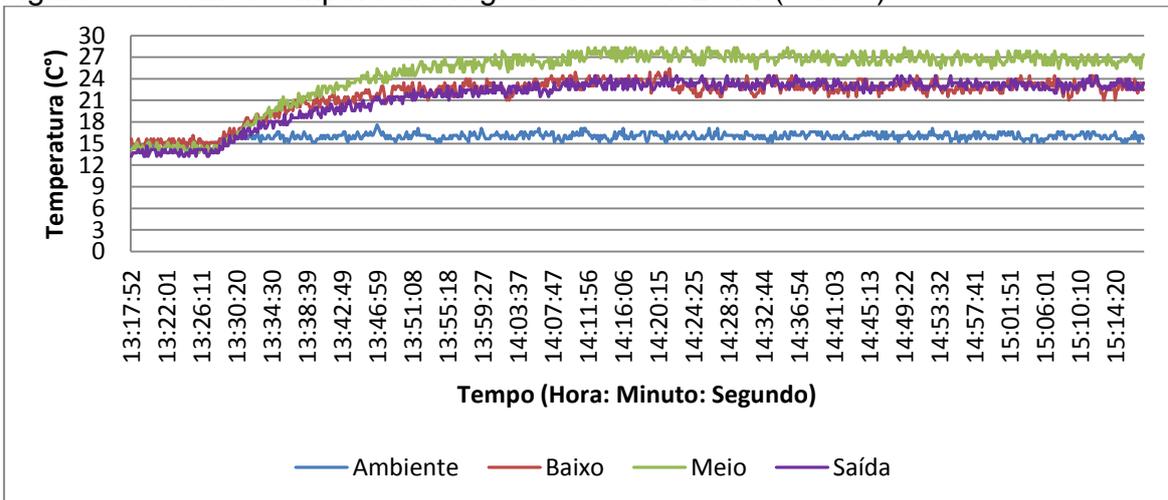
- Teste 1: O teste 1 utilizou vazões diferentes para cada dia de levantamento de dados. O coletor solar térmico ficava 10 minutos no interior do prédio e 1 hora e cinquenta minutos no exterior (exposto ao sol). O gráfico de temperatura registrada pelos quatro sensores (Ambiente, Baixo, Meio e Saída) nos dias referentes ao teste 1 (07, 08 e 09 de Julho de 2014) podem ser visualizados nas figuras 32, 33 e 34.

Figura 32- Gráfico temperatura registrada 07/07/2014 (4 volts)



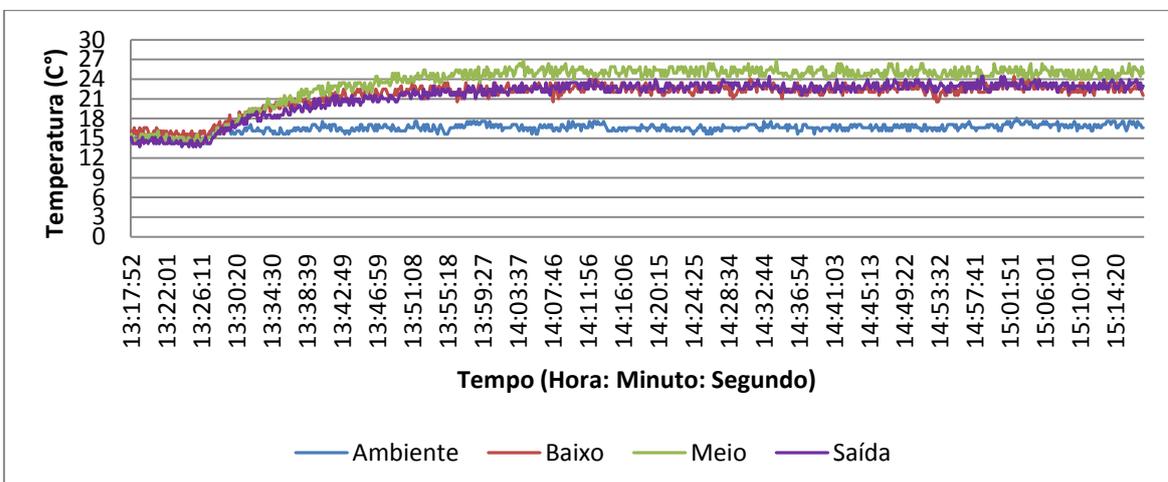
Fonte: O Autor (2014)

Figura 33- Gráfico temperatura registrada 08/07/2014 (8 volts)



Fonte: O Autor (2014)

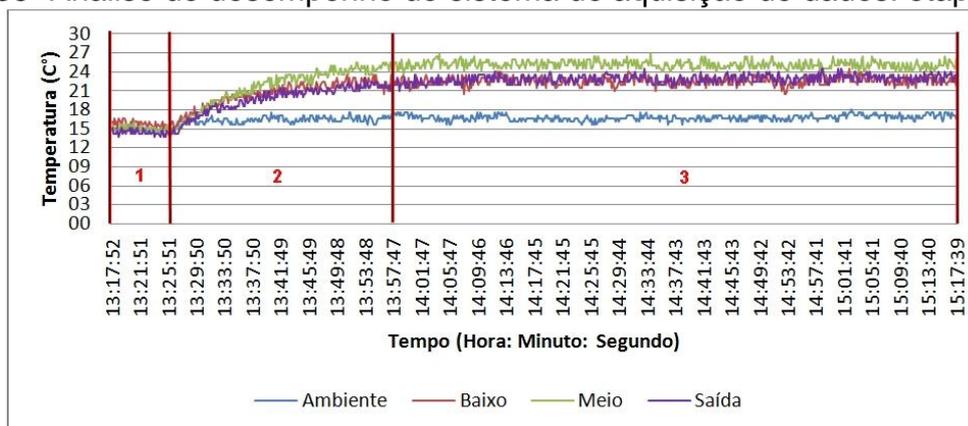
Figura 34- Gráfico temperatura registrada 09/07/2014 (12 volts)



Fonte: O Autor (2014)

Para analisarmos o desempenho do sistema de coleta de dados podemos dividir o teste 1 em 3 etapas. Na etapa 1 o coletor encontra-se no interior do edifício (10 primeiros minutos de teste), na etapa 2 o coletor é posto ao sol e absorve energia até atingir um equilíbrio, a terceira etapa é correspondente a este equilíbrio. A ilustração destas etapas pode ser observada na figura 35.

Figura 35- Análise de desempenho do sistema de aquisição de dados: etapas



Fonte: O Autor (2014)

1-Etapa interior do edifício, 2- Etapa Pós exposição ao sol, 3- Etapa Equilíbrio Térmico

Ficam claros os limites da etapa 1 em todos os testes realizados, o coletor era exposto ao sol sempre 10 minutos após o início dos testes. Para os limites da etapa 2 consideramos um tempo médio de 40 minutos para todos os testes encontrarem um equilíbrio térmico. Os limites da etapa 3 também ficaram bem evidenciados. Nesta etapa o equilíbrio térmico era alcançado.

Analisamos as etapas 1 e 3 fazendo a média e o desvio padrão da leitura de temperatura dessas etapas. Os resultados para cada um dos testes podem ser visualizados nas tabelas 5 e 6:

Tabela 5- Etapa interior do edifício

Dia	Média (Ambiente)	Desvio Padrão (ambiente)	Média (Baixo)	Desvio Padrão (Baixo)	Média (Meio)	Desvio Padrão (Meio)	Média (Saída)	Desvio Padrão (Saída)
07/07/2014	14,8	0,4	15,7	0,4	15,1	0,4	14,7	0,5
08/07/2014	14,6	0,5	15,3	0,5	14,5	0,5	14,2	0,5
09/07/2014	14,9	0,5	15,8	0,5	15,0	0,5	15,0	0,5

Fonte: O Autor (2014)

Tabela 6- Etapa equilíbrio térmico

Dia	Média (Ambiente)	Desvio Padrão (Ambiente)	Média (Baixo)	Desvio Padrão (Baixo)	Média (Meio)	Desvio Padrão (Meio)	Média (Saída)	Desvio Padrão (Saída)
07/07/2014	15,7	0,5	26,9	1,1	32,2	1,1	25,0	0,8
08/07/2014	16,0	0,4	23,0	0,8	27,0	0,7	23,2	0,6
09/07/2014	16,7	0,5	22,6	0,6	25,1	0,5	25,1	0,6

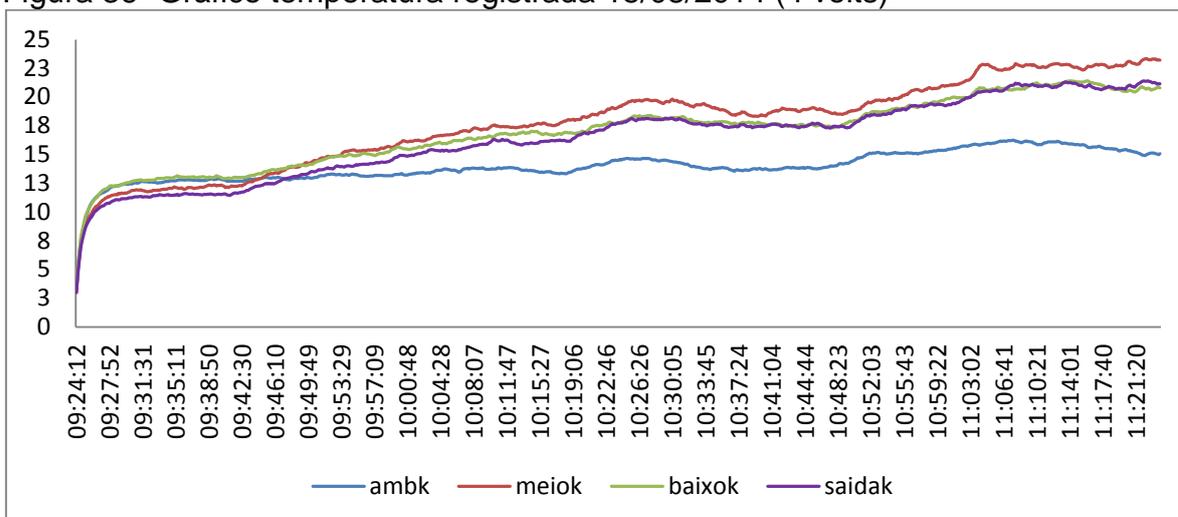
Fonte: O Autor (2014)

Lembrando que na etapa 1 o coletor estava no interior do edifício, as medidas mostram que os sensores estavam em uma região isotérmica obtendo leituras muito próximas. Através da tabela 5 nota-se uma discordância nas médias de leitura daquele intervalo (interior do edifício) de no máximo 1,0 °C no dia 08/07/2014 entre o sensor “baixo” e sensor “saída”. O desvio padrão desse intervalo de leituras fica entre 0,4 e 0,5 °C.

Na etapa 3 o coletor encontrava-se exposto ao sol há algum tempo. Nesta etapa consideramos que a leitura de cada sensor era realizada em uma região com diferente temperatura. Por esta razão só comparamos os sensores com suas próprias leituras. Notamos na tabela 6 que os sensores que encontravam-se no interior do coletor solar obtiveram uma maior incerteza em suas leituras, com desvios de 0,5 até 1,1 °C.

- Teste 2: No teste 2 acrescentamos o filtro de Kalman e iniciamos os testes em diferentes horários. No dia 15/08/2014 o teste começou às 9 horas e 24 minutos. No gráfico da figura 36 podemos visualizar a temperatura registra neste dia.

Figura 36- Gráfico temperatura registrada 15/08/2014 (4 volts)



Fonte: O Autor (2014)

Notamos que a temperatura inicial está abaixo nas primeiras leituras efetuadas, isto foi em razão da aplicação do filtro de Kalman. O filtro realizava as primeiras vinte leituras até obter estabilidade. Neste dia (15/08/2014) como as leituras começaram a serem realizadas no período da manhã (9 horas e 24 minutos) os dados de temperatura registraram um acréscimo ao longo do tempo. Isto é coerente, já que ao longo do dia a temperatura tende a aumentar. Podemos analisar os dados com o coletor solar interno ao edifício. Estes dados podem ser observados na tabela 7.

Tabela 7- Etapa interior do edifício 15/08/2014

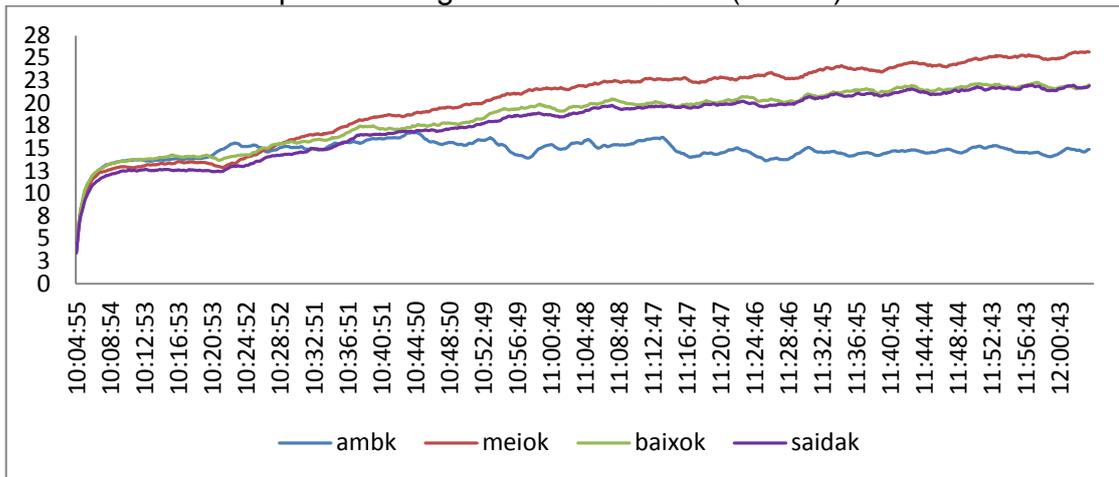
Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Ambiente	Padrão	Baixo	Padrão	Meio	Padrão	Saída	Padrão
	Ambiente		Baixo		Meio		Saída
12,6	0,2	12,8	0,3	11,8	0,3	11,2	0,2

Fonte: O Autor (2014)

Através da tabela 7 nota-se uma discordância nas médias de leitura daquele intervalo (interior do edifício) de no máximo 1,6 °C, entre os sensores chamados “meio” e “baixo”. O desvio padrão ficou entre 0,2 e 0,3 °C, desvio menor que testes sem a aplicação do filtro de Kalman.

No dia 08/08/ 2014 o teste começou às 10 horas e 4 minutos. No gráfico da figura 37 podemos visualizar a temperatura registra neste dia.

Figura 37- Gráfico temperatura registrada 08/08/2014 (8 volts)

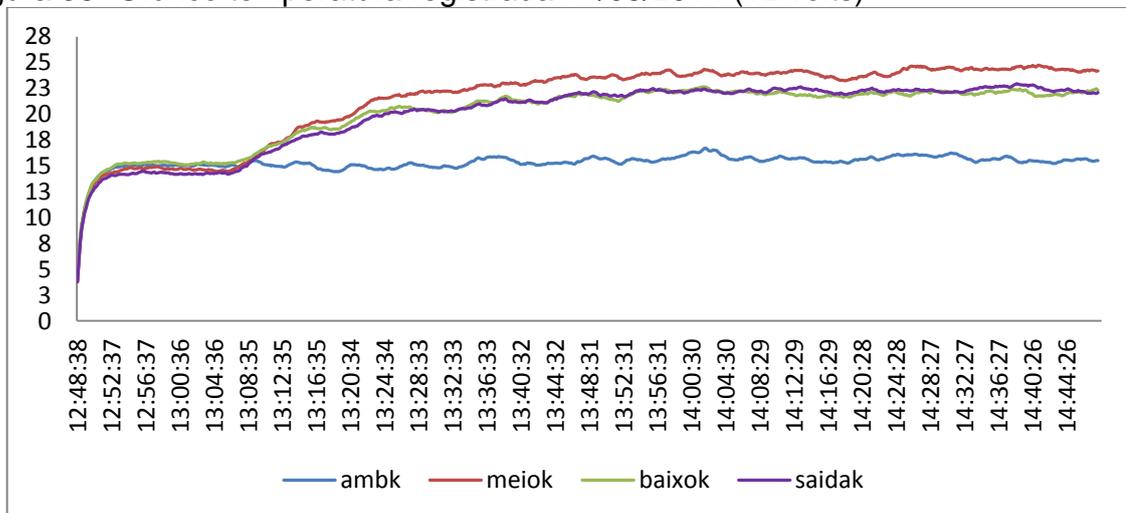


Fonte: O Autor (2014)

Observamos que para este teste 08/08/2014 a temperatura registrada no sensor de saída sofre uma grande variação por um determinado tempo entre o período que o coletor é exposto ao sol (10 horas e 20 minutos) e 11 horas e 30 minutos. Esta variação é referente há um tempo que o sensor de saída ficou exposto diretamente à incidência solar. O sensor obteve leituras incorretas e o problema foi corrigido obstruindo a incidência solar com o auxílio de uma folha de papel branco, podemos notar que logo após essa correção as leituras assumiram uma relativa estabilidade (11 horas e 30 minutos).

No dia 14/08/2014 o teste começou às 12 horas e 48 minutos. No gráfico da figura 38 podemos visualizar a temperatura registra para este dia.

Figura 38- Gráfico temperatura registrada 14/08/2014 (12 volts)



Fonte: O Autor (2014)

Pelo fato deste teste (14/08/2014) ter sido realizado em um período próximo ao meio dia (12 horas) o dividimos como no teste 1 (figura 37) e analisamos suas médias de leitura e média de desvio padrão nas etapas interior do edifício e etapa de equilíbrio térmico. Estes dados podem ser visualizados nas tabelas 8 e 9.

Tabela 8- Etapa interior do edifício (Kalman)

Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Ambiente	Padrão	Baixo	Padrão	Meio	Padrão	Saída	Padrão
	Ambiente		Baixo		Meio		Saída
15,0	0,1	15,2	0,1	14,6	0,1	14,2	0,1

Fonte: O Autor (2014)

Tabela 9- Etapa equilíbrio térmico (Kalman)

Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Ambiente	Padrão	Baixo	Padrão	Meio	Padrão	Saída	Padrão
	Ambiente		Baixo		Meio		Saída
15,6	0,3	22,0	0,3	24,0	0,4	22,2	0,3

Fonte: O Autor (2014)

Para o teste do dia 14/08 a etapa no interior do edifício registrou uma discordância nas médias de leitura de no máximo 1,0 °C, novamente entre os sensores chamados de “baixo” e “saída”. O desvio padrão para este teste ficou em 0,1 °C para todas as medidas. Na etapa do equilíbrio térmico o desvio padrão ficou entre 0,3 e 0,4 °C, demonstrando leituras menos dispersas do que as realizadas sem o filtro de Kalman (teste1).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo do coletor solar, antes de tudo, traz uma percepção do potencial energético que temos em mãos, principalmente em nosso país. Seu estudo torna-se de grande valia. Sua teoria é bem fundamentada. Com técnicas de construção e análise há muito tempo bem definidas, fica claro que existem meios para se instrumentar este sistema e que é possível atingir resultados satisfatórios. Sua construção envolve um grande número de ferramentas, aprimorando as habilidades manuais e de raciocínio do aluno.

O sistema forçado construído para obter vazões controladas de ar no coletor solar térmico obteve bom desempenho. Para posteriores trabalhos que venham a

necessitar resultados precisos de temperatura é aconselhável utilizar a tensão máxima (12 volts) para alimentar os *coolers*. Com a vazão máxima na saída do coletor as leituras de temperatura ficam menos sensíveis às variações impostas pelo clima (deslocamento de ar). As ferramentas utilizadas para instrumentação do coletor solar térmico (sensor LM35+ Arduino+ filtros+ PLX-DAQ+ Microsoft Excel+ computador portátil) obtiveram resultados satisfatórios. Por serem ferramentas de bom desempenho e acessíveis a qualquer estudante demonstraram-se ótimas para a instrumentação de um coletor solar térmico. Para aplicações que necessitam resultados de temperatura com menor dispersão deve ser utilizado o filtro de Kalman no código do programa.

### **5.1 Sugestões de trabalhos futuros**

Trabalhos na área de climatização de ambientes para armazenamento de alimentos podem vir a ser realizados em conjunto com o curso de Engenharia de Alimentos. Trabalhos na área de controle de climatização de um ambiente podem vir a ser realizados por Engenheiros de Energias Renováveis, assim como Engenheiros da Computação. Como o coletor solar térmico é um objeto simples e com um grande potencial de utilização em nosso país, trabalhos voltados para construção desse utensílio com a utilização de materiais com baixo custo para implantação em áreas de baixa renda podem ser realizados em conjunto com diferentes cursos, Engenharia Química, Engenharia de Produção e todos os demais interessados.

## APÊNDICE A: Código de Leitura dos Sensores: compilado no software Arduino

```
const int LM35 = A0; // Sensor Ambiente
const int LM351=A1; // Sensor Meio
const int LM352=A2; //Sensor Baixo
const int LM353=A3; //Sensor Saída
const float CELSIUS_BASE = 0.489; //Base de conversão para Graus Celsius ((5/1023) *
100)
int ROW = 0;
int LABEL = 1;
float amb = 0;
float meio = 0;
float baixo = 0;
float saida = 0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Time,amb,meio,baixo,saida,ROW");
}
void loop() {
  amb = (analogRead(LM35) * CELSIUS_BASE);
  meio = (analogRead(LM351) * CELSIUS_BASE);
  baixo = (analogRead(LM352) * CELSIUS_BASE);
  saida = (analogRead(LM353) * CELSIUS_BASE);
  ROW++;
  Serial.print("DATA, TIME,");
  Serial.print(amb);
  Serial.print(",");
  Serial.print(meio);
  Serial.print(",");
  Serial.print(baixo);
  Serial.print(",");
  Serial.print(saida);
  Serial.print(",");
  Serial.println(ROW);
  delay(10000);
}
```

## APÊNDICE B: Código de Leitura dos Sensores com o Filtro de Kalman: compilado no software Arduino

```
c const int LM35 = A0; // Ambiente
const int LM351=A1; //Meio
const int LM352=A2; //Baixo
const int LM353=A3; //Saída
const float CELSIUS_BASE = 0.489; //Base de conversão para Graus Celsius ((5/1023) *
100)
int ROW = 0;
int LABEL = 1;
float val = 0;
float meio = 0;
float baixo = 0;
float saida = 0;
const int a = 1;
const int c = 1;
const int H = 1;
const int R = 25;
float pa = 100;
float KK = 0;
float p = 0;
const float sigma = 2;
// variaveis para sensor 1
float xp = 0;
float ambk = 0;
// variaveis para sensor 2
float xq = 0;
float meioK = 0;
// variaveis para sensor 3
float xr = 0;
float baixok = 0;
// variaveis para sensor 4
float xs = 0;
float saidak = 0;
// começo do programa
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Time,ambk,meioK,baixok,saidak,ROW");
}

void loop() {
```

```

val = (analogRead(LM35) * CELSIUS_BASE);
meio = (analogRead(LM351) * CELSIUS_BASE);
baixo = (analogRead(LM352) * CELSIUS_BASE);
saida = (analogRead(LM353) * CELSIUS_BASE);
ROW++;
// Calculo ambk
xp=a*ambk;
p=a*pa*a+c*sigma*c;
KK=p*H/(H*p*H+R);
pa=p-KK*H*p;
ambk=xp+KK*(val-H*xp);
// Calculo meioK
xq=a*meioK;
meioK=xq+KK*(meio-H*xq);
// Calculo meioK
xr=a*baixoK;
baixoK=xr+KK*(baixo-H*xr);
// Calculo saidaK
xs=a*saidaK;
saidaK=xs+KK*(saida-H*xs);

Serial.print("DATA, TIME,");
Serial.print(ambk);
Serial.print(",");
Serial.print(meioK);
Serial.print(",");
Serial.print(baixoK);
Serial.print(",");
Serial.print(saidaK);
Serial.print(",");
Serial.println(ROW);
delay(10000);
}

```

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHK. Deutsch- Brasilianische- Industrie- und Handelskammer, Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha. Disponível em: <<http://www.ahkbrasilien.com.br/pt/>>, Acesso em: 10 março, 2014, 17:45:00

ALTENER. Energia Solar Térmica – **Manual sobre tecnologias, projetos e instalações**. Lisboa, 2004.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica- Atlas de Energia Solar no Brasil**. 2006

BRADSHAW, A. B.; **Filtros: Teoria e Prática**, Revista Elektor Eletrônica número 16, novembro 1987, pg. 14-20.

BROWN, G, R; HWANG, C. Y. P.; **Introduction To Random Signals and Applied Kalman Filtering**, Third Edition, 1996.

BUCHBERG, H., CATTON I., and EDWARDS D.K., **Natural Convection in Enclosed Space: A Review of Application in Solar Energy Collection**, Journal of Heat Transfer,98,182 (1976).

CAETANO, S.; **Notas de Aula**, ETFSC – Uned/SJ, 1995.

CHARTERS, W.W.S. and WINDOW, B.C., **Solar Collector Design and Testing**, Search 9, 1978.

CRUZ, M, S.; **Implementação de um Filtro de Kalman Estendido em Arquiteturas Reconfiguráveis Aplicado ao Problema de Localização em Robótica Móvel**, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 2013.

D. Gonzá lez-Arjona; E. Roldán González; G. López-Pérez, MM Domínguez Pérez.; **An Improved Galvanostat for the Characterization of Commercial Electrochemical Cells**. Journal of Laboratory Chemical Education, 2013.

DUFFIE. A. J., BECKMAN. A. W., **Solar Engineering of Thermal Processes**, Third Edition, John Wiley and Sons, Inc, 2006.

GOSWAMI. Y.D., KREITH. F., KREIDER. F. J., **Principles of Solar Engineering**, Second Edition, Taylor and Francis, 2000.

HAIKIN, S.; **kalman filtering and Neural networks**, Communications Research Laboratory, McMaster University, Hamilton, Edited by John Wiley & Sons, Inc., 2001.

HOLLAND, K.G.T., Unny, T.E., and Konicek, L, **Free Convection Heat Transfer Across Inclined Air Layers**, J. of Heat transfer, 1976

IBEAS., **IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, Salvador/BA, 25 a 28/11/2013. Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2013/X-009.pdf>>. Acesso em: 3 fev, 2014, 10:25:00.

JACEE, **Jornada de Atualização em Computação, Elétrica e Eletrônica**, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.

KALOGIROU, A.S. **Solar Thermal Collectors and Applications**. Elsevier, 2004

MARKUS, O.; **Circuitos Elétricos, Corrente Contínua e Corrente Alternada**, oitava edição, editora Érica Ltda, 2008.

MUSSOI, E.; **Resposta em Frequência: filtros passivos**, Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Gerência Educacional de Eletrônica, 2004.

NAVARRO, M.A.G., **Arduino Based Acquisition System for Control Applications**, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.

PALLÁS, A.R, **Instrumentos Electrónicos Básicos**, First Ed, Barcelona: Marcombo, 2006.

PARALLAX, **PLX-DAQ**, disponível em (<http://www.parallax.com/downloads/plx-daq>), acesso em: Julho de 2014.

SERRANO, L.M.V, **Sistemas de Aquisição, Processamento e Armazenamento de Dados**, Dep. de Engenharia Mecânica, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, Inst. Politécnico de Leiria, (2004).

TABOR, H, **Radiation, Convection and Conduction Coefficients in Solar Collectors**, Bulletin of the Research Council of Israel, 60, 155 (1958).

THRUN, S.; BURGARD, W.; FOX, D. **Probabilistic Robotics**. Cambridge, MA, USA: The MIT Press, 2005.

TIWARI. G.N., **Solar Energy. Fundamentals, Design, Modelling and Applications**, Fourth Edition, Alpha Science International Ltd, 2008.

TOLMASQUIM, M. T. (Org.). **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. 2003.

WATMUFF, J.H. Characters, W.W.S., and Proctor, D., **Solar and Wind Induced External Coefficient for Solar Collectors**, 1977