



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DA BAHIA/INSTITUTO DE MATEMÁTICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MECATRÔNICA**

**ACBAL RUCAS ANDRADE ACHY**

**Sistema Mecatrônico para a Avaliação Comparativa da Eficiência  
Térmica de Coletores Solares Térmicos Planos**

**Salvador**  
**2011**

**ACBAL RUCAS ANDRADE ACHY**

**Sistema Mecatrônico para a Avaliação Comparativa da Eficiência  
Térmica de Coletores Solares Térmicos Planos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em  
Mecatrônica, Escola Politécnica/Instituto de Matemática,  
Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe

Salvador  
2011

---

A175 Achy, Acbal Rucas Andrade

Sistema mecatrônico para a avaliação comparativa da eficiência térmica de coletores solares térmicos planos / Acbal Rucas Andrade Achy. – Salvador, 2011.

90 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2011.

1. Coletores solares. 2. Engenharia térmica. 3. Resíduos industriais - Reaproveitamento. 4. Energia solar. I. Pepe, Iuri Muniz. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD.: 621.47

---

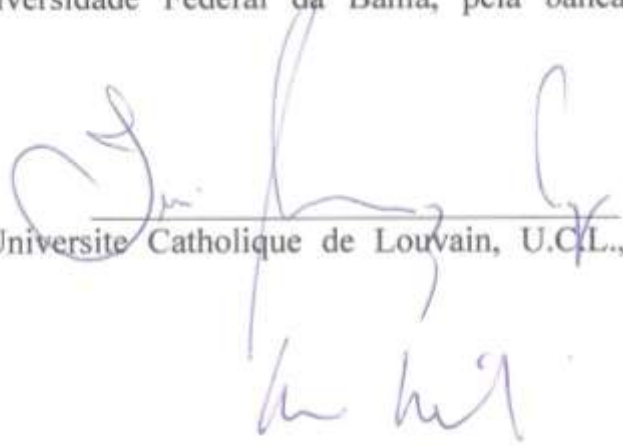
## TERMO DE APROVAÇÃO

ACBAL RUCAS ANDRADE ACHY

### Sistema Mecatrônico para a Avaliação Comparativa da Eficiência Térmica de Coletores Solares Térmicos Planos

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia, pela banca examinadora:

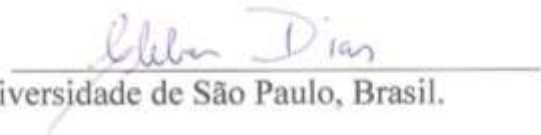
Iuri Muniz Pepe – Orientador  
Doutor em Física Nuclear, Université Catholique de Louvain, U.C.L.,  
Bélgica.  
Universidade Federal da Bahia



Denis Gilbert Francis David  
Doutor em Spectroscopie Atomique pela Université de Caen, França.  
Universidade Federal da Bahia



Cleber Marcos Ribeiro Dias  
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo, Brasil.  
Cetrel S/A



Salvador, 16 de dezembro de 2011.

Dedico este trabalho à minha família, minha noiva, e aos meus amigos, por todo apoio prestado na realização deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Antes de tudo a Deus, pela oportunidade de existir.

Ao Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe, orientador deste trabalho de mestrado, pela amizade, ajuda e confiança demonstrada durante todo o período de orientação. Pela atenção, empenho, sagacidade, moral e seriedade evidente e, acima de tudo, pelo espírito de eterna sabedoria e conhecimento científico marcante, que o torna um líder-modelo a ser seguido por todos, o qual considero, também, ser um dos meus Pais Acadêmicos.

Aos amigos e companheiros do LaPO, em especial a Luiz Simões e Valmara Ponte, pela imensa ajuda e parceria nas montagens e experimentos realizados, Itã Teodoro, pelas discussões técnicas na área de energia solar, a Lorena e Marilu, pelas ajuda e conselhos oportunos, Nádia, Eduardo Kid, Vitor Leão, Ivanoé, Demetino, Vitor Mancir, Marcos, Leo, Tales, Ângelo e a todos os outros membros do laboratório, saibam que sem vocês não teria chegado tão longe.

Aos amigos Vitor Otávio, Jorgean Leal e Joselito Lima, pelas discussões técnicas, e que acima de tudo souberam entender, com clareza, os momentos de falta na NNSolutions. Saibam que sem isso não teria construído meu sonho.

Aos meus Pais, João e Arlete, e familiares, em especial à minhas tias, Arlinda e Ana Rita, minha irmã, Jamile, minhas primas, Ana terra, Clarissa, Raquel e Ana Carolina, meu primo Laertes que sempre me incentivaram, me apoiaram, me ajudaram e por entenderem os momentos de total ausência. A minha noiva, Késia, pelo total apoio, incentivo, carinho e compreensão tida durante a realização deste trabalho.

À toda equipe técnica e administrativa da pós-graduação em mecatrônica da UFBA.

À Cetrel S/A por oportunizar o tema do projeto de mestrado, em especial a Cita nas pessoas de Cleber Dias, Alexandre Machado e Deivid Santos pelo apoio técnico e financeiro fornecido ao projeto.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pela concessão da Bolsa de Mestrado que oportunizou a realização do trabalho.

Por fim,

À todos os amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta conquista.

O meu muito obrigado!

“Se A é o sucesso, então A é igual a X mais Y mais Z. O trabalho é X; Y é o lazer; e Z é  
manter a boca fechada.”  
— Albert Einstein

## RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvida uma plataforma experimental, de baixo custo, para o teste comparativo de coletores solares térmicos. A validação da plataforma de teste foi feita caracterizando seis coletores solares térmicos, sendo quatro coletores solares fabricados a partir de resíduos industriais e duas placas solares comerciais. A bancada experimental é constituída por um sistema mecânico, um sistema hidráulico, circuitos eletrônicos de condicionamento de sinais de sensores de temperatura, do tipo PT100, e um sistema de aquisição e transmissão de dados utilizando o microcontrolador PIC 18F4550. Este último sistema se comunica com um computador pessoal via RS-485. Os testes para a validação do sistema experimental foram realizados no terraço do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia. Nos coletores de teste foram instalados dois sensores de temperatura, um na região de entrada da água fria e outro na região de saída de água aquecida. Um radiômetro CMP-3 de fabricação Kipp&Zonen e um anemômetro METEO-DIGIT I da marca Lambrecht completam a plataforma experimental. Estes dois instrumentos servem respectivamente para a determinação da irradiação solar e da velocidade do vento. Na plataforma é possível realizar os seguintes testes de caracterização de painéis foto-térmicos: (a) determinação da temperatura máxima atingida, (b) determinação do coeficiente térmico, (c) medida da constante de tempo e (d) determinação da eficiência térmica. Os resultados dos experimentos realizados na plataforma experimental (determinação da temperatura máxima) mostraram que três coletores se destacavam em eficiência. Nos testes seguintes (determinação da constante de tempo e determinação da eficiência máxima e instantânea) o coletor solar que obteve o menor tempo de resposta e a maior eficiência foi o coletor comercial fabricado pelo processo Y (PY). Entretanto, o coletor com a formulação contendo 9,0% de resíduo tipo C, fabricado pelo processo PX, apresentou eficiência similar a da placa comercial. O coletor com 5,0% de resíduo tipo A, por outro lado, apresentou eficiência 10% inferior a da placa comercial. Os resultados obtidos neste trabalho são bastante animadores quanto ao potencial do uso de resíduos absorvedores para melhorar a eficiência térmica de coletores solares plásticos.

**Palavras-chave:** Coletores solares planos, eficiência térmica, reaproveitamento de resíduos industriais, energia solar, plataforma experimental instrumentada.



## ABSTRACT

In this work we developed a low cost experimental setup for comparative testing of thermal solar panels. In order to validate the developed setup, six thermal solar panels have been investigated and characterized. Four panels are alternative devices produced with a mixing of industrial waste and polyethylene, the last two are commercial apparatus. The experimental bench is based on three sub-systems: the mechanical support, the hydraulic circuit and the electronic system for Pt100 sensors conditioning, data acquisition, data storage and data communication (RS485 protocol). The embedded intelligence is located on a PIC 18F4550 micro-controller used for parameters controlling and data management. All validation tests took place on the roof of the building of the Physics Institute of the *Universidade Federal da Bahia*. Each tested panel received two temperature sensors, one inside its cold water inlet and one inside its hot water output. One solar radiometer CMP-3, produced by Kipp&Zonen and an anemometer METEO-DIGIT I complete the test bench. Those instrument are used for irradiation and wind speed measurement respectively. The experimental setup allows at least four different tests: (a) determination of the maximum temperature reached by the solar panel, (b) determination of the panel thermal coefficient, (c) determination of the thermal panel time constant and (d) determination of the thermal panel efficiencies. The experimental results obtained with this apparatus (measuring of the maximum thermal panel temperature) showed that three of six panels have better efficiency than the others. The following tests (determination of the thermal panel time constant and determination of the thermal panel maxima and instantaneous efficiency) showed that the commercial solar panel, produced by the Y process, has the lower time constant and highest efficiency. The solar thermal collector with 5% type A industrial scrap presented efficiency 10% lower than the commercial device. The results obtained I n this work point out to the possibility of using absorber industrial scrap to enhance the thermal efficiency of plastic thermal solar panels.

**Key-words:** Flat solar collector, thermal efficiencies, reuse of industrial waste, solar energy, instrumented experimental setup.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Sistema de Aquecimento Solar .....	2
Figura 2.1 – Representação do espectro solar .....	7
Figura 2.2 – Curva de corpo negro .....	8
Figura 2.3 – Irradiância solar a 1 UA do Sol – Constante Solar .....	9
Figura 2.4 – Influência da atmosfera terrestre na radiação solar incidente .....	10
Figura 2.5 – Coletores solares .....	12
Figura 2.6 – Coletor solar a Ar .....	12
Figura 2.7 – Coletor solar a vácuo e as camadas que são envolvidas .....	13
Figura 2.8 – Tubo de calor para aquecimento por meio da circulação interna do fluido.....	13
Figura 2.9 – Concentrador cilíndrico .....	14
Figura 2.10 – Concentrador paraboloide .....	14
Figura 2.11 – Reta da eficiência térmica instantânea de uma placa solar plana .....	16
Figura 2.12 – Em (a), coletor alternativo e em (b) coletor tradicional .....	18
Figura 2.13 – Desenho dos encapsulamentos dos RTD .....	22
Figura 2.14 – Limite de Erro em função da Temperatura para o Pt-100 .....	23
Figura 2.15 – Variação da temperatura em função do material que é confeccionado o RTD .....	25
Figura 2.16 – Curvas características para os NTCs e PTCs .....	27
Figura 2.17 – Curvas características dos NTCs .....	28
Figura 2.18 – Alteração do fator $\beta$ em relação à temperatura .....	29
Figura 2.19 – Caixa térmica para ter o ambiente e a temperatura controladas e conhecidas .....	31
Figura 2.20 – Curva caraterística para os NTC .....	31
Figura 2.21 – Curva de caracterização da potência pela diferença de temperatura .....	32
Figura 2.22 – Curva de resfriamento livre de um sensor termo-resistivo .....	34
Figura 2.23 – Circuito de polarização para a configuração a tensão constante .....	35
Figura 2.24 – Circuito com fonte de corrente constante para polarizar o sensor .....	36
Figura 2.25 – Circuito de polarização para a topologia do circuito a temperatura constante .....	37
Figura 2.26 – Piranômetro da Kipp & Zonen que foi utilizado no projeto .....	38
Figura 2.27 – (a) Anemômetro digital de hélice. (b) Anemômetro do tipo concha .....	40

Figura 3.1 – Disposição do local e dos equipamentos utilizados no experimento .....	43
Figura 3.2 – Diagrama completo do sistema mecatrônico desenvolvido .....	44
Figura 3.3 – Estrutura mecânica para acomodação das placas solares térmicas .....	45
Figura 3.4 – Elementos de PVC utilizados para conexões hidráulica das placas solares.....	45
Figura 3.5 – Detalhe do sistema de acoplamento nos coletores solares avaliados .....	46
Figura 3.6 – Circuito eletrônico montado para a conversão de medidas .....	47
Figura 3.7 – Diagrama eletrônico do circuito do microcontrolador .....	48
Figura 3.8 – Diagrama da interface eletrônica para aquisição dos dados dos coletores solares .....	49
Figura 3.9 – Caixa eletrônica 1: Módulo de aquisição de sinais e transmissão de dados.....	50
Figura 3.10 – Interface gráfica de aquisição e armazenamento dos canais de temperatura.....	50
Figura 3.11 – Sensores de temperatura sendo calibrados. Na esquerda, o termômetro Ti-33, o multi-termômetro com os PT-100, na direita o computador pessoal .....	51
Figura 3.12 – Pt-100, mergulhão e termômetro digital Ti-33 em um caldeirão isolado.....	52
Figura 3.13 – Cooler contendo água, gelo, sensores PT-100 e termômetro digital Ti-33 (cabo preto) .....	52
Figura 3.14 – Bomba de porão utilizada na plataforma experimental .....	54
Figura 3.15 – Diagrama eletrônico do módulo de potência .....	55
Figura 3.16 – Piranômetro da Kipp & Zonem á frente e coletores solares ao fundo.....	55
Figura 3.17 – Diagrama de blocos da montagem para a medida de irradiância.....	56
Figura 3.18 – Anemômetro instalado na plataforma experimental .....	57
Figura 3.19 – Diagrama da disposição das placas solares e de rotulação dos sensores de temperatura .....	60
Figura 3.20 – Disposição das placas solares térmicas durante os testes .....	60
Figura 3.21 - Diagrama experimental da resposta ao degrau .....	62
Figura 3.22 - Setup experimental do teste de eficiência máxima .....	63
Figura 3.23 – Setup montado para o ensaio de eficiência instantânea .....	64
Figura 4.1 – Medida da velocidade do vento durante os ensaios. Em preto, a medida do dia 24/01/2011, em vermelho, a medida do dia 25/01/2011 e em verde, a medida do dia 27/01/2011 .....	66

Figura 4.2 – Irradiância solar do dia 13/11/2010 a partir das 07h15min .....	68
Figura 4.3 (a) – Gráfico das temperaturas nas placas solares da região superior e (b) – Gráfico das temperaturas da parte inferior .....	68
Figura 4.4 – Radiação solar com o instante de bloqueio total para a realização do teste de resposta ao degrau .....	70
Figura 4.5 – Gráfico da resposta ao degrau para a placa PY. Em preto a temperatura de entrada, em vermelho a temperatura de saída e em azul a constante de tempo .....	71
Figura 4.6 – Gráfico da resposta ao degrau para a placa B9%. Em preto a temperatura de entrada, em vermelho a temperatura de saída e em azul a constante de tempo .....	71
Figura 4.7 – Gráfico da resposta ao degrau para a placa A5%. Em preto a temperatura de entrada, em vermelho a temperatura de saída e em azul a constante de tempo .....	72
Figura 4.8 – Gráfico da irradiação solar do dia 31/01 .....	73
Figura 4.9 – Gráfico das temperaturas de entrada (em preto) e saída (em vermelho) na placa solar comercial PY .....	74
Figura 4.10 – Gráfico da eficiência térmica do coletor solar PY .....	74
Figura 4.11 – Gráfico da irradiação solar do dia 24/01 .....	75
Figura 4.12 – Gráfico das temperaturas de entrada (em preto) e saída (em vermelho) na placa solar C9% .....	75
Figura 4.13 – Gráfico da eficiência térmica do coletor solar C9% .....	76
Figura 4.14 – Gráfico da irradiação solar do dia 29/01 .....	76
Figura 4.15 – Gráfico das temperaturas de entrada (em preto) e saída (em vermelho) na placa solar térmica A5% .....	77
Figura 4.16 – Gráfico da eficiência térmica do coletor solar A5% .....	77
Figura 4.17 – Gráfico da irradiação solar do dia 20/02/2011 .....	79
Figura 4.18– (a) Temperaturas de entrada (preto), saída (vermelho) e do ambiente (verde) do coletor solar térmico comercial; (b) Determinação da eficiência instantânea deste coletor solar por uma aproximação linear .....	79
Figura 4.19 –Gráfico da irradiação solar do dia 08/02/2011 .....	80
Figura 4.20 – (a) Temperaturas de entrada (preto), saída (vermelho) e do ambiente (verde) do coletor solar térmico com 9% de resíduo C; (b) Determinação da eficiência instantânea deste coletor solar por uma aproximação linear .....	80
Figura 4.21 – Gráfico da irradiação solar do dia 21/02/2011 .....	81
Figura 4.22 – (a) Temperaturas de entrada (preto), saída (vermelho) e do ambiente (verde) do coletor solar térmico com 5% de resíduo A; (b) Determinação da eficiência instantânea deste coletor solar por uma aproximação linear .....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Percentual de faixa de comprimento de onda e energia eletromagnética .....	7
Tabela 2.2 – Valores de alpha, faixa de temperatura e principal benefício para o uso dos RTDs.....	26
Tabela 2.3 – Erro associado às faixas de temperatura.....	30
Tabela 3.1 – Curvas de calibração dos doze canais de leitura de temperatura .....	53
Tabela 3.2 – Equações das perdas térmicas pela influência do vento levando em consideração a sua direção em relação ao azimute, sendo $V_w$ , a velocidade do vento .....	58
Tabela 4.1 – Comparação entre as maiores temperaturas das placas solares .....	69
Tabela 4.2 – Coeficientes de aquecimento das placas solares .....	69
Tabela 4.3 – Valores das constantes de tempo obtidas durante os ensaios dos coletores solares térmicos .....	72
Tabela 4.4 – Valores da eficiência térmica para as placas solares térmicas ensaiadas .....	78

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
B	Radiação espectral do corpo negro
c	Calor específico da água
$F_R$	Fator de remoção do calor
$G_T$	Radiação solar incidente no plano do coletor térmico
I	Corrente elétrica
kWh	Quilowatt-hora
NTC	Negative Temperature Coefficient
P	Potência
PC	<i>Personal Computer</i>
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
$Q_u$	Energia útil
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i>
t	Tempo
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
T	Temperatura
TBJ	Transistor Bipolar de Junção
V	Tensão elétrica
$\dot{m}$	Vazão mássica
$\alpha$	Sensibilidade relativa
$\tau$	Constante de tempo
$\lambda$	Comprimento de onda
$\eta$	Eficiência
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann

# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivo .....	4
1.2	Objetivos específicos .....	4
1.3	Estrutura da dissertação .....	5
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	6
2.1	Conceitos e termos em energia solar .....	6
2.2	Coletores solares térmicos .....	10
2.2.1	Tipos de coletores solares.....	11
2.2.2	Eficiência dos Coletores Solares .....	14
2.3	Revisão do Estado da Arte.....	17
2.4	Normas NBR para Sistemas de Aquecimento Solar.....	20
2.5	Sensores de Temperatura .....	21
2.5.1	RTD's .....	22
2.5.1.1	RTD's de uso industrial .....	24
2.5.2	Termistores .....	27
2.5.3	Caraterização de sensores de temperatura.....	30
2.5.4	Técnicas de Condicionamento de Sinais de Sensores .....	34
2.6	Radiômetros .....	37
2.7	Anemômetros.....	39
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1	Localização do Laboratório de Ensaio.....	42
3.2	Descrição do Sistema.....	43
3.2.1	Estrutura Mecânica do Sistema .....	44
3.2.2	Sistema Hidráulico .....	45
3.2.3	Sistema Eletrônico de Medição de Temperatura.....	46
3.2.4	Módulo de Potência da Bomba de Porão .....	53
3.2.5	Eletrônica de Leitura do Radiômetro.....	55
3.2.6	Anemômetro e Medida da Velocidade do Vento .....	57
3.3	Setup dos Testes Realizados .....	58
3.3.1	Análise de Maior Temperatura Atingida.....	59
3.3.2	Determinação da Constante de Tempo .....	61
3.3.3	Determinação da Eficiência Térmica Máxima .....	63

3.3.4	Determinação da Eficiência Instantânea.....	64
4.	RESULTADOS .....	66
4.1	Testes de Levantamento da Curva de Aquecimento.....	67
4.1.1	Análise de maior temperatura atingida no dia .....	68
4.1.2	Coeficiente de aquecimento da placa relativo à irradiância do dia .....	69
4.2	Avaliação da Constante de Tempo dos Coletores Solares.....	70
4.3	Avaliação da Eficiência Térmica Máxima.....	72
4.4	Avaliação da Eficiência Instantânea .....	78
5.	CONCLUSÕES e PERSPECTIVAS .....	83
5.1	Conclusões .....	83
5.2	Perspectivas .....	84
6.	REFERÊNCIAS .....	86



## 1. INTRODUÇÃO

Painéis solares térmicos são utilizados com o objetivo de aquecer fluidos, em particular água, a partir da energia que o Sol deposita na superfície da Terra. As placas planas comerciais sem cobertura geralmente utilizam materiais termoplásticos misturados ao negro de fumo para fazer a conversão de energia radiante em calor.

Neste trabalho foi projetada, desenvolvida e montada uma plataforma experimental instrumentada com a capacidade de analisar comparativamente coletores solares térmicos usando para tanto a determinação da temperatura máxima, a determinação de coeficiente térmico de aquecimento, a determinação da eficiência máxima, a obtenção da constante de tempo e por fim o levantamento da reta de eficiência térmica instantânea. A utilização de plataformas experimentais como esta, facilita a análise de coletores solares térmicos alternativos, geralmente propostos por projetos de pesquisas nos quais são desenvolvidos novos modelos de coletores solares. Um exemplo disso são os coletores foto-térmicos fabricados a partir do reaproveitamento de resíduos industriais, além de outros compósitos, visando aplicações de mais baixo custo em residências, hospitais, indústrias entre outros lugares.

A validação desta plataforma de testes foi feita utilizando um conjunto de seis painéis solares térmicos com a adição de diferentes materiais absorvedores ao plástico que os compõem. Os aditivos misturados ao polímero são resíduos ou escória industrial e essa adição busca o aumento da eficiência dos painéis e o melhor reaproveitamento dos rejeitos industriais.

Os painéis foto-térmicos foram fabricados por encomenda da Cetrel S/A, Empresa de Proteção Ambiental, localizada no Pólo Industrial de Camaçari - BA, sendo esta responsável pelo tratamento e disposição final dos efluentes e resíduos industriais. Por motivo de proteção industrial os materiais absorvedores e os processos industriais utilizados na confecção dos painéis ganharam codinomes de referência. Os codinomes das placas processadas através do processo X com as formulações contendo os diferentes resíduos são: formulação 9,0% de resíduo tipo A (A9%), formulação 9,0% de resíduo tipo B (B9%), formulação 9,0% de resíduo tipo C (C9%) e formulação 5,0% de resíduo tipo A (A5%). Duas placas coletoras comerciais serviram de referência para comparação com as demais, estas foram o coletor fabricado através do processo Y (PY)

e o coletor fabricado através do Processo X (PX) com dimensões 0,75 x 1,25 m e de 0,85 x 1,40 m, respectivamente.

Apesar de ainda ser pouco usada, a energia solar pode ser aproveitada de maneira direta; para o aquecimento de tanques de água ou ambientes, na geração de potência mecânica ou ainda na geração de energia elétrica; e não somente de forma indireta, como é mais comum: sob forma hidráulica, de biomassa, de energia eólica e do petróleo e seus derivados (TEODORO DA SILVA, 2010).

A geração de energia elétrica, na matriz energética brasileira, é feita tipicamente por usinas hidroelétricas, cerca de 77% (EPE, 2006). Este fato se deve ao grande potencial hídrico disponível e aos diversos incentivos governamentais para a utilização desta fonte de energia. No entanto, o projeto, o desenvolvimento e a implementação destas usinas hidrelétricas envolve altos custos e prejuízos ao meio ambiente no entorno das barragens. A instalação destas usinas modifica o micro sistema ecológico, e além disso, é uma fonte de energia com alto custo de geração e manutenção.

O uso doméstico de energia elétrica representa 24,8% do mercado de energia elétrica, com um consumo de 7.217 GWh (PROCEL, 2005). Nas residências, o uso do chuveiro elétrico responde pelo maior consumo de energia elétrica, entre 25% e 35% do gasto total. Segundo estimativa do Procel (2005), o chuveiro consome cerca de 6,2% a 8,7% do total de energia elétrica produzida no país.

Uma alternativa ao uso de sistemas elétricos de aquecimento de água, seja chuveiro elétrico, ou aquecedor elétrico, é a utilização de sistemas de aquecimento baseado em energia solar utilizando coletores solares térmicos. A figura 1.1 apresenta o diagrama de funcionamento de um sistema de aquecimento de água potável térmico.

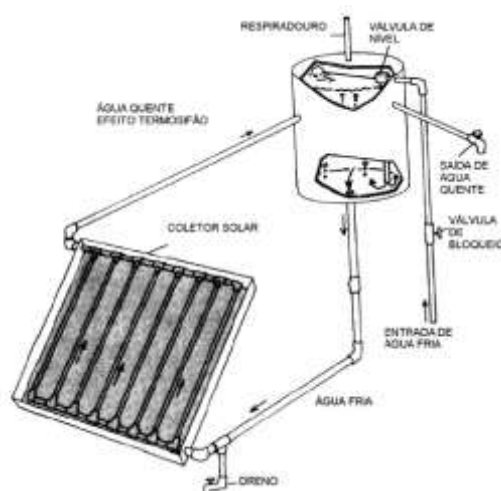


Figura 1.1 – Sistema de Aquecimento Solar (DICKINSON, CHEREMISINOFF, 1980).

Os principais elementos que compõem esse sistema de aquecimento são: o coletor solar térmico, a tubulação que interliga a placa solar ao tanque de abastecimento principal e as válvulas de interligação. Como visto na figura 1.1, o coletor é abastecido pela parte inferior com água fria e devolve, ao tanque coletor, por uma saída localizada na parte superior, água aquecida pelo Sol.

O desenvolvimento de sistemas para a avaliação da eficiência térmica de coletores solares faz-se necessário para o avanço de pesquisas relacionadas à geometria dos coletores, com a formulação química destes dispositivos, como o tipo de tratamento das superfícies, com o uso de janelas óticas, com os métodos de fabricação, com a vazão máxima de passagem do fluido, entre outras variáveis pertinentes. Os resultados desta avaliação auxiliam no desenvolvimento de novas alternativas de coletores solares para aquecimento de fluidos, coletores que poderão substituir os sistemas elétricos de aquecimento de água.

Outro ponto a ser assinalado, é o fato de que a partir deste tipo de avaliação podem ser desenvolvidos coletores solares térmicos mais eficientes, baratos e melhor adaptados à região onde serão instalados, em comparação com os comerciais. O uso de sistemas de aquecimentos auxiliares ao sistema elétrico, pode gerar, de maneira geral, uma economia na conta de energia elétrica em torno de 40% (PEREIRA et al, 2006), considerando um banho com duração média de 10 minutos.

O Brasil tem um grande potencial de energia vinda do Sol, que pode ser aproveitado por coletores foto-térmicos, porém este aproveitamento ainda é muito pequeno. Uma série de fatores impede que a energia solar seja mais largamente utilizada aqui, como por exemplo:

- Falta de planejamento e conhecimento dos governantes;
- Regras burocráticas da construção civil;
- Alto custo dos coletores solares e sua instalação ainda;
- Falta incentivos financeiro para a implementação;
- Carência de estudos técnicos sobre a tecnologia.

O uso de coletores solares térmicos para o aquecimento de fluidos, com o objetivo de complementar ou substituir sistemas de aquecimento elétrico convencionais, traz vantagens sociais como a redução da conta de energia elétrica e a geração de novos empregos por unidade de energia transformada.

No Brasil, estima-se que uma produção anual de um milhão de m<sup>2</sup> de coletores geraria aproximadamente 30 mil empregos diretos, em empresas de pequeno e médio porte, em 2006 o mercado de coletores era de 350 mil m<sup>2</sup> por ano (ABRAVA, 2008). Há também alguns projetos de lei, que incentivam a instalação de aquecedores solares nas edificações, em tramitação na cidade de São Paulo. Estes projetos foram elaborados pelo Comitê Municipal de Mudanças Climáticas e Eco-economia da Secretaria do Verde e do Meio Ambiente (PEREIRA et al., 2006).

## **1.1 Objetivo**

Desenvolver um sistema mecatrônico de teste para avaliar a eficiência térmica de coletores solares planos e descobertos.

## **1.2 Objetivos específicos**

Com o intuito de desenvolver um sistema mecatrônico de teste para avaliar comparativamente a eficiência térmica de coletores solares planos e descobertos foram seguidas as seguintes etapas:

- 1) Estudo dos coletores solares térmicos mais utilizados com o foco na área de como é feita a avaliação da sua eficiência térmica.
- 2) O estudo dos componentes eletrônicos necessários para a realização da caracterização de painéis solares térmicos: sensores de temperatura, circuitos de condicionamento de sinais do radiômetro, sistema eletrônico para aquisição de sinais, armazenamento e comunicação.
- 3) Desenvolver o sistema eletrônico de aquisição de sinais adequado para a bancada de testes, envolvendo a especificação adequada dos sensores para uso no sistema.
- 4) Calibrar os sensores utilizados no sistema de forma a obter uma curva de calibração e sua curva característica.
- 5) Desenvolver o sistema supervisor que realizará as funções de adquirir, exibir e armazenar os dados enviados pelo sistema de aquisição de dados, exibindo gráficos instantâneos e gerando relatórios da eficiência térmica do coletor solar.
- 6) Elaboração do procedimento de testes para a avaliação térmica dos coletores.
- 7) Teste do sistema e análise dos dados dos coletores instalados.

8) Validação dos resultados experimentais.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo, ou Introdução, é feita a apresentação do trabalho, discutidas a importância deste estudo, além dos objetivos gerais e específicos propostos.

O capítulo dois apresenta os termos usuais na área de energia solar; um estudo sobre o estado da arte dos coletores solares térmicos convencionais e alternativos; as Normas brasileiras que regulamentam os ensaios de avaliação da eficiência térmica destes coletores; as características físicas dos sensores de temperatura; e por fim, faz-se uma abordagem sobre sensores de medição da velocidade do vento e sensores de medição da irradiação solar que compõem o sistema de teste dos coletores solares térmicos.

O capítulo três apresenta e descreve o local em que ocorreram os ensaios dos coletores solares, o sistema mecatrônico de avaliação comparativa desses coletores e seus subsistemas: mecânico, hidráulico, eletrônico de processamento e transmissão dos dados digitais ao computador pessoal.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos durante os ensaios, as discussões pertinentes ao desempenho do sistema proposto e a avaliação dos coletores solares escolhidos.

O capítulo cinco traz as conclusões deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros baseados nos resultados obtidos.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são descritos e definidos os termos mais usuais na área de energia solar, os principais métodos utilizados para a determinação da eficiência energética de coletores solares térmicos, aplicando as normas brasileiras, bem como o projeto dos sensores que serão utilizados na bancada de caracterização. Os sensores de temperatura foram analisados quanto ao seu tipo, suas características elétricas e mecânicas, vantagens e desvantagens econômicas. Também são abordados sensores de medição da velocidade do vento e sensores de medição da irradiação solar.

### 2.1 Conceitos e termos em energia solar

O Sol, fonte de energia inesgotável para Terra, fornece, por ano, energia da ordem de  $1,5 \times 10^{18}$  kWh, esse valor corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial de energia durante o mesmo período (ANEEL, 2005). Além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar representa um enorme potencial, que pode ser aproveitado por meio da captação e conversão da luz em outras formas de energia, como a energia mecânica, química, térmica e elétrica.

Aproximadamente 30% da radiação que chega ao topo da atmosfera é refletida de forma especular, 47% é absorvida pela atmosfera e pela superfície terrestre, provocando um aumento de temperatura. Em seguida, tanto a superfície terrestre, quanto a própria atmosfera tendem a irradiar infravermelho de volta para o espaço. Os 23% restantes penetram no sistema terrestre e passam a ser a fonte de energia térmica que impulsiona os ventos, correntes marítimas, determinando o nosso clima (MATSUURA e PICAZZIO, 2006).

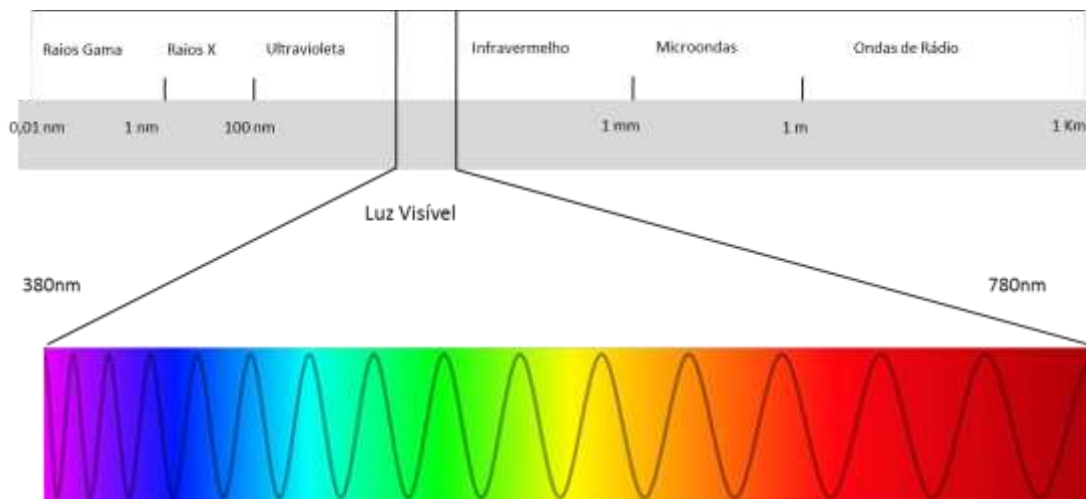
**Distribuição espectral do fluxo solar extraterrestre:** Energia radiante é entendida como um fluxo de várias unidades discretas, que no vácuo viajam a velocidade da luz, chamadas de fótons. A cada fóton é atribuído um comprimento de onda  $\lambda$  e uma quantidade de energia  $E$  relacionada pela expressão:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

Onde :  $h$  é a constante de Planck ( $6,63 \times 10^{-34}$  J.s) e  $c$  é a velocidade da luz ( $3 \times 10^8$  m/s).

Os comprimentos de onda do espectro eletromagnético estão divididos em bandas ou faixas espectrais. A radiação visível ou luz visível, a qual o olho humano é sensível, varia entre aproximadamente de 380 a 780 nm. A radiação que se encontra na faixa espectral entre

780 nm e aproximadamente 1 mm é chamada infravermelho e está subdividida em infravermelho próximo e infravermelho térmico. As ondas de irradiação com comprimentos maiores do que 1 mm são denominadas de microondas e ondas de rádio, já os intervalos de comprimentos de onda menores do que a luz visível são chamadas de ultravioleta, raios X e raios gama, como mostra a figura 2.1.



**Figura 2.1 – Representação do espectro solar (TEODORO DA SILVA, 2010).**

Denomina-se espectro solar a função distribuição da energia radiante emitida pelo Sol medida na região do espaço imediatamente antes do limite da atmosfera terrestre em função do comprimento de onda.

A faixa de comprimentos de onda do espectro eletromagnético solar se estende aproximadamente de 350 a 4000 nm. De acordo com Duffie e Beckman (1980) as diferentes faixas de comprimento de onda são responsáveis por quantidades percentuais diferentes da irradiância solar, como mostra a tabela 2.1.

**Tabela 2.1 – Percentual de faixa de comprimento de onda e energia eletromagnética.**

$\lambda$ (nm)	0 – 380	380 - 780	780 - $\infty$
Percentual (%)	6,4	48,0	45,6
Energia ( $W/m^2$ )	87	656	623

O físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) definiu um corpo negro como sendo um objeto com a capacidade de absorver toda luz que incide sobre ele, sem que haja reflexão. Irradiando a energia absorvida na mesma taxa em que a absorve, o corpo não altera sua temperatura (T) e permanece então em equilíbrio termodinâmico. Qualquer corpo em equilíbrio termodinâmico emitirá fótons com uma distribuição de comprimentos de onda ( $\lambda$ ) dada pela lei de Planck (2.2).

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (2.2)$$

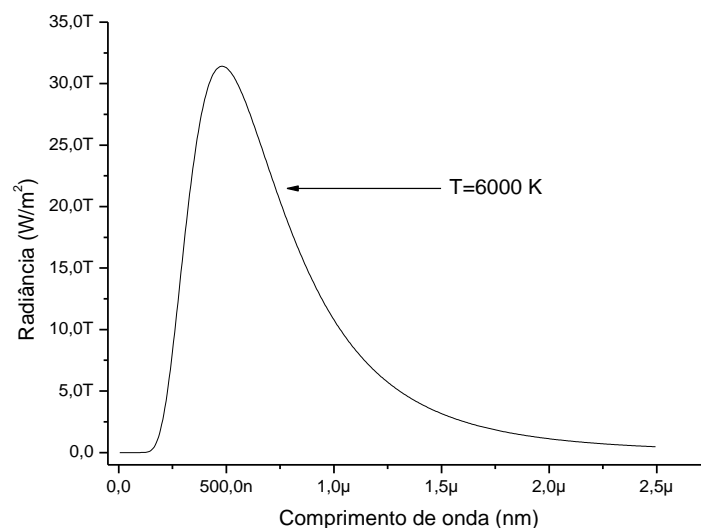
em que  $h$  é a constante de Planck,  $c$  representa a velocidade da luz no vácuo e  $k$  a constante de Boltzmann que vale  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K.

Essa radiação, chamada de radiação espectral de corpo negro ( $B$ ), ou radiação térmica, não depende da direção de emissão e não é polarizada. Josef Stefan (1835-1893) e Ludwig Boltzmann (1844-1906) descobriram, empiricamente, que o fluxo de energia, ou radiância, de um corpo negro de temperatura  $T$  é dado por (2.3)

$$I = \sigma T^4 \quad (2.3)$$

em que,  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup> é a constante de Stefan-Boltzmann. De posse desta equação é possível calcular a radiação total emitida em todas as direções e sobre todos os comprimentos de onda a partir do conhecimento da temperatura de corpo negro.

A radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre provém da região da fotosfera solar, camada superficial do Sol com uma temperatura da ordem de 5.800 K. Dada a dependência entre a composição espectral e a temperatura, traduzida na lei de Planck, a composição espectral da luz solar corresponde aproximadamente àquela que seria de esperar na radiação de um corpo negro aquecido a cerca de 5.800 K. A figura 2.2 mostra a relação entre a intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função do comprimento de onda a 6.000 K.



**Figura 2.2 – Curva de corpo negro.**

A intensidade da radiação na superfície do Sol é aproximadamente  $6,33 \times 10^7$  W/m<sup>2</sup>. Na Terra esse valor é bem menor, pois a radiação solar espalhada é inversamente proporcional ao quadrado da distância. A quantidade de energia radiante vinda do Sol, distante 1 UA, a cada



segundo, depositada em uma superfície de área  $1 \text{ m}^2$  e posicionada imediatamente fora da atmosfera terrestre é  $1.367 \text{ W/m}^2$ . Esse valor é conhecido como constante solar ( $I_0$ ).

**Constante solar:** A irradiância solar, ou seja, a quantidade de energia liberada na superfície do Sol a cada segundo, depositada em uma superfície de área  $1 \text{ m}^2$ , é aproximadamente  $I_S = 6,33 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ . Na Terra, distante 1 UA do Sol, esse valor é bem menor, como é ilustrado na figura 2.3, pois a radiação solar num ponto qualquer do espaço, a uma dada distancia  $r$ , é inversamente proporcional ao quadrado desta distância. O valor mais aceito para a irradiância solar, imediatamente fora da atmosfera terrestre é  $I_0 = 1.367 \text{ W/m}^2$  (FRÖHLICH et al., 1981).

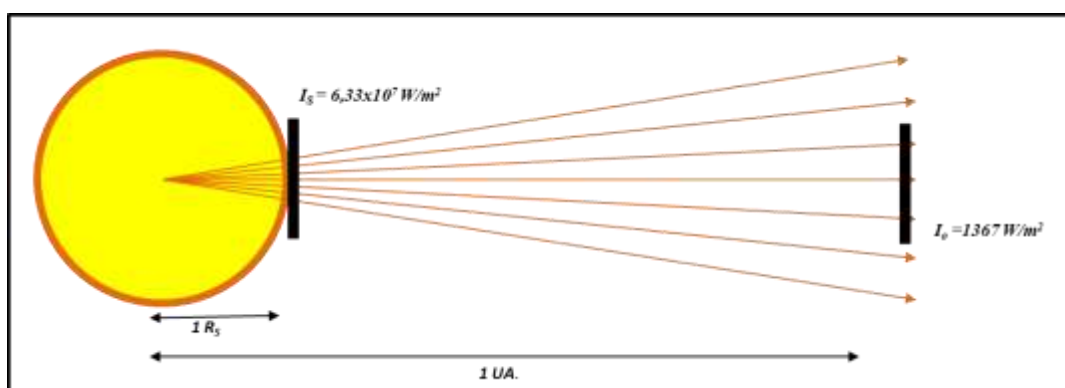


Figura 2.3 – Irradiância solar a 1 UA do Sol – Constante Solar (TEODORO DA SILVA, 2010).

**Influência da atmosfera:** Até chegar à superfície da Terra, a radiação solar incidente interage com a atmosfera terrestre, o que influencia sensivelmente na quantidade de luz solar recebida. Estas interações com a atmosfera podem ser: absorção, reflexão ou difusão. Tais interações dependem do comprimento de onda dos fótons, da composição dos gases atmosféricos e até mesmo do ângulo de incidência dos raios solares. Apenas 25% da radiação que chega ao topo da atmosfera atinge a superfície terrestre sem interagir com o meio, essa fração é chamada de radiação solar direta. 30% da energia é refletida pela camada atmosférica, pelas nuvens e pela própria superfície da Terra, sendo reenviada ao espaço. Cerca de 6% da radiação solar incidente é espalhada pela atmosfera, o que causa o efeito azulado do céu durante o dia. Todos esses fatores fazem com que a constante solar seja menor na superfície da Terra do que no topo da atmosfera. A camada de ozônio, que existe na estratosfera, a 25 km de altura, absorve quase a totalidade da radiação ultravioleta, que só alcança o solo em pequenas quantidades. O vapor d'água e o dióxido de carbono, também presentes na atmosfera, são responsáveis pela absorção de parte da faixa infravermelha da radiação. As nuvens e partículas suspensas fazem com que a radiação seja fortemente absorvida e perca sua direção inicial. Como consequência estima-se que o valor da constante

solar na superfície da Terra, em um dia claro de verão, seja próximo de  $1.200 \text{ W/m}^2$ , valor determinado em experimentos realizados em Salvador. A figura 2.4 ilustra as formas de interação da radiação solar com a atmosfera.

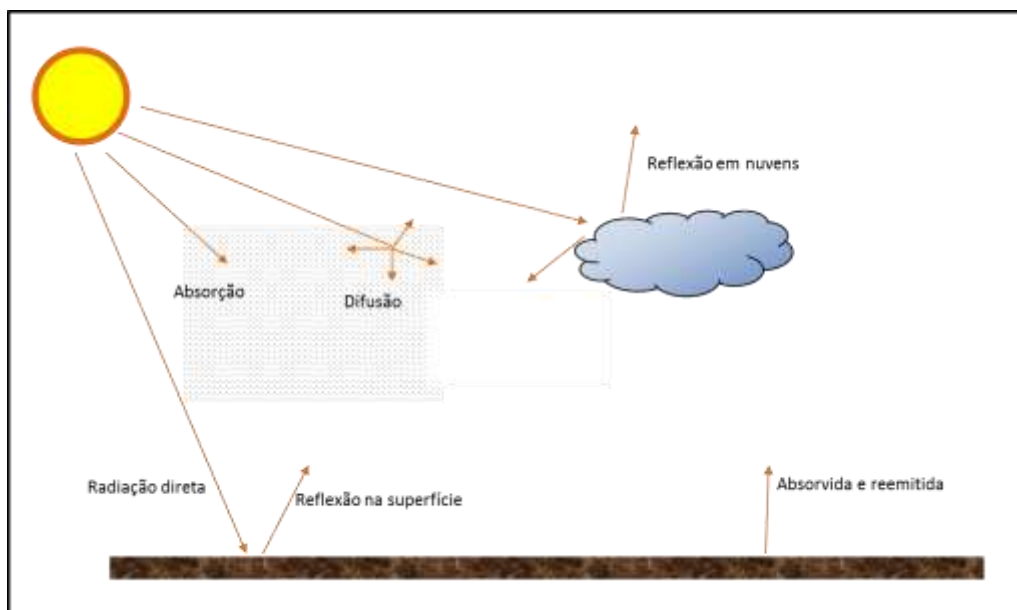


Figura 2.4 – Influência da atmosfera terrestre na radiação solar incidente.

## 2.2 Coletores solares térmicos

Coletores solares térmicos são dispositivos capazes de transformar energia solar em calor, assim sendo, são considerados trocadores de calor. A diferença dos coletores solares térmicos para os painéis solares fotovoltaicos é inerente ao próprio processo de transformação da energia. Os primeiros são usados para converter a energia do sol em energia térmica e aquecer, por exemplo, um fluido. Já os segundos são capazes de transformar luz em corrente elétrica.

O coletor solar é o principal equipamento da planta de aquecimento solar, sendo responsável pela absorção e transferência de radiação solar para um fluido sob a forma de calor (ALDABÓ, 2002).

Este sistema de captação de energia solar é muito utilizado para o aquecimento de água de uso residencial, como citado anteriormente, mas podem ser utilizados em piscinas térmicas, hospitais, secagem de grãos e processos industriais. Estes dispositivos podem ser classificados em dois tipos: os de placas planas, e os concentradores solares. A principal diferença entre estes dois sistemas é que os concentradores solares têm seu funcionamento baseados numa lente ou superfície refletora que concentra a energia

solar em pequeno volume preenchido pelo líquido, usualmente uma tubulação de cobre. Por este motivo os concentradores podem chegar a temperaturas mais elevadas que as placas solares térmicas planas. Neste trabalho, na etapa de validação da bancada de teste, foram utilizados coletores solares planos fornecidos pela Cetrel S/A para a análise e avaliação comparativa de suas eficiências.

### **2.2.1 Tipos de coletores solares**

Os coletores solares são divididos em dois tipos: aqueles que concentram a luz solar e aqueles que não usam este princípio.

Os coletores de concentração solar utilizam dispositivos de ótica para concentrar os raios solares e elevar a temperatura do fluido acima de 70°C. Estes são aplicados na indústria para aquecimento de fluidos em médias e altas temperaturas. Um bom exemplo pode ser encontrado na central solar térmica de Almeida (Espanha), em Grenoble (França) e na Califórnia (Estados Unidos).

Os coletores que não concentram a luz são utilizados para aquecimento abaixo de 70°C, e são vistos em aplicações como o aquecimento de água em residências e piscinas.

Os coletores sem concentração são divididos nos subgrupos listados abaixo:

#### 1) Coletor solar de placa plana

O coletor de placa plana atua como um receptor de energia do Sol, podendo ser do tipo isolado ou descoberto. Os coletores do tipo isolado possuem uma caixa hermética, com uma janela transparente de vidro ou plástico, permitindo a entrada da radiação, mas não a sua saída por reflexão direta ou re-emissão, esses dispositivos utilizam o princípio do efeito estufa. Estes dispositivos podem ser compostos por uma série de tubos de cobre dentro de uma caixa de alumínio revertida de material isolante e uma janela de vidro.

Os coletores do tipo descoberto não possuem qualquer tipo de isolamento e por isso sofrem mais com a influência dos ventos e de outras intempéries. Os coletores planos são aplicados na produção de água quente sanitária e na climatização de piscinas. (PROCOBRE, 2010). A figura 2.5 mostra os dois tipos mais comuns dos coletores solar planos.



**Figura 2.5 – coletores solares. Em (a) coletor em tubos coberto e em (b) placa plana.**

- 2) Coletores solares com tubos de ar: São coletores com arranjo de tubos em série, que utiliza o ar como fluido de transporte do calor. Não têm um limite de temperatura máxima e trabalham melhor em condições de circulação normal. Estes sistemas possuem uma baixa capacidade calorífica e o processo de transferência de calor entre os tubos em série é ineficiente. (PROCOBRE, 2010).

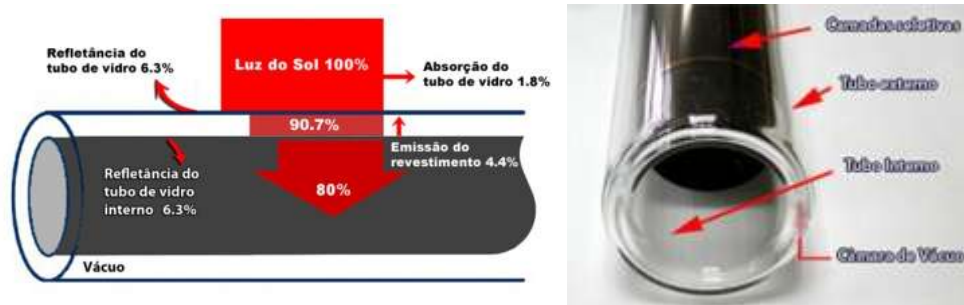
A figura 2.6 mostra o sistema de coletor solar com tubos de ar e o sistema que interligam como o trocador de calor e o tanque de água.



**Figura 2.6 – Coletor solar de Ar.**

- 3) Coletores à vácuo: Possuem dupla parede, sendo hermeticamente fechado e isolado. Neste coletor é feito vácuo entre as paredes para reduzir as perdas por convecção. Em termos de custos são mais caros do que os coletores planos convencionais. Sua principal aplicação é a produção de água quente sanitária e climatização de piscinas (PROCOBRE, 2010).

A figura 2.7 mostra o tipo de coletor solar à vácuo, nela são apresentadas as paredes de revestimentos e a porcentagem média da irradiação solar que atravessa as paredes deste dispositivo.



**Figura 2.7 – Coletor solar à vácuo e as camadas que são envolvidas**

- 4) Tubos de calor: Este dispositivo é formado por dois tubos concêntricos com simetria cilíndrica, sendo o tubo exterior de vidro ou material transparente isolante e um tubo interior pintado de preto ou coberto pela camada seletiva adequada. O fluido a ser aquecido circula pelo tubo interno (PROCOBRE, 2010). A figura 2.8 mostra este tipo de coletores em forma de tubos de calor.



**Figura 2.8 – Tubo de calor para aquecimento por meio da circulação interna do fluido.**

Os coletores concentradores se subdividem em concentradores cilíndricos e concentradores parabólicos. Estes sistemas são utilizados para obter médias e altas temperaturas ( $>70^{\circ}\text{C}$ ). Estes coletores utilizam dispositivos óticos para concentrar a radiação solar, a principal dificuldade deste coletor é ter um sistema que faça o acompanhamento do sol durante o dia. A seguir é feita a descrição destes tipos de coletores:

- 1) Concentradores cilíndricos: sua superfície refletora é a metade de um cilindro, coloca-se na reta focal deste cilindro uma tubulação de material condutor que faz com que o fluido no seu interior seja aquecido. Sua principal aplicação é a produção de vapor em uma central térmica. A figura 2.9 ilustra estes tipos de concentradores solares.



**Figura 2.9 – Concentrador cilíndrico.**

- 2) Concentradores parabolóides: sua superfície refletora tem a geometria de um parabolóide plano em dois eixos. Sua principal aplicação é a produção de vapor em uma central térmica.

A figura 2.10 mostra os concentradores parabólicos formados por 1.200 espelhos de 10 x10 cm. Estes espelhos estão direcionados para o foco do parabolóide, local que recebe toda a irradiação solar, de forma a aquecer o fluido que passa pelo ponto focal do arranjo.



**Figura 2.10 – Concentrador paraboloide (Fonte: ZenithSolar, 2010).**

### 2.2.2 Eficiência dos Coletores Solares

A eficiência térmica é definida como sendo a razão entre a energia útil (absorvida pela placa) e a radiação que chega a seu plano. A determinação da eficiência dos coletores solares passa pelo conhecimento de muitas variáveis como: a intensidade de radiação solar, a temperatura ambiente, o material utilizado na fabricação do coletor solar, a área de exposição do coletor dentre outros fatores. A equação 2.4 permite calcular a eficiência:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_e G_T} = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_a)}{A_e G_T} \quad (2.4)$$

Em que  $\eta$  é o rendimento ou eficiência do coletor descoberto,  $Q_u$  é a energia útil (W),  $\dot{m}$  é a vazão mássica (Kg/s),  $C_p$  é o calor específico do fluido (J/Kg°C),  $T_s$  é a temperatura na placa coletora (°C),  $T_a$  é a temperatura ambiente (°C),  $G_T$  é a radiação solar (W/m<sup>2</sup>) incidente no plano do coletor e, por fim,  $A_e$  é a área do coletor solar (m<sup>2</sup>).

A absorção da radiação solar é feita, em grande parte, pela superfície de absorção do coletor, responsável por captar a radiação incidente. Desta maneira, a melhor forma de obter uma boa absorção é tendo uma superfície preta e fosca.

A energia solar incidente sobre uma placa solar é composta por três componentes: a radiação direta, radiação difusa do céu e por último a radiação difusa refletida pelo meio. A equação matemática que descreve cada uma dessas contribuições da radiação absorvida é dada na equação 2.5:

$$S = I_b R_b \alpha + I_d \alpha \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + \rho g (I_b + I_d) \alpha \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \quad (2.5)$$

Em que,  $I_b$  é a radiação incidente direta,  $I_d$  a radiação incidente difusa,  $R_b$  é calculada como sendo a razão entre a radiação direta na superfície inclinada e a radiação direta na superfície horizontal,  $\rho g$  é a refletividade do solo no meio circundante,  $\frac{1 + \cos(\beta)}{2}$  e  $\frac{1 - \cos(\beta)}{2}$  são o fator de visão para o céu e o fator de visão para a terra, respectivamente.  $\beta$  é o ângulo de inclinação do plano coletor em referência ao plano horizontal na direção do sol e  $\alpha$  é a absorptância.

Outra forma de representar a eficiência térmica do coletor solar é explicitando-a em função de suas perdas, a este tipo de representação dá-se o nome de eficiência térmica pelo método das perdas. A equação é formada a partir da diferença da energia absorvida e suas perdas térmicas conforme a equação 2.6.

$$Q_u = A_c F_R [G_T (\tau \alpha) - U_p (T_e - T_a)] \quad (2.6)$$

Sendo  $F_R$  o fator de remoção do calor, que representa a capacidade do coletor de transferir calor para a água;  $(\tau \alpha)$  é o produto da transmitância-absortância.  $U_p$  é o coeficiente global de perdas, esta variável é a soma de todas as perdas do sistema e pode ser calculada utilizando a expressão 2.7.  $T_e$  e  $T_a$  que são as temperaturas de entrada da água na placa solar e a temperatura ambiente respectivamente. Reescrevendo a equação 2.4 nos termos da 2.6 tem-se então a 2.8.

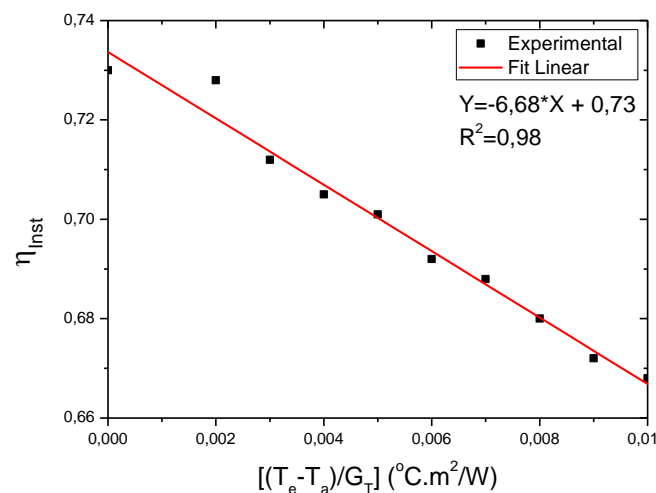
$$U_p = \frac{P_p}{A_e(T_{mp} - T_a)} \quad (2.7)$$

Em que:  $P_p = P_{abs} - P_u$ , sendo  $P_{abs}$  e  $P_u$ , definidos como  $P_{abs} = \alpha_p I A_e$  e  $P_u = \dot{m} c_p \Delta T$ .

$$\eta = \frac{Q_u}{A_e G_T} = F_R \left[ (\tau\alpha) - \frac{U_p(T_e - T_a)}{G_T} \right] \quad (2.8)$$

A reta de eficiência instantânea é obtida pela combinação dos valores de eficiência térmica  $\eta$ , determinados a partir da equação 2.4, com os valores da diferença de temperatura entre a água de entrada no coletor e a temperatura ambiente, dividida pela irradiação solar ( $(T_e - T_a)/G_T$ ). O gráfico obtido é uma dispersão de pontos com tendência decrescente, estes pontos podem ser ajustados numericamente pela reta obtida pela equação 2.8. Como exemplo, a figura 2.11 apresenta a reta de eficiência instantânea para uma placa solar térmica plana.

Expressar a eficiência instantânea na forma da equação 2.8 facilita a visualização dos parâmetros de eficiência máxima ( $F_R(\tau\alpha)$ ). Assim como das perdas globais ( $F_R(U_p)$ ) do coletor estudado.



**Figura 2.11 – Reta da eficiência térmica instantânea de uma placa solar plana coberta.**

Tanto pela equação 2.8, quanto pelo gráfico da figura 2.11 fica evidente a dependência da temperatura da água de entrada e a irradiação solar na eficiência instantânea do coletor solar plano. Quanto maior a irradiação solar e menor variação entre a temperatura de entrada e a temperatura ambiente, mais vertical será a reta da eficiência instantânea. Este fato indica que o coletor tem um pequeno fator de perdas.



### 2.3 Revisão do Estado da Arte

As pesquisas sobre o aproveitamento de energia solar no Brasil tiveram seu início no ano de 1957, segundo Macdowell (1976), quando um grupo de pesquisadores do Instituto Nacional de Tecnologia (INT) iniciou os estudos no tema e construíram uma pequena caldeira solar utilizando superfícies seletivas. Credita-se a este mesmo grupo a construção de um refrigerador solar a ciclo de absorção intermitente (SOUTO et al., 2009).

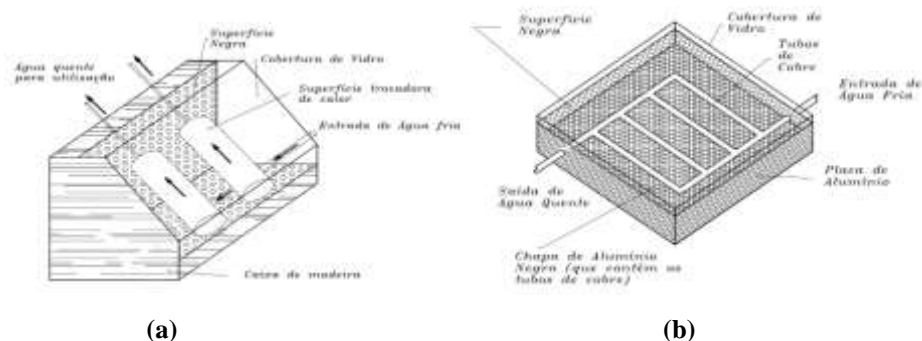
Um sistema contendo seis unidades de coletor solar confeccionado de poliestireno extrudado preto, dispostos geometricamente na forma espiral, é descrito em Saglietti et al. (1997). Os autores tiveram como objetivo reduzir custos de fabricação das placas e foi realizada uma comparação entre os custos dos coletores comercial de polietileno chegando a uma redução de custo em cerca de 1/10 do valor do coletor comercial. Os resultados práticos obtidos foram satisfatórios, recomendando-se sua utilização no entorno das famílias de baixa renda no meio rural.

Mveh (1999) discorre sobre a análise teórica e experimental da eficiência térmicas de coletores de baixo custo e sem cobertura, neste trabalho para a análise teórica são aplicados os modelos matemáticos clássicos desenvolvidos por Hottel, Whillier e Bliss e por Sharples e Chalesworth. Na prática utilizou-se uma bancada instrumentada que buscava avaliar, além da eficiência, a influência da temperatura ambiente e da velocidade do vento na eficiência dos coletores comparando a teoria com dados experimentais.

A bancada instrumentada (AQUATHERM WS83) utilizada foi fabricada na Alemanha. Ela permite o ensaio de até 2 coletores solares térmicos, a sua estrutura é móvel e mantém uma inclinação fixa de 30° em relação a horizontal, diferentemente da estrutura montada neste projeto. A WS83 possibilita controlar a temperatura da água de entrada dos coletores solares isoladamente. No laboratório de energia solar da UFRGS é possível realizar os ensaios de pressões internas dos absorvedores, além de ensaios de resistência a alta temperatura, exposição ao Sol e de choque térmico externo / interno. Este laboratório se dedica a testes de avaliação de coletores solares térmicos diferentes dos realizados no Laboratório de Propriedades Óticas.

Pereira et al. (2000) apresentaram a comparação entre a eficiência térmica de dois coletores solares, um clássico formado por uma tubulação de cobre, caixa preta e

coberto de vidro e outro com material alternativo composto de três garrafas de “big coke” de 2000 ml, uma caixa de madeira com interior negro e três dutos para a passagem de água. A figura 2.12 mostra com maiores detalhes os dois tipos de coletores. Realizou-se a avaliação da eficiência térmica com os sistemas em operação posta em condições reais. Como conclusão, foi demonstrado que os coletores alternativos no início do dia não chegam a temperaturas tão altas quanto a dos painéis comerciais, porém a sua curva característica é similar à dos painéis convencionais.



**Figura 2.12 – Em (a), coletor alternativo e em (b) coletor tradicional. (PEREIRA et al, 2000)**

Costa (2002) investigou os limites de aplicabilidade de sistemas de aquecimento sem coberturas para residências, foi utilizado um procedimento para cálculo do comportamento térmico do sistema para dias típicos em algumas regiões brasileiras, porém para isso foi necessário caracterizar experimentalmente o coletor solar proposto. Como resultado tem-se uma baixa eficiência do sistema para regiões em que a temperatura ambiente média está abaixo de 20°C, porém, entretanto, para regiões de clima tropical este sistema torna-se interessante.

Em Silva et al. (2008) é desenvolvida uma ferramenta de simulação numérica para sistemas de aquecimento de água utilizando energia solar que permite calcular a radiação solar total incidente no coletor levando em consideração as características da cobertura. Os algoritmos desenvolvidos foram baseados em modelos matemáticos pesquisados na literatura.

Uma análise da viabilidade técnica e econômica para seis coletores solares, sendo quatro convencionais e dois não convencionais de plástico, pode ser vista em Neto et al. (2008). Foram determinados o custo do dispositivo e o custo de instalação para a determinação da viabilidade técnica e econômica. Neste mesmo estudo, um novo coletor solar foi proposto e fabricado em laboratório para testes. Em um dos casos analisados um dos coletores de plástico teve seu índice econômico compatível com a de dispositivos comerciais.

Pozzebon e Krenzinger (2008) e apresentaram um software de simulação de aquecimento de água (Termosim) que contém interfaces gráficas e discussões sobre os modelos matemáticos aplicados em painéis solares térmicos. Este programa é uma ferramenta importante nas análises de comportamento térmico dos sistemas de aquecimento de água por energia solar.

Molero (2008) desenvolveu um modelo matemático multidimensional e transitório para coletores solares planos. O método utilizado foi o de elementos finitos e foi possível prever o comportamento em diferentes configurações. Além disso, foi possível analisar outros fluidos absorventes, não comumente utilizados, com placa superior semitransparente. O modelo foi validado com os resultados experimentais de um coletor solar comercial de tubos paralelos. Como conclusão, obteve-se uma boa correlação entre o rendimento real e a simulado.

Uma bancada experimental automatizada para avaliação da eficiência instantânea em coletores solares foi desenvolvida por Souto et al. (2009). Os autores desenvolveram o projeto e a implementação de unidades auxiliares de refrigeração e de aquecimento de líquido, que proporcionaram ajustes dos valores de temperatura do líquido circulante. Também foi apresentada a interface homem máquina desenvolvida para armazenar as principais variáveis de interesse para a análise. Por fim, são apresentados os valores armazenados pelo sistema, assim como a eficiência térmica do coletor analisado em acordo com a norma NBR 10184/1984.

Diferentemente da plataforma instrumentada, importada, utilizada por Mveh (1999), o equipamento desenvolvido por Souto et al. (2009) foi desenvolvido no Brasil e inovou na questão do controle da vazão. Este controle é feito por um inversor de frequência com monitoramento, a partir de um medidor de vazão, dispensando o uso de válvulas do tipo agulha. Isto produziu um sistema mais equilibrado e com menor gasto de energia elétrica.

Lopo (2010) apresenta uma análise comparativa entre coletores solares de baixo custo, feito de doze tubos de PVC de 25 mm de diâmetro, recobertos por aletas em lata de alumínio. Foram estudadas ao todo oito configurações diferentes, determinada a configuração mais eficiente e avaliados os parâmetros térmicos que comprovaram a eficiência do sistema de aquecimento. Na plataforma experimental montada para o levantamento da eficiência térmica foram utilizados instrumentos de medição comerciais. Assim, tanto temperatura, quanto irradiância tiveram seus dados coletados e

armazenados nos próprios instrumentos de medida, não necessitando de nenhuma interface homem-máquina.

## **2.4 Normas NBR para Sistemas de Aquecimento Solar**

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) estabelece uma série de Normas com o objetivo de regulamentar e padronizar os testes, uso e implementação de sistemas de aquecimento térmico.

A NBR 10184-2 descreve o procedimento de teste de eficiência, as faixas de pressão que eles devem operar, bem como as outras condições de operação descritas no projeto de instalação. A Norma inclui a resistência do material à radiação solar, e outras condições de operação sob intempéries.

Na plataforma mecatrônica desenvolvida buscou-se atender as recomendações mais importantes sugeridas pela Norma 10184-2, dentro do tema de pesquisa investigado. Sendo assim, não se verificou as pressões internas dos absorvedores de luz solar, nem tão pouco foram feitos o ensaio de resistência à alta temperatura. Isto porque, o sistema operou sempre em baixa pressão e a temperatura máxima atingida não passou de 90°C. Apesar de não serem documentados o “Ensaio de Exposição” e o “Ensaio de choque térmico externo”, durante os testes, os coletores ficaram expostos ao ar livre e as intempéries e em nenhum momento foi verificada alterações físicas em suas superfícies.

Não foi necessário realizar o “Ensaio de chuva”, o “Ensaio de resistência ao congelamento”, o “Ensaio de carga mecânica”, o “Ensaio de resistência ao impacto”, pois estes testes, além de fugirem do escopo deste trabalho, elevam em muito o custo do aparato experimental.

O item da Norma “Ensaio de desempenho térmico de coletores de aquecimento de líquidos” foi o mais importante para o projeto, pois ele descreve como deve ocorrer a campanha de testes eficiência térmica. Os parâmetros de configuração como a temperatura ambiente, irradiância solar, vazão mássica nominal, velocidade média do vento e duração de insolação mínima foram respeitados durante todos os ensaios. Entretanto, não foi feito o controle de temperatura de entrada água, solicitado no teste de eficiência instantânea, pois aumentaria muito os custos do projeto. Para contornar esta condição, no teste de eficiência instantânea, condicionou-se a água quente obtida na saída do coletor solar em um reservatório térmico isolado e realimentou-se o sistema

com a água armazenada, fazendo assim com que a temperatura de entrada se elevasse gradativamente.

Buscando evitar desvios sistemáticos nos resultados dos experimentos de levantamento da constante de tempo, eficiência máxima e eficiência instantânea, foi utilizado sempre o mesmo par de sensores de temperatura.

Outras Normas descrevem procedimentos de instalação dos coletores solares como a NBR 10185. Esta norma aplica-se aos reservatórios térmicos que compõem o sistema de aquecimento, determinando as indicações de temperatura, pressão e resistência às condições ambientais. Além de descrever os sistemas de aquecimento solar de água em circuitos diretos, projeto e instalação. Já a NBR 7198 determina sobre o projeto e instalação de água quente predial. Os requisitos de concepção, dimensionamento, arranjo hidráulico, especificação de componentes, instalação e manutenção do sistema podem ser encontrados na NBR 15569.

Estas Normas são aplicadas aos sistemas de aquecimento solar utilizando coletores planos que podem ou não ter reservatório próprio, com ou sem sistema de aquecimento auxiliar. É aplicado também no caso de sistema de circulação da água por termo-sifão ou por circulação natural. Não sendo aplicado nos casos de aquecimento de piscinas e nem para os circuitos indiretos.

## **2.5 Sensores de Temperatura**

Sensores são elementos capazes de alterar consideravelmente uma de suas propriedades físicas ou químicas em função da variação de uma dada grandeza física de interesse (observável ou grandeza monitorada). Como exemplo, podem ser citados os sensores piezoelétricos, que geram uma tensão proporcional à força mecânica externa aplicada sobre eles.

Sensores termo-resistivo são dispositivos cujo valor da resistência à passagem de corrente elétrica varia em função da temperatura do corpo do dispositivo. Estes sensores são utilizados em diferentes aplicações, desde a medição direta de temperatura, até a medição de radiação solar (WERNECK, 1996; MOREIRA, 2007; FERREIRA, 2008).

Estes sensores podem ser classificados em dois grupos: os sensores termo-resistivos metálicos, feitos a partir de um condutor, conhecidos como RTD (do inglês,

Resistance Temperature Detector), e os sensores termo-resistivos feitos a partir de semicondutores, conhecidos como termistores.

### 2.5.1 RTD's

Os RTDs são sensores termo-resistivos, geralmente metálicos, podendo ser encontrados dotados de dois, três e quatro contatos, o que permite a compensação da resistência dos cabos de alimentação e medição. As principais características dos RTDs são:

- Baixa incerteza de medição (em torno de  $0,1^{\circ}\text{C}$ );
- Alta estabilidade mecânica e térmica;
- Resistência à contaminação;
- Relação de resistência x temperatura praticamente linear;
- Desvio com o uso e envelhecimento desprezíveis;
- Além do alto sinal elétrico de saída;
- Sensibilidade baixa (aproximadamente  $0,4 \Omega/^{\circ}\text{C}$ ).

Os metais mais utilizados na fabricação dos RTDs são platina (Pt), níquel (Ni), cobre (Cu), ferro (Fe), molibdênio (Mo) entre outros metais. Neste trabalho é descrito o RTD de platina, sensor utilizado no desenvolvimento do termômetro multiponto. Na figura 2.13 é visto o desenho esquemático dos dois tipos mais comuns de RTDs:

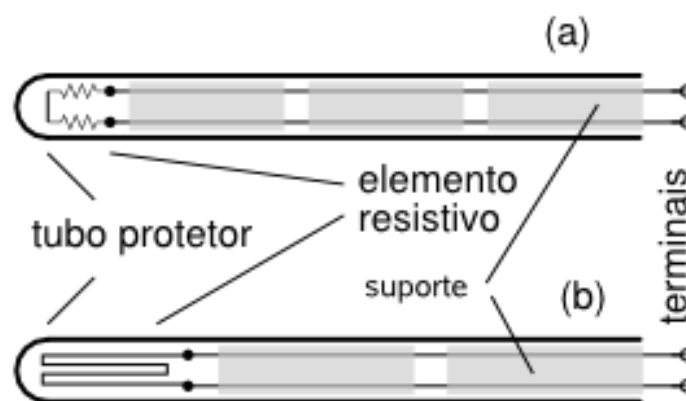


Figura 2.13 – Desenho dos encapsulamentos dos RTDs.

A figura 2.13 (a) mostra o RTD de fio metálico, neste dispositivo o fio metálico é enrolado em forma de espiral dentro de um tubo cerâmico e fica preso por suportes e espaçadores. Em (b) pode ser visto o RTD de filme, neste caso um filme metálico é depositado sobre uma placa de cerâmica que é montada no interior de um tubo cerâmico.

O aparecimento de tensões termoelétricas, impurezas no processo de fabricação e o efeito de auto-aquecimento são algumas fontes de erro características desses sensores de temperatura. O gráfico da figura 2.14 mostra, segundo a norma DIN, os limites de erros aceitáveis em função da temperatura. A classe de qualidade do sensor determina o erro na medida, por exemplo, para um sensor classe B admite-se uma incerteza de medição de 3,3°C à 600°C.

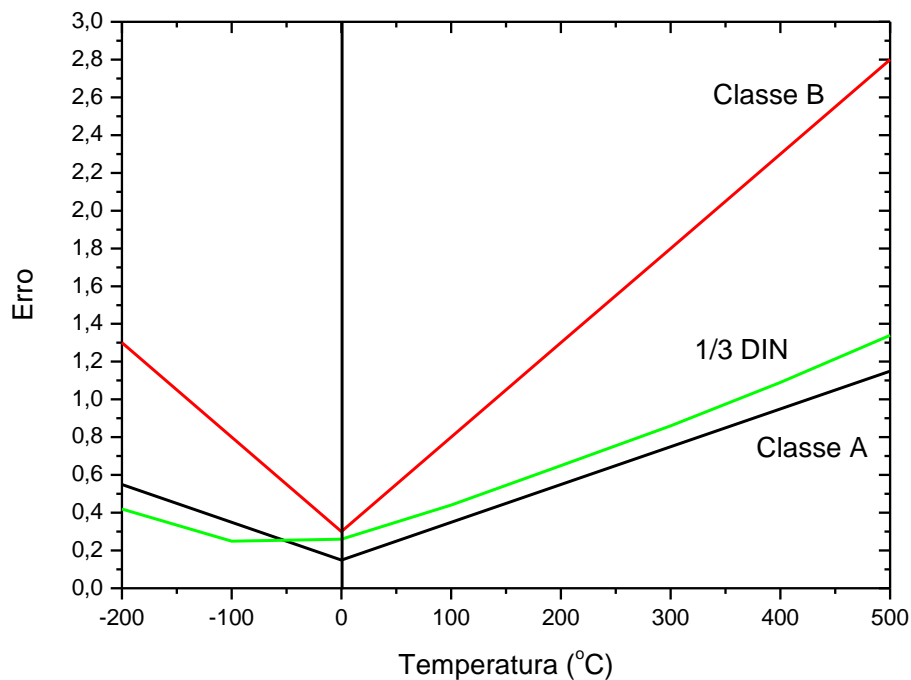


Figura 2.14 – Limite de Erro em função da Temperatura para o PT-100.

Na indústria, o tipo de RTD mais utilizados é o feito de platina. A platina é escolhida por sua estabilidade térmica em função do tempo e por ser quimicamente inerte. Este material resiste bem à oxidação operando em uma ampla faixa de temperatura, que vai de -240°C até 850°C. Em geral, para se medir a temperatura com sensores RTDs, utiliza-se uma corrente constante de baixo valor, em torno de 1 mA, com a finalidade de reduzir o erro inerente ao auto-aquecimento. Desta forma mede-se a variação de tensão entre os terminais do sensor (WEBSTER, 1999).

A nomenclatura dos RTDs é dada pela simbologia química do material que o compõe e pelo valor da resistência na temperatura de 0°C. Por exemplo, o PT-100 é um sensor feito de platina e a sua resistência teórica à 0°C é de 100 Ω. Já o Ni-120 é composto de níquel e sua resistência nesta mesma temperatura é de 120 Ω.

### 2.5.1.1 RTD's de uso industrial

**RTD's de platina** – São os mais utilizados na indústria, por causa de sua boa linearidade, ampla faixa de medição de temperatura e estabilidade. Utiliza-se geralmente cerâmica para seu encapsulamento, pois este material suporta temperaturas de até 800°C. Estes sensores operam em um intervalo que vai de -240°C até 660°C, seu coeficiente típico  $\alpha = 0,00392$  (°C/ (°C.°C)) ou °C<sup>-1</sup>. Em temperatura ambiente a resistência de isolamento entre seus terminais e a bainha de proteção deve ser em torno de 100MΩ segundo, recomendação da Norma ASTM E-1137.

**RTD's de cobre** – apesar do alto grau de linearidade o RTD de cobre é raramente usado com finalidade de termometria, pois em temperaturas acima de 100°C ele oxida rapidamente. Estes sensores não são indicados para operarem em temperaturas acima de 150 °C, seu coeficiente típico é  $\alpha = 0,00427$ °C<sup>-1</sup> para a faixa de temperatura 0 a 200°C.

**RTD's de níquel** – Estes sensores são comumente empregados em aplicações de baixo custo. Em comparação com o RTD de platina, o níquel tem menor resistência à corrosão e é menos estável em temperaturas elevadas.

**RTD's de molibdênio** – É formado por duas ligas metálicas uma de molibdênio e outra de alumina (óxido de alumínio). Como o óxido de alumínio tem coeficiente de expansão térmica próximo ao do molibdênio, estes formam um bom par de filme metálico. O coeficiente típico do RTD de molibdênio é  $\alpha = 0,00300$  °C<sup>-1</sup>. Por meio de dopagem com outros metais, é possível alterar este coeficiente para 0,00385 °C<sup>-1</sup>, o que dá compatibilidade com a platina para uma faixa mais baixa de temperatura.

A figura 2.15 mostra a comparação de variação de temperatura dos RTDs em função do material com que este dispositivo é fabricado. Nota-se a boa linearidade para os RTD's do tipo platina para a faixa de temperatura entre -200 °C e 800 °C.



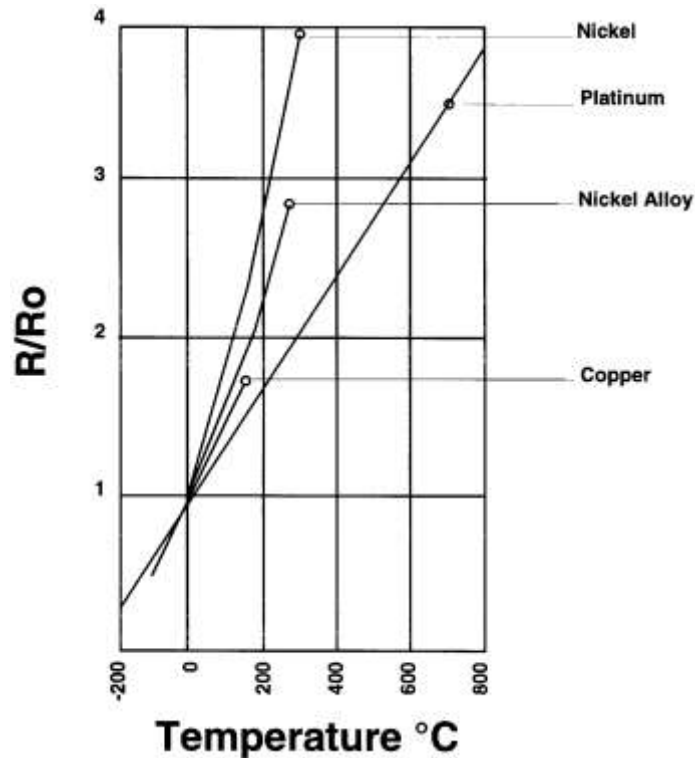


Figura 2.15 – variação da temperatura em função do material que é confeccionado o RTD (WEBSTER, 1999).

### 2.5.1.2 Equações dos sensores RTD's

Em geral a resposta dos RTD de platina pode ser aproximada por uma equação linear. Sua caracterização estática pode ser feita, tanto por meio de um banho termostático, quanto por um ensaio elétrico em que se aplica um degrau de potência e mede-se a temperatura superficial do sensor. Este ensaio é realizado com o sensor imerso no ambiente de temperatura controlada (AMAURI, 1996; MILENA, 2007).

Segundo CARR (1993) e FRADEN (2003) a equação da resistência em função da temperatura é dada por (2.9):

$$R(T) = R_0(1 + \alpha_1\Delta T + \alpha_2\Delta T^2 + \alpha_3\Delta T^3 + \dots + \alpha_n\Delta T^n), \quad 1 < n < \infty \quad (2.9)$$

Em que,  $R_0$  é a resistência do RTD à temperatura 0 °C,  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  são os coeficientes da equação característicos do material,  $\Delta T$  é a variação da temperatura em °C.

Quando se trata da medição de variações pequenas de temperaturas a equação 2.9 pode ser simplificada para uma equação linear ficando igual à equação 2.10:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha_1\Delta T) \quad (2.10)$$

Uma interpolação simplificada, conhecida como equações de Callendar Van Dusen, foi inicialmente proposta por Hugh Longbourne Callendar e em seguida refinada por M. S. Van Dusen, descreve o comportamento dinâmico e a função de transferência dos RTDs de platina (FRADEN, 2003):

- Para o intervalo de temperatura entre -200 °C e 0 °C,

$$R(T) = R_0[1 + AT + BT^2 + CT^3(T - 100)] \quad (2.11)$$

- Para o intervalo de temperatura entre 0 °C até 630 °C:

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2) \quad (2.12)$$

Onde as constantes  $A$ ,  $B$  e  $C$  são determinadas pelas propriedades da platina que foi utilizada para a construção do sensor. Uma forma alternativa e aproximada das equações de Callendar Van Dusen é escrita na forma da equação 2.13:

$$R(T) = R_0 \left\{ 1 + \alpha \left[ T - \delta \left( \frac{T}{100} \right) \left( \frac{T}{100} - 1 \right) - \beta \left( \frac{T}{100} \right)^3 \left( \frac{T}{100} - 1 \right) \right] \right\} \quad (2.13)$$

Sendo que  $T$  é dado em °C, e as constantes  $A$ ,  $B$  e  $C$  podem ser determinadas pela expressões 2.14:

$$A = \alpha \left( 1 + \frac{\delta}{100} \right), B = -\alpha\delta * 10^{-4} \text{ e } C = -\alpha\beta * 10^{-8} \quad (2.14)$$

O valor de  $\delta$  é obtido a partir da calibração do sensor em altas temperaturas e o fator  $\beta$  é obtido a partir da calibração para baixas temperaturas. A tabela 2.2 mostra os valores típicos para o coeficiente  $\alpha$  (sensibilidade relativa), a faixa de temperatura, além das vantagens do uso de certos tipos de RTDs metálicos.

**Tabela 2.2 – Valores de alpha, faixa de temperatura e principal benefício para o uso dos RTDs.**

<b>Metal</b>	<b>Faixa °C</b>	<b>Alfa (<math>\alpha</math>)</b>	<b>Observações</b>
<b>Cobre (Cu)</b>	-200 e 260	0,00427	Baixo custo
<b>Molibdênio (Mo)</b>	-200 e 200	0,00300 e 0,00385	Opção de menor custo p/ Pt em faixa limitada
<b>Níquel (Ni)</b>	-80 e 260	0,00672	O custo é baixo mas a faixa é limitada
<b>Níquel-ferro (Ni-Fe)</b>	-200 e 200	0,00518	Baixo custo
<b>Platina (Pt)</b>	-240 e 660	0,00385 e 0,00392	Boa precisão

## 2.5.2 Termistores

Os termistores são resistores sensíveis à temperatura, que experimentam uma mudança de resistência elétrica a partir da mudança de sua temperatura. Diferentemente dos RTDs, um termistor é um semicondutor (WEBSTER, 1999). A palavra termistor vem da contração das palavras térmico e resistor, sendo estas suas principais características (FRADEN, 2003).

Existem dois tipos de termistores os NTC's e os PTC's, sendo classificadas de acordo com sua resposta elétrica em função da temperatura. Os NTC's (*Negative Temperature Coefficient*) se caracterizam por uma resposta proporcional ao inverso da temperatura, sendo assim eles possuem um coeficiente de temperatura dito negativo. Já os PTC's (*Positive Temperature Coefficient*) se caracterizam por apresentarem uma variação de resistência proporcional à temperatura, ou seja, se a temperatura aumenta a sua resistência também aumenta. A figura 2.16 mostra as curvas características para os NTCs e os PTCs.

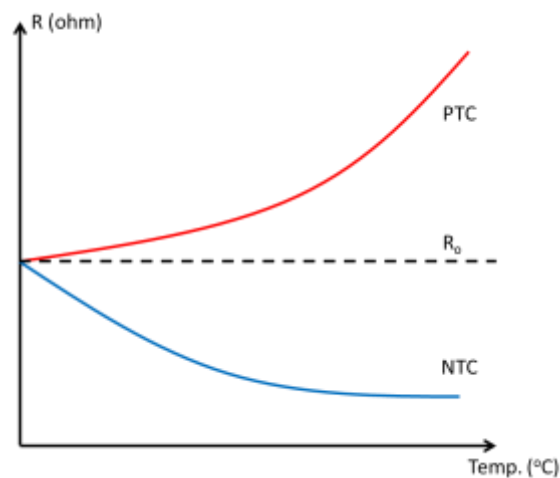


Figura 2.16 – Curvas características para os NTCs e PTCs.

As principais características dos PTCs e dos NTCs são listadas abaixo:

- Normalmente são mais baratos em comparação aos RTDs;
- Sensíveis a pequenas variações de temperaturas;
- Sua resposta é mais rápida do que os RTDs;
- PTC geralmente confeccionado a partir de metais e os NTC fabricados a partir de materiais semicondutores;
- $R \times T$  não linear, geralmente aproximada por uma função logaritmo.

### 2.5.2.1 Equações dos sensores NTCs

Como visto anteriormente os NTCs não apresentam uma relação linear entre a resistência e a temperatura medida. A variação da resistência com a temperatura pode ser vista na figura 2.17, estas curvas foram obtidas para uma caracterização estática de acordo com Webster (1999) e Pallas-Areny (1998).

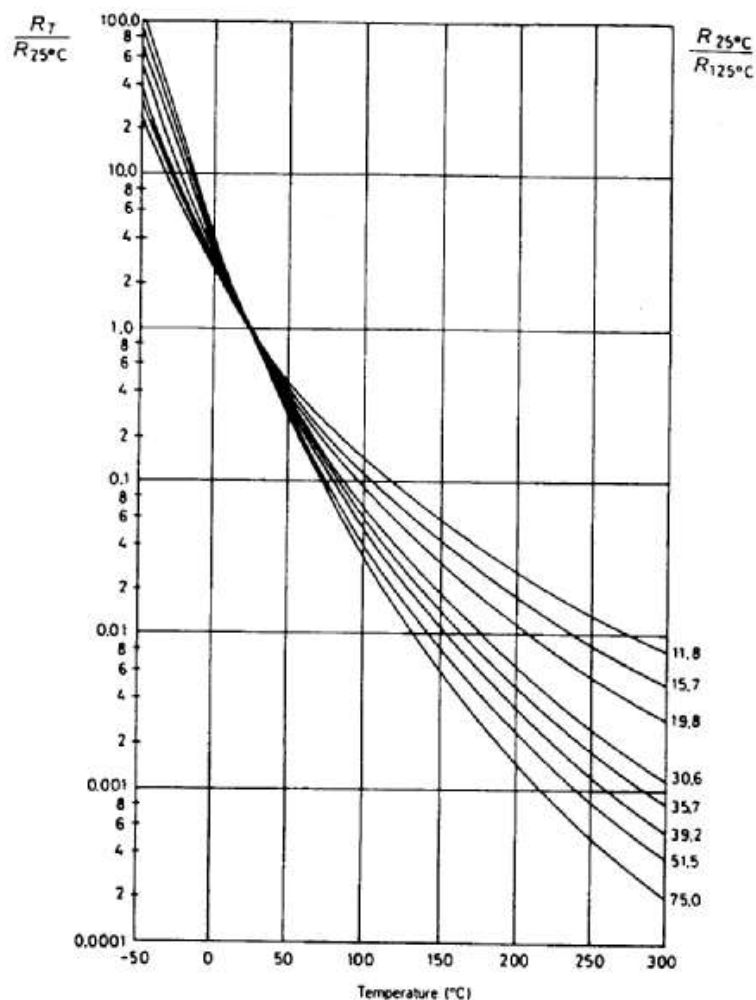


Figura 2.17 – Curvas características dos NTCs (WEBSTER, 1999).

Uma aproximação polinomial das curvas da figura 2.17 é dada pela expressão 2.15 (CARR, 1993).

$$\ln(R_t) = A + \frac{B}{T} \quad (2.15)$$

Considerando  $R_t = R_{T_0}$  (resistência de referência) na temperatura de referência, ou seja,  $T = T_0$  e manipulações a equação 2.15, chega-se a equação 2.16:

$$R_T \cong R_{T_0} * e^{\left[ \frac{B(T_0 - T)}{T * T_0} \right]} \quad (2.16)$$

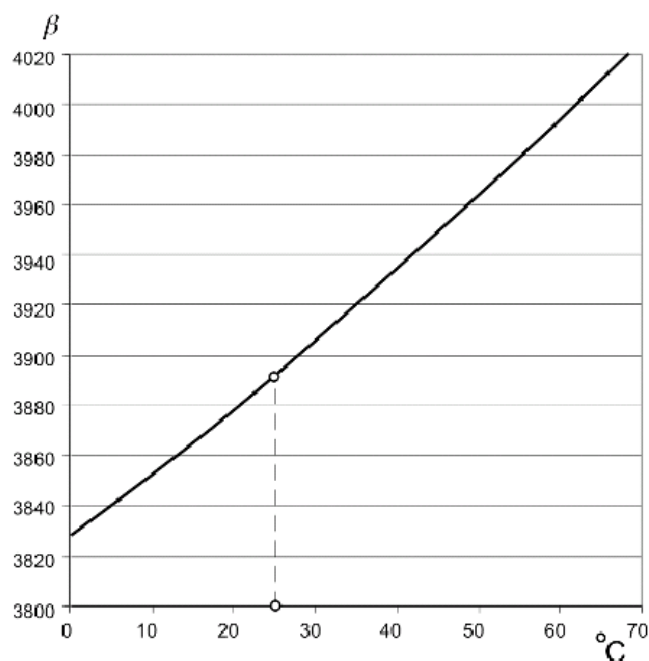
Para uma melhor compreensão da equação 2.16 pode-se definir o fator sensibilidade relativa ( $\alpha$ ) como a derivada da resistência em relação à temperatura, dividida pela resistência de referência, obtém-se então a equação 2.17.

Sendo alfa,  $\alpha = \frac{dR_t}{dt} * \frac{1}{R_t}$ , e beta,  $\beta = -\frac{dR_t}{dt} * \frac{T^2}{R_t}$ , é possível reescrever  $\alpha$  em função de  $\beta$  na forma da equação 2.17:

$$\alpha = -\frac{\beta}{T^2} \quad (2.18)$$

Sendo T a temperatura absoluta, expressa em Kelvin (K),  $\alpha$  a sensibilidade relativa do NTC e  $\beta$  o coeficiente característico do NTC.

O  $\beta$  é conhecido como coeficiente característico do termistor, sendo apresentado no gráfico de  $\log(R) \times 1/T$ , este coeficiente varia pouco com a variação da temperatura. A figura 2.18 mostra a variação do coeficiente  $\beta$  em função da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).



**Figura 2.18 – Alteração do fator  $\beta$  em relação à temperatura (FRADEN, 2003).**

Tomando dois pontos de temperatura e resistência é possível obter o valor do fator  $\beta$  aplicando a expressão 2.19.

$$\beta = \left[ \frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \right] \quad (2.19)$$

Para a aproximação feita pela equação 2.16, os erros associados para as faixas de temperaturas, definidas a partir de um  $t_0$  arbitrário, são mostrados na tabela 2.3 (WEBSTER, 1999).

**Tabela 2.3 – Erro associado às faixas de temperatura.**

Faixa de variação de temperatura (°C)	Erro associado
10	0,01
30	0,10
50	0,30

Quando a diferença de temperatura ( $t - t_0$ ) excede 50°C, para aumentar a precisão da medida, faz-se necessário realizar uma aproximação de 3ª ordem no polinômio que descreve o comportamento dos termistores, como mostrado na equação 2.20.

$$\ln R_t = A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2} + \frac{A_3}{T^3} \quad (2.20)$$

Para um termistor comum, de baixo custo, um modelo com apenas dois parâmetros, desconsiderando o termo quadrático da equação 2.20, leva a um erro de 0,3°C para um intervalo de 50°C. Este modelo é descrito pela equação empírica de Steinhart e Hart. (equação 2.21)

$$\ln R_t = A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_3}{T^3} \quad (2.21)$$

Realizando a manipulação matemática devida, tem-se a forma alternativa da equação 2.21.

$$\frac{1}{T} = a + b * \ln R_T + c * (\ln R_T)^3 \quad (2.22)$$

Assim é possível utilizar a equação simplificada dos NTCs gerando um custo computacional menor, preservando a eficiência.

### 2.5.3 Caracterização de sensores de temperatura

A caracterização dos sensores é necessária, tanto para sua aplicação no sistema real, quanto para as realizações de simulações em programa de computador. Nesta seção é descrita a caracterização estática, determinando os parâmetros característicos destes

sensores pela relação entre seu comportamento estático e dinâmico, como a constante de tempo do sensor.

### 2.5.3.1 Caracterização estática

A determinação dos parâmetros dos sensores na caracterização estática está baseada na obtenção dos coeficientes **a** e **b** presentes na equação 2.22, ou dos valores de  $R_0$  e  $\alpha_1$  no caso RTD's, além do parâmetro  $G_{th}$  ou  $hs$  vista na equação 2.24.

A figura 2.19 mostra um procedimento experimental para a determinação das características estáticas dos sensores de temperatura.

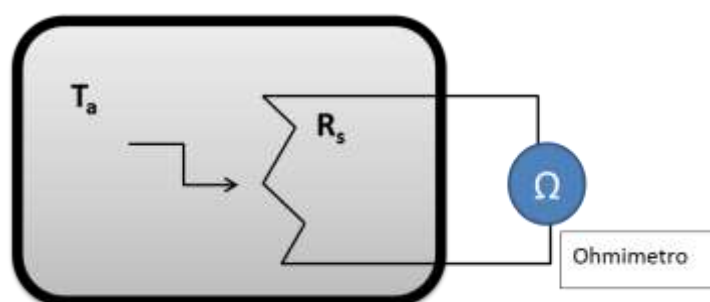


Figura 2.19 – Caixa térmica para ter o ambiente e a temperatura controladas e conhecidas.

Na figura 2.19 é possível ver uma caixa térmica isolada e com temperatura controlada  $T_a$ , o elemento sensor a ser caracterizado e o ohmímetro, utilizado para medir a resistência do sensor nesta temperatura. A curva obtida, para os NTC, se  $T_a$  varia de 0 °C até  $T_s$  é mostrado na figura 2.20.

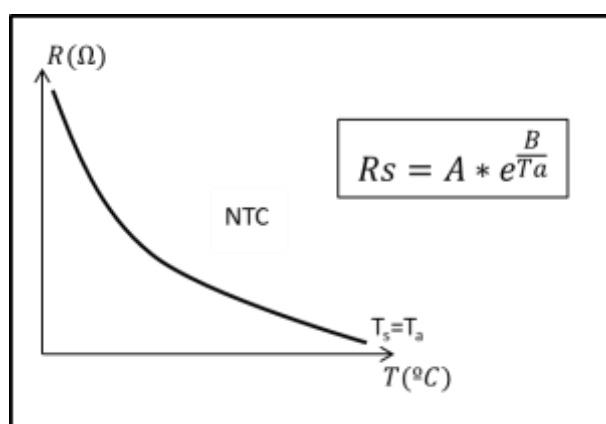


Figura 2.20 – Curva caraterística para os NTC.

Para a obtenção do coeficiente de condutância térmica entre o sensor e o meio ( $G_{th}$ ), é indispensável que sejam feitas algumas considerações, uma delas é que a radiação incidente sobre o sensor seja nula ( $H = 0$ ). A outra é que a temperatura

ambiente ( $T_a$ ) seja constante. Sendo assim a equação 2.23 pode ser reescrita na forma da expressão (2.24).

$$\alpha SH + P_s(t) = hS(T_s(t) - T_a(t)) + mc * \frac{dT_s(t)}{dt} \quad (2.23)$$

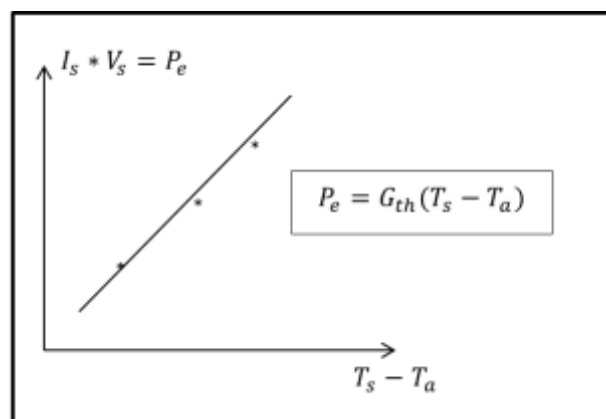
$$P_s(t) = G_{th}T_{\Delta}(t) + G_{th} * \frac{dT_{\Delta}(t)}{dt} \quad (2.24)$$

No regime estacionário o termo  $\frac{dT_{\Delta}(t)}{dt}$  é zero. Então a equação torna-se igual a (2.25).

$$P_s(t) = G_{th}(T_s - T_a) \quad (2.25)$$

Ainda com referencia a 2.23,  $\alpha SH$  é a Radiação absorvida pelo sensor,  $\alpha$  é o coeficiente de transmissividade-absorvidade do sensor,  $S$  a Área da superfície do sensor,  $H$  a Radiação incidente,  $P_s$  a Potência elétrica no sensor,  $hS(T_s - T_a)$  é a energia por unidade de tempo perdida para o meio,  $h$  o coeficiente de transferência de calor na superfície do sensor,  $hS$  (ou  $G_{th}$ ) a condutância térmica entre o sensor e o meio,  $T_s$  a temperatura do sensor,  $T_a$  a temperatura ambiente,  $T_{\Delta}(t) = T_s - T_a$  a variação de temperatura,  $mc * \frac{dT_s}{dt}$  a variação da energia interna do sensor,  $mc$  ( $C_{th}$ ) a capacidade térmica do sensor,  $m$  a massa do sensor,  $c$  o calor específico do sensor.

A figura 2.21 mostra a curva característica da potência  $P_s$  em função da diferença de temperatura  $T_s - T_a$ .



**figura 2.21 – Curva de caracterização da potência pela diferença de temperatura.**

O coeficiente angular da reta da figura 2.21 determina o valor da condutância térmica entre o sensor e o meio em que ele se encontra.



### 2.5.3.2 Determinação da constante de tempo do sensor

A constante de tempo de um sensor qualquer é definida como sendo o tempo necessário para que o valor da variável de interesse deste sensor, alcance 63,2% do valor que deveria assumir quando este é submetido a um dado degrau de excitação.

A determinação experimental do comportamento dinâmico de um sensor termo-resistivo pode ser realizada por uma excitação elétrica ou pela incidência de radiação sobre seu corpo.

A determinação da constante de tempo do sensor termo-resistivo por um degrau de potência é dada por (OLIVEIRA, 1997):

$$P_e = hS(T_s - T_a) + mc * \frac{dT_s}{dt} \quad (2.26)$$

Para  $T_a = cte$

$$P_e = hS(T_s - T_a) + mc * \frac{d(T_s - T_a)}{dt} \quad (2.27)$$

Resolvendo a equação:

$$mc \left( \frac{d(T_s - T_a)}{dt} \right) + hS(T_s - T_a) = 0, \quad (P_s = 0), \quad (2.28)$$

E após transformações matemática chega-se a:

$$mc * \ln \frac{T_1 - T_a}{T_2 - T_a} = hS\Delta t, \quad \text{sendo } \Delta t = T_2 - T_1 \quad (2.29)$$

Então, tem-se que a constante de tempo  $\tau$  é igual a:

$$\tau = \frac{mc}{hS} = \frac{\Delta t}{\ln \frac{T_1 - T_a}{T_2 - T_a}} \quad (2.30)$$

Segundo Oliveira (1997) para se determinar a constante de tempo do sensor de temperatura pode ser utilizado a curva de resfriamento livre do dispositivo, na qual se eleva a temperatura do sensor até uma temperatura  $T_{s1}$ , retira-se a fonte de aquecimento, e monitora-se o intervalo de tempo em que o sensor atinge uma temperatura  $T_{s2}$ , após um certo  $\Delta t$  (figura 2.22).

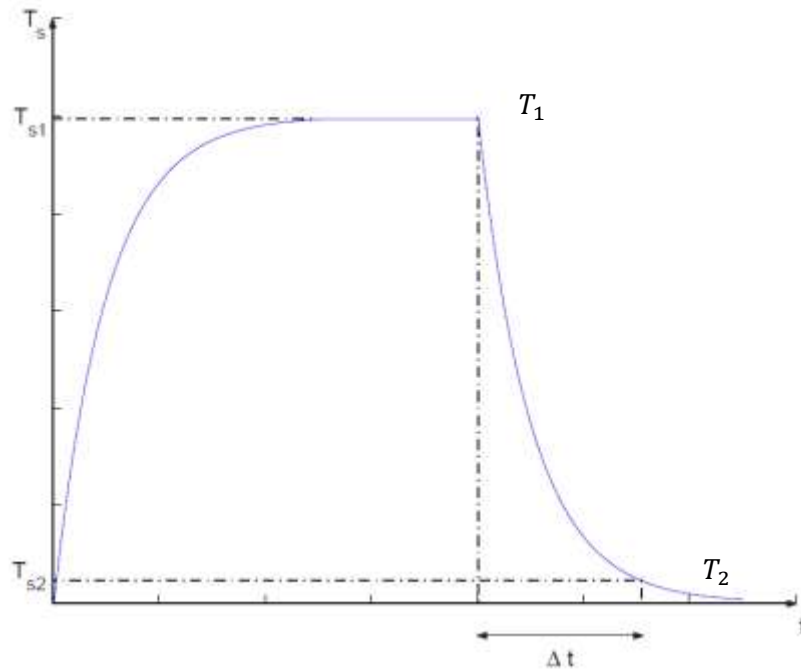


Figura 2.22 – Curva de resfriamento livre de um sensor termo-resistivo (MOREIRA, 2007).

## 2.5.4 Técnicas de Condicionamento de Sinais de Sensores

Os métodos de condicionamento de sinais em sensores termo-resistivos dependem do tipo de sensor utilizado, da variação de temperatura que se deseja medir, e o mais importante, da boa linearidade deste sensor, e sua sensibilidade e tempo de resposta.

A seguir são descritos três métodos para condicionar os sinais dos sensores termo-resistivos: o método de tensão constante, corrente constante e temperatura constante.

### 2.5.4.1 Circuito a Tensão Constante

Nesta forma de condicionamento mantém-se a tensão constante e correlaciona-se corrente elétrica e temperatura. Neste tipo de condicionamento, tanto para sensores metálicos, quanto os NTCs, a relação entre a corrente elétrica e a temperatura é não-linear, a equação que relaciona estas grandezas é dada pela equação 2.31:

$$V_s * I_s^2 = hS(k_t V_s - k_t R_0 I_s - T_a I_s) - \alpha S H \quad (2.31)$$

Sendo  $V_s$  a tensão do sensor,  $I_s$  a corrente do sensor,  $hS$  a condutância térmica entre o sensor e o meio,  $k_t = \frac{1}{\alpha R_0}$ ,  $T_a$  a temperatura ambiente,  $\alpha$  é o coeficiente de

transmissividade-absorvidade do sensor,  $S$  a Área da superfície do sensor e  $H$  a Radiação incidente no corpo do sensor de temperatura.

Em Sarmas (1993) e Pinheiro (2008) é visto um tipo de circuito de polarização utilizando amplificador operacional. Este circuito é realimentado com uma rede de resistores em forma de “T” sendo que no elemento central da rede ( $R_s$ ) é o sensor termo-resistivo. Na figura 2.23 é mostrado o circuito de polarização.

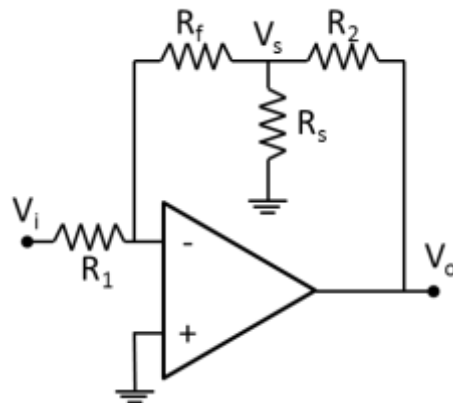


Figura 2.23 – Circuito de polarização para a configuração a tensão constante.

Neste circuito a tensão é constante sobre o sensor termo-resistivo, não dependendo da sua resistência a cada instante, e é dada pela equação 2.32:

$$V_w = -\frac{V_{DC}R_f}{R_1} \quad (2.32)$$

Características do circuito a tensão constante:

- Operaram em malha aberta na maioria dos casos;
- O tempo de resposta do sensor é menor do que na configuração de corrente constante;
- Permite a ampliação da largura de banda na resposta;
- Boa imunidade a efeitos capacitivos;
- Alta relação sinal/ruído;
- $I_s$  é não linear em relação à temperatura.

#### 2.5.4.2 Circuito a Corrente Constante

Nesta forma de polarização o sensor de medição é excitado por meio de uma fonte de corrente constante. Assim, a medida da variável de interesse é feita por meio da leitura da tensão de saída do circuito. No caso do sensor termo-resistivo metálico, que

tem a relação entre a resistência e temperatura regida por  $R_s = R_0 + R_0 T_s$ , a tensão elétrica sobre este sensor é dada a partir da equação 2.33:

$$V_s = \frac{hk_t R_0 + hST_a + \alpha SH}{hSk_t - I_s^2} * I_s \quad (2.33)$$

Em que  $K_t$  é  $\frac{1}{\alpha_1 R_0}$  e  $\alpha_1$  é o coeficiente de temperatura do sensor termorresistivo metálico.

Um dos circuitos que atende ao propósito de manter a corrente constante no sensor é mostrado na figura 2.24 (OLIVEIRA, 1997). Com este circuito em malha aberta pode-se medir a temperatura pela variação da tensão de saída do amplificador operacional.

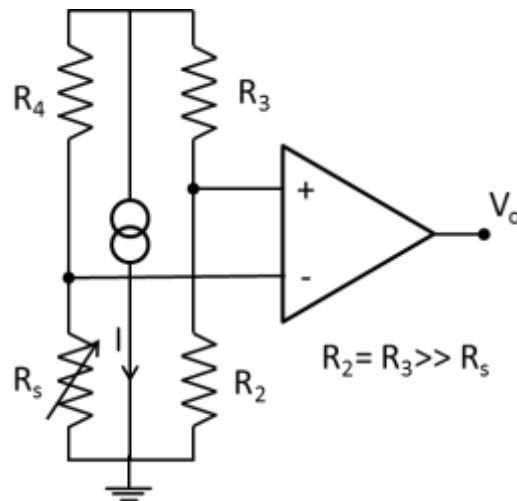


Figura 2.24 – Circuito com fonte de corrente constante para polarizar o sensor.

Para este tipo de circuitos temos as seguintes características:

- $V_s$  é função de:  $T_a$ ,  $H$  e  $h$ , em que  $h = a + bU^n$ , com  $a, b, n$  = constantes da lei de King modificada e  $U$  = velocidade do fluido;
- A sensibilidade de  $V_s$  em relação a  $T_a$  e  $H$  é diretamente proporcional a  $I_s$ ;
- A relação entre as variações de tensão e velocidade é não-linear;
- Para o caso dos NTC não existe relação linear da tensão  $V_s$  e as outras variáveis do sistema.

#### 2.5.4.3 Circuito a Temperatura Constante (ou resistência constante)

O que se pretende com este tipo de topologia é manter a temperatura, e consequentemente a resistência, do sensor constante. Desta forma, a relação entre a

tensão elétrica e as grandezas a serem estimadas independe do tipo de sensor utilizado, sendo que a tensão elétrica de saída do sensor ( $V_s$ ) pode ser calculada pela equação 2.34:

$$V_s^2(t) = R_{shs}(T_s - T_a) - R_s \alpha SH \quad (2.34)$$

Analisando esta equação, verifica-se que não existe relação linear entre  $V_s$  e as grandezas a serem estimadas.

Um circuito capaz de manter a temperatura do sensor constante é visto em Oliveira (1997) e em Pinheiro (2008) a figura 2.25 apresenta o circuito de polarização sugerido. Este circuito opera com uma ponte de Wheatstone com um amplificador operacional na malha de realimentação, para garantir que a temperatura do sensor seja mantida constante.

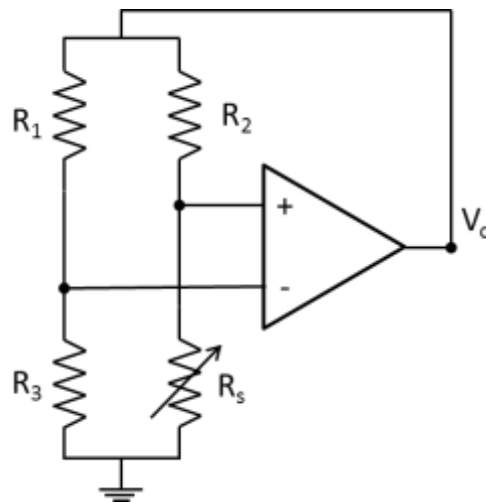


Figura 2.25 – Circuito de polarização para a topologia do circuito a temperatura constante.

As principais características deste circuito são:

- Tempo resposta rápido em relação à topologia de corrente constante;
- Necessita de um alto ganho na realimentação;
- A tensão  $V_s$  é não-linear com as outras grandezas ( $T_a$  e  $R_s$ );
- Sensibilidade menor do que a do circuito em configuração de corrente constante.

## 2.6 Radiômetros

Segundo Souza (2008) os radiômetros são equipamentos que servem para realizar a medição da radiação solar incidente na superfície terrestre. São exemplos de radiômetros:

- **Heliógrafo:** Este aparelho mede a duração da insolação. Utilizando uma fita sensível à irradiação solar que muda sua coloração. A determinação da duração de horas de sol é aferida a partir da análise da quantidade de fita que foi sensibilizada. A equação  $H = H_0 \left[ a + b \left( \frac{n}{N} \right) \right]$  é usada para estimar a irradiação solar, sendo  $H_0$  a intensidade da radiação solar, a e b parâmetros característicos da região, n horas de sol visível e N horas completas de sol (BASSO, 1980).
- **Piranômetro:** são equipamentos constituídos, em sua maioria, de termopilhas que possuem duas superfícies receptoras, uma branca e outra negra, assim a radiação é determinada pela diferença de temperatura entre estas superfícies. Este aparelho é capaz de medir a radiação difusa. Ele é responsável por medir a radiação global, recebendo energia de todo o hemisfério celeste (PALZ, 1981). A figura 2.26 mostra o piranômetro que foi utilizado, neste trabalho, para a determinação da irradiação solar durante os ensaios dos coletores solar térmicos.



Figura 2.26 – Piranômetro CMP-3 da Kipp & Zonen que foi utilizado no projeto.

- **Pireliômetro:** Por meio de uma fenda colimada e uma superfície coletora este tipo de aparelho consegue captar a radiação solar direta. Para seu bom funcionamento necessita estar sempre na direção normal aos raios solares. Em medidas prolongadas é preciso sempre corrigir o ângulo de inclinação com os raios solares (BASSO, 1980).
- **Células fotovoltaicas:** Somente a título de exemplo, as células solares podem ser usadas como radiômetros de baixo custo. Estas possuem uma resposta rápida, em relação aos outros equipamentos citados, porém possuem o inconveniente de ter uma sensibilidade variável em relação ao espectro solar. (BASSO, 1980).

Os principais parâmetros para a escolha de radiômetros são:

- **Sensibilidade:** Intensidade do sinal de saída para a potência unitária incidida por unidade de área. Valor expresso em  $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$  para as termopilhas.
- **Resolução:** Menor variação de potência por unidade de área que o sensor pode diferenciar. Valor expresso em  $\text{W}/\text{m}^2$ .
- **Termovariação:** Variação do fator de calibração com as flutuações da temperatura ambiente do local em que o aparelho se encontra.
- **Repetitividade:** Variação anual do valor lido com um dado equipamento em relação à curva padrão de calibração do aparelho
- **Afastamento da função cosseno:** O sinal de saída do radiômetro deve variar de acordo com a função cosseno do ângulo entre a direção da radiação incidente e a direção normal ao plano de seus elementos sensíveis, para potência constante e radiação incidente unidirecional.
- **Linearidade:** Indica o quanto o instrumento de medida se afasta de uma relação linear com a potência solar incidente sobre o plano de seus elementos sensíveis.
- **Tempo de resposta:** tempo para que o sensor estabiliza para um novo patamar de irradiação solar.

## 2.7 Anemômetros

São equipamentos utilizados para medir a direção e a velocidade do vento. Geralmente são encontrados em estações meteorológicas, aeroportos, campos de aeromodelismo, túneis de vento e para a navegação de pequenas embarcações.

Podem ser usados na composição da mecânica destes equipamentos hélices ou conchas, acopladas ao eixo de um gerador elétrico (conforme figura 2.27 (a) e (b)). O equipamento mede a velocidade do vento a partir da rotação de suas hélices ou conchas. A rotação das hélices produz uma variação no fluxo magnético no interior de um gerador elétrico. Neste gerador, espiras de corrente, situadas dentro do campo magnético de um ímã permanente, ao entrarem em movimento, geram uma tensão elétrica induzida, conforme a lei de Faraday. Esta tensão induzida pode ser medida por um voltímetro ou por um sistema de aquisição e armazenamento de dados.



Figura 2.27 – (a) Anemômetro digital de hélice. (b) Anemômetro do tipo concha.

O processo de calibração do anemômetro consiste em obter uma curva que relacione o valor RMS da tensão induzida em função da velocidade do vento que passa pelo anemômetro. Quanto maior a rotação da hélice, maior será o valor da tensão lida pelo voltímetro.

Para utilizar o tipo de anemômetro adequado à aplicação desejada é importante conhecer alguns termos técnicos de sua especificação como:

- **Constante de distância:** distância que o ar percorre no anemômetro para responder à mudança do estágio inicial para o final;
- **Limiar ou valor de entrada (*Threshold*):** é a velocidade para o começo da operação do instrumento;
- **Força exercida pelo vento ou pressão:** base para a mensuração da velocidade do vento.

Os tipos de anemômetro mais comuns são:

- Anemômetro do tipo caneco ou hélice:
  - Simplicidade e boa sensibilidade para monitorar a velocidade dos ventos;
  - A velocidade de rotação é função da velocidade do vento;
  - A rotação das hélices do anemômetro gera uma tensão elétrica induzida que pode ser lida por um voltímetro ou um sistema de condicionamento e aquisição de dados;
  - O plano de rotação de uma hélice é posicionado perpendicular ao vento.
- Anemômetro sônico:



- Velocidade do som varia segundo temperatura do ar, pressão do vapor d'água e pressão atmosférica;
  - Três conjuntos de emissores e receptores nas direções x, y e z: determinam-se os componentes ortogonais da velocidade do vento simultaneamente.
- Anemômetro a fio quente:
- Baseado no resfriamento da resistência do sensor, que indica a velocidade do vento;
  - Possuem alta sensibilidade;
  - Larga faixa de medição com boa confiabilidade;
  - Não é indicado para velocidade altas com gases sujos e/ou umidade que dificulta a transferência de calor entre o sensor e o fluido. (PINHEIRO, 2008)

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Nesse capítulo são apresentados e descritos o local em que ocorreram os ensaios dos coletores solares, o sistema mecatrônico de avaliação comparativa desses coletores e seus subsistemas: o conjunto mecânico, responsável pela sustentação do conjunto de coletores e instrumentação, o sistema hidráulico, montado para cada experimento, o sistema eletrônico, responsável pelo condicionamento de sinais dos sensores de temperatura, pelo controle da bomba de porão, pela leitura do radiômetro e pelo processamento e transmissão dos dados digitais ao computador pessoal.

#### **3.1 Localização do Laboratório de Ensaio**

A realização dos testes de validação da plataforma mecatrônica desenvolvida para a avaliação dos coletores solares térmicos foi feita numa área plana e livre de sombreamento durante todo o dia. Para isso, foi escolhido o terraço do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia (IF-UFBA). Este local atende aos pré-requisitos mencionados anteriormente.

O IF-UFBA está localizado na cidade de Salvador, no estado da Bahia - Brasil, tendo como localização global: latitude  $12^{\circ}59'$  (S), longitude  $38^{\circ}30'$  (W) e a aproximadamente 30 m acima do nível do mar. O sombreamento por parte de outras edificações no terraço do IF-UFBA ocorre muito antes das 7h30min e após as 17h30min, para o período de novembro de 2010 a fevereiro de 2011 em que foram realizados os testes de validação. Desta maneira é possível ter mais do que 10 h de insolação por dia, o que é suficiente para os testes e ensaios pretendidos neste trabalho.

O terraço utilizado fica a aproximadamente 20 metros de altura em relação a base do prédio e conta com um sistema próprio de dreno da água da chuva. Seu piso é impermeável e horizontal, nele ficam os tanques de abastecimento de água potável do Instituto de Física. Um desses tanques foi utilizado para o fornecimento da água necessária aos ensaios dos coletores.

Abaixo da área de exposição das placas solares térmicas existe uma galeria de serviço que foi utilizada para acomodar a eletrônica do sistema e o computador pessoal. Este corredor é protegido das intempéries e possui pontos de rede elétrica disponíveis. Uma tubulação auxiliar de policloreto de vinila (PVC) foi instalada, entre o terraço e o interior da galeria, com o objetivo de servir de caminho para os diferentes cabos elétricos de instrumentação. Estes cabos ligavam os sensores do sistema de medição do

aparato experimental ao interior da galeria, onde estavam os equipamentos de controle e aquisição de dados. A figura 3.1 ilustra, de forma esquemática, o lugar, os equipamentos, o terraço e a galeria de serviços utilizada.

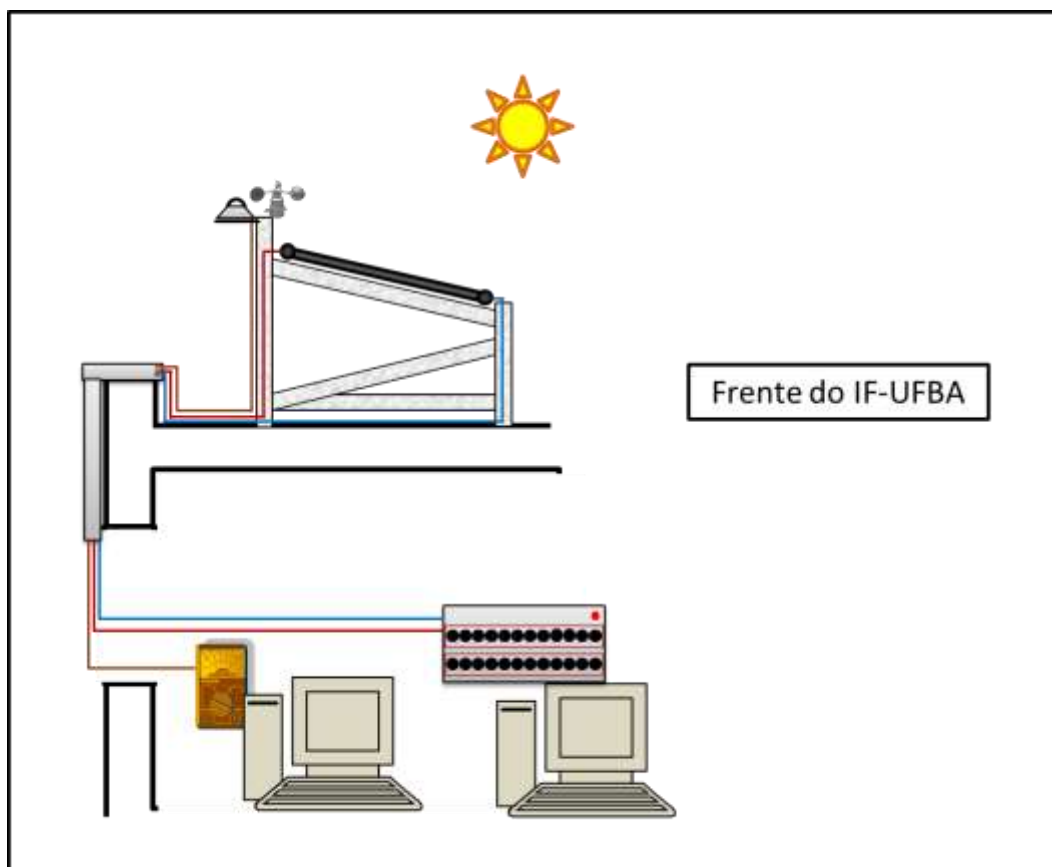


Figura 3.1 – Disposição do local e dos equipamentos utilizados no experimento.

### 3.2 Descrição do Sistema

O sistema mecatrônico completo para a avaliação comparativa dos coletores solares planos pode ser dividido em três subsistemas de interesse: a estrutura mecânica, o sistema hidráulico, o sistema eletrônico de processamento e armazenamento de dados. A figura 3.2 mostra, de forma completa, o diagrama da plataforma experimental desenvolvida.

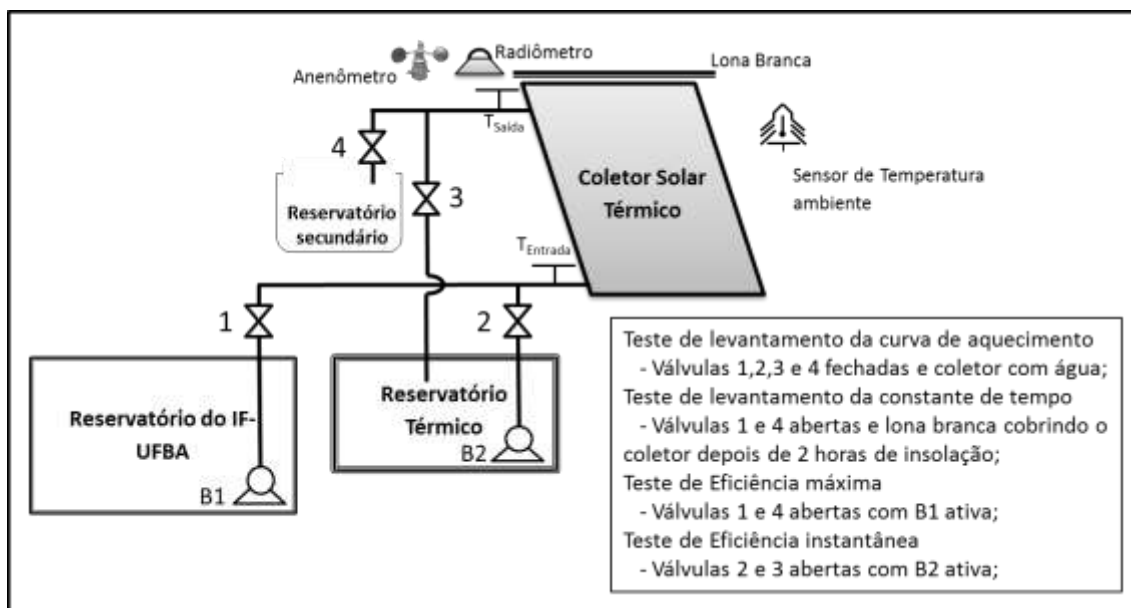


Figura 3.2 – Diagrama completo do sistema mecatrônico desenvolvido.

### 3.2.1 Estrutura Mecânica do Sistema

A montagem de um suporte mecânico adequado para a bancada experimental foi necessária para acomodar, de forma segura, os coletores solares térmicos com os sensores de temperatura, o radiômetro e anemômetro. Estes equipamentos de medição da irradiância solar e da velocidade do vento foram fixados nas aletas laterais da estrutura de suporte dos painéis. Esta mesma estrutura serve de sustentação para a lona branca usada para o bloqueio dos raios solares nos testes de determinação do tempo de resposta dos painéis solares térmicos.

A estrutura de sustentação mecânica foi montada em madeira reflorestada e pintadas com tinta impermeável. Cada unidade de sustentação tem a capacidade de acomodar duas placas solares térmicas de 1,40 x 0,90 m. Diagonais fixadas nas laterais garantem a boa rigidez mecânica do conjunto. Agindo sobre a fixação da aleta superior é possível modificar o ângulo de inclinação do suporte e, portanto, da placa solar nele instalada. Nos ensaios realizados o valor deste ângulo foi mantido constante e igual a 13°, sendo que a face dianteira do painel sempre esteve voltada para o Norte geográfico terrestre. O ângulo escolhido é indicado como o mais adequado, tanto para painéis térmicos, quanto para painéis fotovoltaicos segundo Abrava (2008) e Teodoro da Silva (2010). A figura 3.3 mostra um dos módulos da estrutura mecânica montada no local dos ensaios.



Figura 3.3 – Estrutura mecânica para acomodação das placas solares térmicas.

### 3.2.2 Sistema Hidráulico

O sistema hidráulico montado é formado por conexões de PVC, responsáveis pelas interligações deste sistema, servindo também de fixação e ponto de inserção para os sensores PT-100 no coletor solar. Uma mangueira flexível foi usada para transportar a água do reservatório para as placas solares. O reservatório de água potável do IF-UFBA serviu ao suprimento contínuo do sistema hidráulico e do reservatório térmico (poliestireno expandido) com a capacidade de 125 litros. O reservatório isolado foi usado para acumular a água aquecida nos ensaios de obtenção da reta de eficiência térmica instantânea. A figura 3.4 apresenta alguns elementos hidráulicos utilizados na montagem.



Figura 3.4 – Elementos de PVC utilizados para conexões hidráulica das placas solares.

A conexão entre as placas solares e o sistema hidráulico foi feita utilizando uma união roscável de PVC e um registro, como apresentado na figura 3.5. Este arranjo foi

escolhido por tornar a troca das placas mais rápida e sem risco de danos físicos aos coletores solares, protegendo também os sensores de temperaturas.

Foi montado um circuito hidráulico para cada experimento realizado, ao todo foram usados três tipos diferentes configurações de circuito hidráulico para possibilitar a execução dos testes de avaliação previstos no escopo deste trabalho.



**Figura 3.5 – Detalhe do sistema de acoplamento nos coletores solares avaliados.**

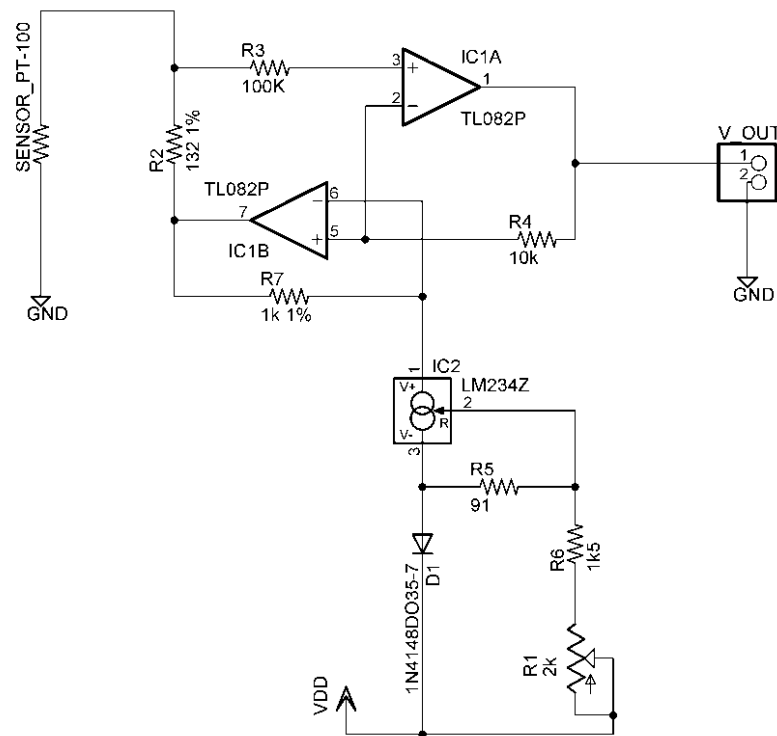
### 3.2.3 Sistema Eletrônico de Medição de Temperatura

O sistema eletrônico implementado é composto pelos sensores de temperatura (Pt-100), pelo módulo de condicionamento, aquisição e transmissão de dados e pelo radiômetro para a medição da irradiação solar.

O condicionamento de sinais dos doze Pt-100 instalados nas placas ensaiadas, foi feito por meio de um circuito capaz de transformar resistência elétrica (ohm ( $\Omega$ )) em tensão (mV). Este circuito tem uma fonte de corrente constante, feita com o LM234Z, que regula a corrente em cima do resistor (R7) de  $1\text{K}\Omega$  em  $1\text{ mA}$ , o que faz gerar uma tensão de  $1\text{ volt}$  em seus terminais. Esta tensão serve como uma tensão de referência e será constante em cima do resistor R2 ( $132\Omega$ ), conhecido também como resistor de fundo de escala, qualquer tensão que apareça nos terminais do resistor “SENSOR\_PT-100” é realimentada pelo amplificador operacional (Amp Op) IC1A e compensada na saída 7 pelo Amp Op IC1B na forma  $V_7 = 1 + V_{\text{SENSOR\_PT-100}}$ . Por fim, a relação da tensão de saída pela resistência “SENSOR\_PT-100” é dado por:

$$V_{OUT} = \frac{1}{R_2} * \text{SENSOR\_PT} - 100 \quad (3.1)$$

A figura 3.6 mostra o diagrama do circuito eletrônico montado para realizar a conversão de resistência ( $\Omega$ ) em tensão (mV).



**Figura 3.6 – Circuito eletrônico montado para a conversão de medidas.**

O fundo de escala para medição das resistências, no caso dos PT-100, foi fixado em 132  $\Omega$ , este valor de resistência corresponde a uma temperatura aproximadamente de 87°C ou uma tensão de 1.000 mV, na saída do conversor Ohm-tensão. O fundo de escala foi fixado neste valor, pois nas análises iniciais notou-se que a temperatura da água nos coletores não ultrapassava 80°C em seu limite superior. Por outro lado, o limite inferior nunca descia mais que 25°C, temperatura típica para o Verão em Salvador-BA.

Depois de convertidas as resistências dos PT-100 em tensões elétricas, estes sinais de tensão devem ser proporcionais às temperaturas medidas pelos sensores. Já na forma de uma diferença de potencial, estes sinais elétricos são enviados às entradas analógicas de um microcontrolador modelo PIC 18F4550, de fabricação Microchip. A figura 3.7 mostra o diagrama elétrico utilizado para receber os 12 sinais de tensão já condicionados pela etapa de entrada de medição.

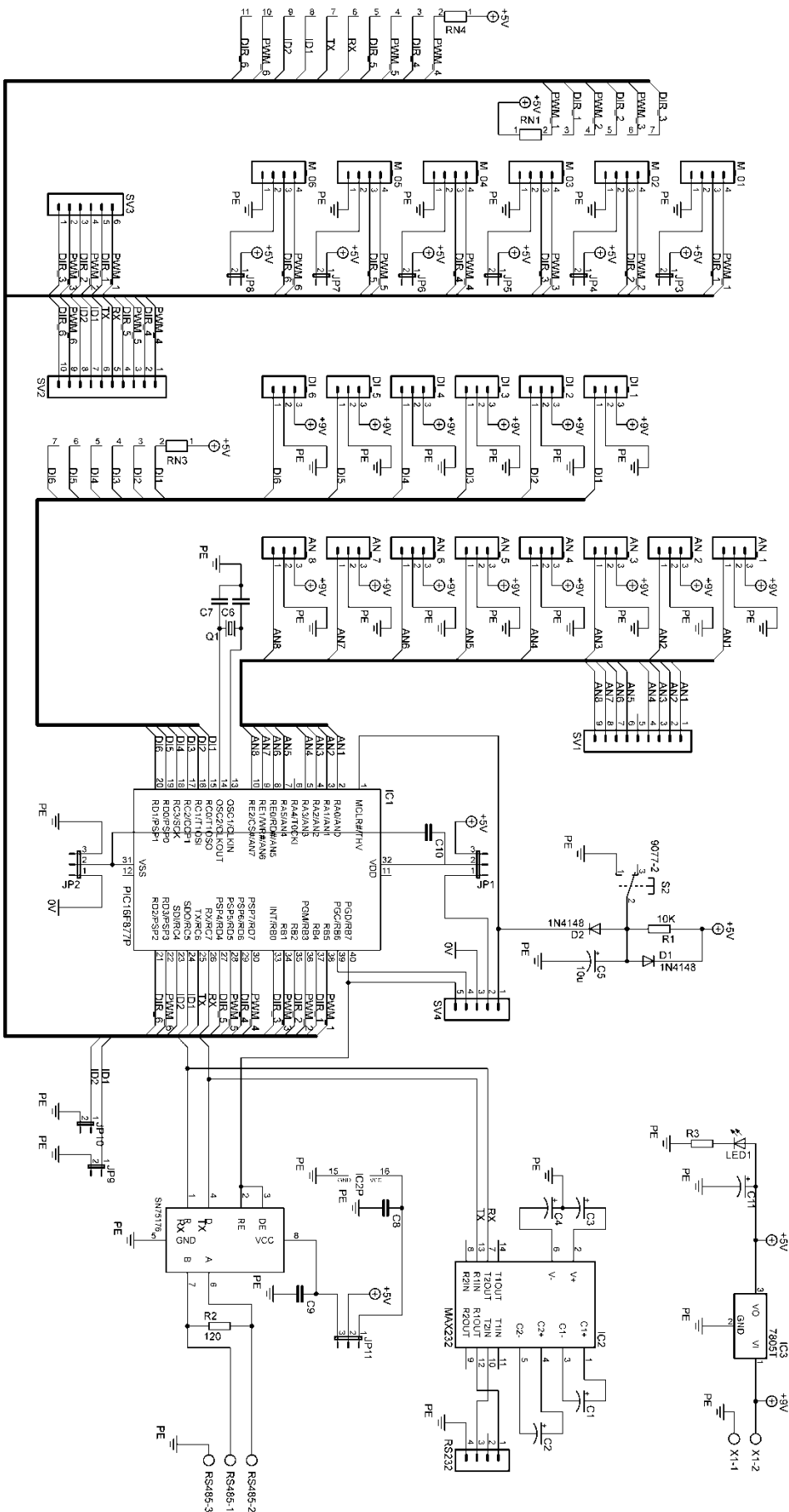
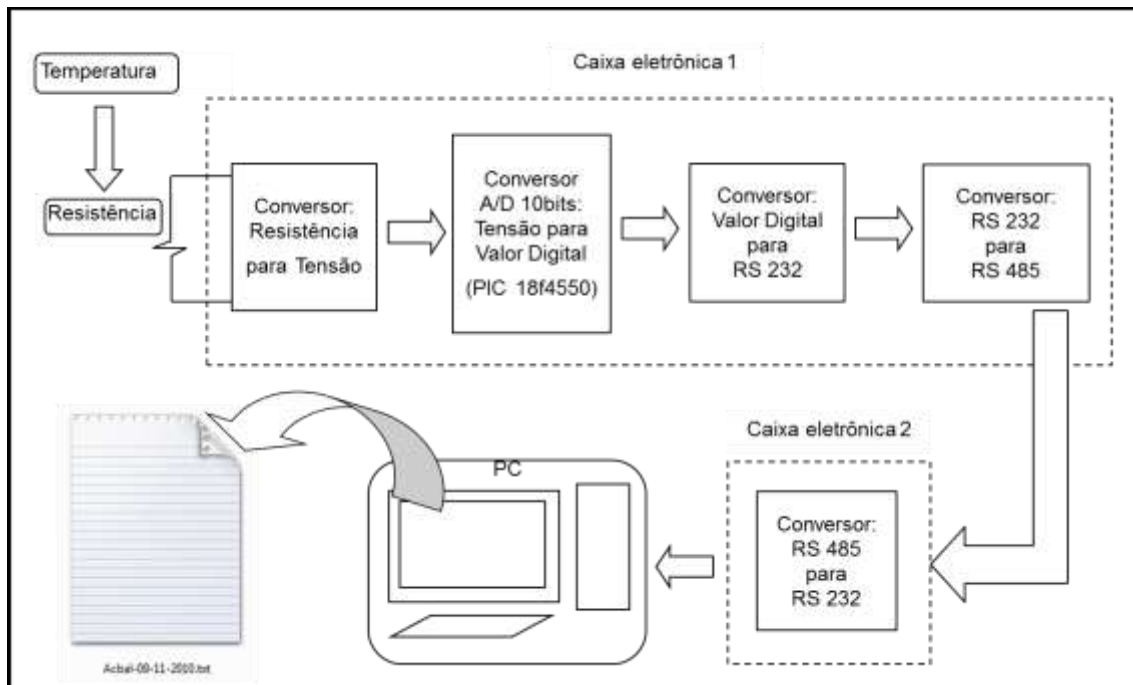


Figura 3.7 – Diagrama eletrônico do circuito do microcontrolador (SOARES, 2008).



O microcontrolador digitaliza e adquire as tensões análogicas de temperatura, convertendo estes sinais de tensão em uma palavra binária de 10 bits, esta palavra é transmitida a um PC de aquisição em formato serial. A comunicação entre o PIC18F4550 e o PC é feita no formato RS-232, para aumentar e facilitar a comunicação em modo *daisy chain*, o padrão RS 232 é convertido no padrão RS-485, que permite o uso do protocolo MODBUS. O pacote de dados é então enviado ao computador de aquisição, que excuta um programa para ler e armazenar estes dados em um arquivo do tipo TXT. O nome automático de cada arquivo de dados assume a forma: dd-mm-aaaa.txt.

Na figura 3.8 é apresentado o diagrama de blocos global do sistema de interesse, nele podem ser vistos desde o fenômeno observado “temperatura interior das placas”, até o formulário final com os dados adquiridos. Estão também detalhadas as duas caixas eletrônicas, sendo que a caixa número 1 é composta pela placa de condicionamento de sinais, pelo ADC, pela UART e finalmente pelo conversor de padrão de comunicação. A caixa de número 2 faz a re-conversão para o padrão RS-232, que assim pode ser lido pelo PC.



**Figura 3.8 – Diagrama da interface eletrônica para aquisição dos dados dos coletores solares.**

Na figura 3.9 pode ser vista a foto da caixa eletrônica 1 com os plugs tipo XLR (*Canon*), que fazem a conexão dos sensores de temperatura com o sistema eletrônico. A figura 3.10 ilustra a interface gráfica desenvolvida em Visual Basic®, responsável por apresentar, ao operador, o dado adquirido e armazenado pelo PC.



Figura 3.9 – Caixa eletrônica 1: Módulo de aquisição de sinais e transmissão de dados.



Figura 3.10 – Interface gráfica de aquisição e armazenamento dos canais de temperatura.

### 3.2.3.1 Calibração do Sistema Eletrônico

Apesar da curva característica do sensor PT-100 ser fornecida pelo fabricante, foi necessário levantar uma curva de calibração do sistema experimental. A calibração do sistema é utilizada para converter as contagens do ADC do microcontrolador em temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Para obter a curva de calibração, e portanto, de conversão do valor digital adquirido em unidades de temperatura foram escolhidas três temperaturas de um banho líquido:  $0^{\circ}\text{C}$  (água+gelo),  $-12^{\circ}\text{C}$  (água+gelo+sal) e  $86^{\circ}\text{C}$  (água+mergulhão). Em cada uma dessas temperaturas foram adquiridos cem valores digitais, a partir dos quais foi calculado o valor médio ou valor mais provável.

Os banhos usados como temperaturas de referência foram aferidos por um termômetro digital modelo Ti-33, de fabricação *Full Gauge*. As características deste termômetro digital de referência estão listadas a seguir (FULL GAUGE, 2006):

- Alimentação: 115 ou 230 Vac  $\pm$  10% (50/60Hz);
- Temperatura de controle: -50 a 105,0°C;
- Resolução: 0,1°C entre -10°C a 100°C e 1°C fora desta faixa;
- Tipo do sensor: NTC
- Lê até três sensores de temperatura;
- Ajuste de até 5°C de offset.

As figuras 3.11, 3.12 e 3.13 mostram o aparato usado na calibração dos PT-100's, no Laboratório de Propriedade Óticas. Na figura 3.11 (esquerda) pode ser visto o termômetro Ti-33 e o multi-termômetro desenvolvido. Na direita da foto, pode ser visto o computador pessoal que faz a aquisição de dados, os cabos dos sensores (ao centro), o termômetro digital e o termômetro multiponto desenvolvido (a esquerda).



**Figura 3.11 – Sensores de temperatura sendo calibrados. Na esquerda, o termômetro Ti-33, o multi-termômetro com os PT-100, na direita o computador pessoal.**

A figura 3.12 ilustra a montagem usada para atingir 86°C, nela estão representados os Pt-100's justapostos e fixados em forma de feixe, de forma a minimizar eventual diferença de temperatura entre eles. Ainda nesta figura aparece o aquecedor do tipo “mergulhão” (resistência blindada). O sensor do termômetro digital Ti-33 foi posicionado no interior, no centro, de um caldeirão de alumínio, circundado por isolamento térmico.



**Figura 3.12 – Pt-100, mergulhão e termômetro digital Ti-33 em um caldeirão isolado.**

Na figura 3.13 observa-se a montagem para se atingir  $0^{\circ}\text{C}$ , é possível ver o banho água + gelo, os sensores PT-100's. O sensor do termômetro digital Ti-33 está na extremidade do cabo preto, posicionado no interior da caixa térmica isolada do tipo *coolerbox*.



**Figura 3.13 – Coolerbox contendo água, gelo, sensores PT-100 e termômetro digital Ti-33 (cabo preto).**

As curvas de calibração dos doze canais de medição de temperaturas, obtidas a partir deste ensaio, estão apresentadas na tabela 3.1. Nesta tabela é mostrada a conversão de contagens do ADC (informação serial de saída do termômetro digital PT12-485) para temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e o intervalo de confiança associado para cada canal de leitura.

Tabela 3.1 – Curvas de calibração dos doze canais de leitura de temperatura.

Canal	Reta de calibração	Erro (°C)
01	$\text{Temp}(\text{cont}) = (0,342 (\text{°C}/\text{Nc}_1) * \text{Nc}_1) - 251,93$	$\pm 1,141$
02	$\text{Temp}(\text{cont}) = (0,348 (\text{°C}/\text{Nc}_2) * \text{Nc}_2) - 259,71$	$\pm 1,395$
03	$\text{Temp}(\text{cont}) = (0,339 (\text{°C}/\text{Nc}_3) * \text{Nc}_3) - 261,05$	$\pm 0,373$
04	$\text{Temp}(\text{cont}) = (0,346 (\text{°C}/\text{Nc}_4) * \text{Nc}_4) - 256,80$	$\pm 0,808$
05	$\text{Temp}(\text{cont}) = (0,345 (\text{°C}/\text{Nc}_5) * \text{Nc}_5) - 255,01$	$\pm 0,581$
06	$\text{Temp}(\text{cont}) = (0,345 (\text{°C}/\text{Nc}_6) * \text{Nc}_6) - 255,43$	$\pm 1,269$
07	$\text{Temp}(\text{cont}) = (0,345 (\text{°C}/\text{Nc}_7) * \text{Nc}_7) - 254,55$	$\pm 0,819$
08	$\text{Temp}(\text{cont}) = (0,345 (\text{°C}/\text{Nc}_8) * \text{Nc}_8) - 254,32$	$\pm 0,581$
09	$\text{Temp}(\text{cont}) = (0,333 (\text{°C}/\text{Nc}_9) * \text{Nc}_9) - 253,26$	$\pm 0,426$
10	$\text{Temp}(\text{cont}) = (0,354 (\text{°C}/\text{Nc}_{10}) * \text{Nc}_{10}) - 261,07$	$\pm 0,586$
11	$\text{Temp}(\text{cont}) = (0,347 (\text{°C}/\text{Nc}_{11}) * \text{Nc}_{11}) - 256,97$	$\pm 0,733$
12	$\text{Temp}(\text{cont}) = (0,337 (\text{°C}/\text{Nc}_{12}) * \text{Nc}_{12}) - 253,28$	$\pm 0,873$

Aplicando as retas de calibração nos dados obtidos para cada canal em contagens de ADC; adquiridos pelo sistema eletrônico PT12-485, lidos e armazenados pela *interface* gráfica desenvolvida; obtém-se o valor de temperatura de cada Pt-100. Deste modo são obtidos doze valores de temperatura (°C) das entradas e saídas de água de cada um dos coletores solares térmicos avaliados, além da medida da temperatura ambiente.

### 3.2.4 Módulo de Potência da Bomba de Porão

O desenvolvimento de um módulo de potência foi necessário para realizar o controle do bombeamento de água, feito pela bomba de porão de 450GPH, entre o reservatório do IF-UFBA e o conjunto de coletores. Outra bomba de porão modelo 360GPH, foi usada para fazer circular a água entre os coletores estudados e o reservatório isolado. Durante o período de testes a vazão das bombas foi mantida constante.

As bombas de sucção utilizadas no experimento são bombas submersíveis de aplicação náutica, este tipo de bomba é utilizado no esgotamento de água de porão ou

para retirar água de poços. Sua tensão nominal de alimentação é 12 Volts, com uma corrente típica de 2,5 A (Figura 3.14).



**Figura 3.14 – Bomba de porão utilizada na plataforma experimental.**

O circuito de acionamento da bomba de porão pode ser dividido em duas etapas. A primeira é o modulador por largura de pulso, ou *Pulse Width Modulation* (PWM), com frequência de 5 KHz. A largura de pulso é controlada manualmente por um potenciômetro linear, pode variar de 3 a 97%. A segunda etapa, ou parte de potência, recebe um trem de pulsos gerado pelo circuito integrado NE555. Este sinal é aplicado na base do transistor TBJ de potência TIP122, que trabalha em corte e saturação. A corrente da bomba depende do estado lógico e do tempo ativo de cada pulso que compõe o trem gerado pela primeira etapa.

Variando a largura do pulso aplicado à base do transistor TBJ varia-se a potência da bomba e conseqüentemente a vazões na bomba de porão. Esta vazão é proporcional à posição do potenciômetro do gerador de PWM.

O módulo de potência é capaz de controlar correntes de até 6 A. O potenciômetro usado tem um curso de  $\frac{3}{4}$  de volta e controla as larguras de pulso de saída ( $t_{on}$  e  $t_{off}$ ) do modulo de PWM. Os pulsos mais curtos, ou limite mínimo deste circuito, têm a largura de 10  $\mu s$ , enquanto que em seu limite superior, este circuito fornece pulsos de 190  $\mu s$ . A figura 3.15 mostra o diagrama eletrônico utilizado para a montagem do circuito elétrico de acionamento das bombas.

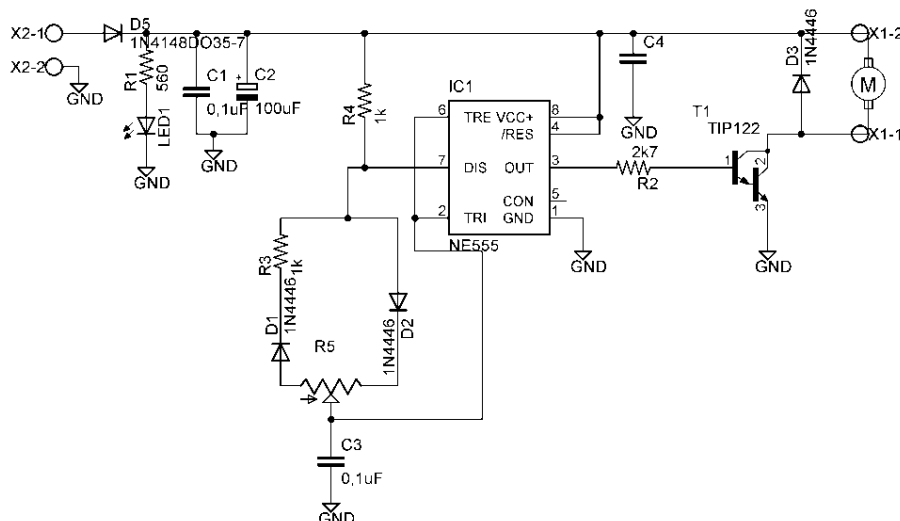


Figura 3.15 – Diagrama eletrônico do módulo de potência.

### 3.2.5 Eletrônica de Leitura do Radiômetro

O radiômetro mede o fluxo de radiação solar sobre a superfície da Terra, ou seja, a energia luminosa incidente por unidade de área desta superfície. Para essa medição, o sensor utilizado foi o CMP3 de fabricação Kipp & Zonen, este modelo sendo do tipo piranômetro, ou seja, termopilhas que possuem duas superfícies receptoras, uma negra e uma branca. Em alguns modelos a superfície branca é trocada pela carcaça ou *housing* do radiômetro, assim a energia líquida depositada é determinada pela diferença de temperatura entre estas superfícies (superfície negra e branca ou superfície negra e carcaça).

Este sensor mede a radiação difusa e é capaz de captar a radiação em um ângulo de até 180°. A figura 3.16 mostra o piranômetro que foi utilizado para a medição da irradiância solar de cada dia.



Figura 3.16 – Piranômetro da Kipp & Zonem á frente e coletores solares ao fundo.



Características técnicas do radiômetro utilizado:

- Fabricante: Kipp&Zonem
- Intervalo do espectro de luz captado: 200 à 3600 nm
- Sensibilidade: 12,43  $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
- Tempo de resposta: 5s
- Offset A:  $\pm 3 \text{ W}/\text{m}^2$
- Offset B:  $\pm 1 \text{ W}/\text{m}^2$
- Erro direcional: (até 80° com 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ )  $< 5 \text{ W}/\text{m}^2$
- Sensibilidade em relação à temperatura entre -20 °C e +50 °C:  $\pm 0.5 \%$
- Intervalo de temperatura de operação: -40 °C e +80 °C
- Limite máximo de medição de irradiação: 4000  $\text{W}/\text{m}^2$
- Campo de visão: 180°

O processo de aquisição de dados da irradiância solar está dividido em duas partes: primeiro o sinal de saída do radiômetro é aplicado na entrada de um multímetro digital de bancada Minipa MDM8146, em seguida o próprio multímetro converte este sinal de tensão em uma palavra digital de 4 ½ dígitos, no padrão de comunicação RS-232, a palavra é então transmitida para um computador pessoal. O PC executa um programa de leitura e armazenamento do sinal na linguagem de programação QBASIC. A figura 3.17 apresenta o diagrama de blocos da montagem realizada para a medida de irradiância.

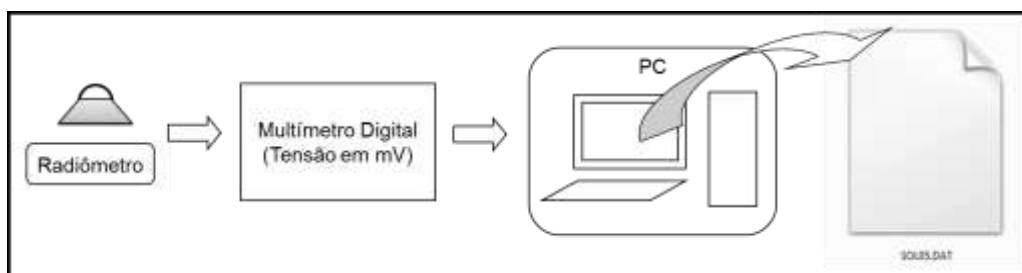


Figura 3.17 – Diagrama de blocos da montagem para a medida de irradiância.

Para as medidas de irradiância solar utilizou-se a calibração, ou seja, a relação linear fornecida pelo fabricante. Esta relação é apresentada na equação 3.1.

$$Irradiância \left( \frac{W}{m^2} \right) = \frac{Tensão(milivolts) * 1000}{12,43 \left( \frac{\mu V m^2}{W} \right)} \quad (3.1)$$



A título de exemplo, a relação matemática vista na equação 3.1 mostra que para uma tensão de saída de 12,43 mV, lida no multímetro de bancada, a irradiância solar é de 1.000 Watts/m<sup>2</sup>.

### 3.2.6 Anemômetro e Medida da Velocidade do Vento

O conhecimento da velocidade do vento durante os ensaios realizados nos coletores solares térmicos é um parâmetro relevante, pois este fator tem influência na determinação da eficiência térmica nas placas solares em teste.

Para a medição da velocidade do vento nos experimentos realizados foi utilizado um anemômetro de fabricação da LAMBRECHT modelo METEO DIGIT I do tipo concha. Este equipamento tem como características principais: a exibição dos valores velocidade em 3 ½ dígitos, indicador do estado de bateria baixa, resolução de um dígito, sendo alimentado por uma única bateria ou fonte externa de 9 volts, sendo dotado de um conector de saída analógica de tensão proporcional à velocidade do vento. O sensor deste anemômetro é do tipo concha, modelo 14423 e permite medir velocidades de 1,1 até 90 m/s, com a precisão de 1,5% do valor medido. A figura 3.18 destaca o anemômetro utilizado na plataforma de testes.



figura 3.18 – Anemômetro instalado na plataforma experimental.

Na literatura técnica são encontrados diversos trabalhos que relatam a influência do vento na determinação da eficiência térmica em coletores solares. Em Sharples e Charlesworth (1998), é apresentado um modelo de transferência de calor pelo efeito do vento que leva em consideração a direção do vento, como conclusão do trabalho tem-se a tabela 3.2.

Mveh (1999) mostra os resultados da eficiência térmica das placas solares estudadas, separadas por faixas de velocidade de vento. Encontram-se também análises e discussões similares da influência do vento em Souto (2009), Costa (2002) e em Salcedo (2004).

**Tabela 3.2 – Equações das perdas térmicas pela influência do vento levando em consideração a sua direção em relação ao azimute, sendo  $V_w$ , a velocidade do vento.**

Direção de incidência do vento em relação ao azimute	Equação das perdas pelo efeito do vento $h_w(Wm^{-2}K^{-1})$	Faixa de velocidade do vento válida (m/s)
0°	$h_w = 2,2V_w + 8,3$	$0,8 < V_w < 6,7$
45°	$h_w = 2,6V_w + 7,9$	$0,6 < V_w < 6,2$
90°	$h_w = 3,3V_w + 6,5$	$0,8 < V_w < 6,2$
135°	$h_w = 2,2V_w + 7,9$	$0,8 < V_w < 6,4$
180°	$h_w = 1,3V_w + 8,3$	$0,6 < V_w < 4,9$
-135°	$h_w = 2,3V_w + 7,8$	$0,3 < V_w < 7,2$
-90°	$h_w = 2,2V_w + 11,9$	$0,5 < V_w < 6,7$
-45°	$h_w = 3,9V_w + 6,0$	$0,5 < V_w < 6,7$

Nos ensaios dos coletores solares as perdas térmicas do sistema foram avaliadas de maneira global, incluído as perdas por convecção e irradiação. A utilização da medida de velocidade do vento serviu para informar as condições de teste.

As perdas térmicas ( $F_R(U_L)$ ) do coletor solar térmico são englobadas pelo coeficiente angular da reta de eficiência térmica instantânea. No subitem **2.2.2 Eficiência Térmica** este coeficiente aparece na equação 2.6, e na seção **4. Resultados** serão encontrados os valores desses coeficientes para as placas solares térmicas avaliadas.

### 3.3 Setup dos Testes Realizados

A validação da plataforma mecatrônica de avaliação comparativa dos coletores solares foi feita por meio de diferentes experimentações. Alguns desses experimentos

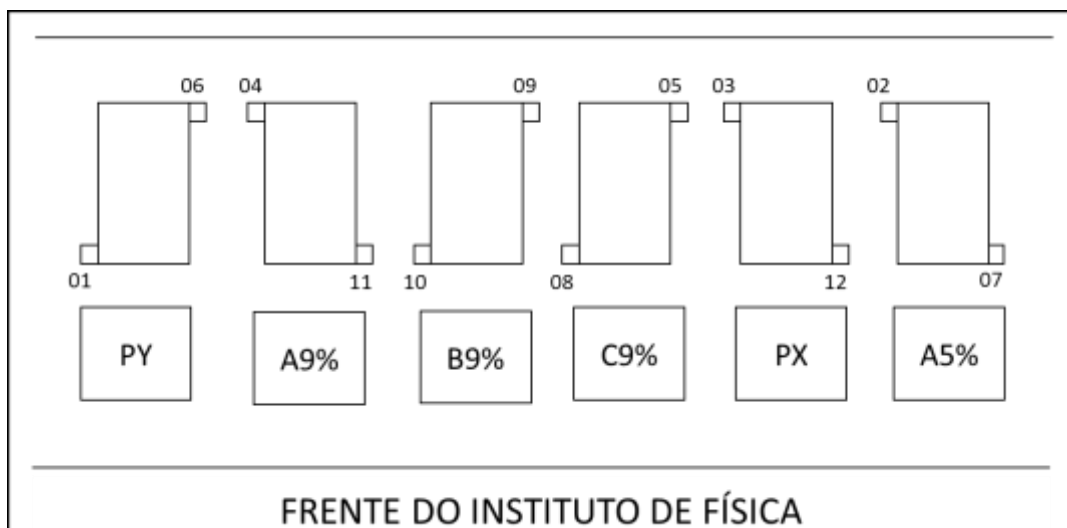
foram baseados nas recomendações da norma ABNT, como o levantamento do tempo de resposta e a obtenção da eficiência instantânea, e os outros testes, determinação da temperatura máxima e determinação da eficiência térmica máxima, foram realizados com o objetivo de buscar informações complementares sobre o desempenho do conjunto de placas solares testadas.

### **3.3.1 Análise de Maior Temperatura Atingida**

O primeiro teste realizado na plataforma de ensaios foi o levantamento das curvas de aquecimento das placas solares térmicas. Este primeiro ensaio permitiu testar o limite máximo para a temperatura lida nos sensores PT-100 e verificar a adequação do projeto. Além disso, ajudou a determinar quais foram os painéis solares que atingiram as mais altas temperaturas e quais foram os coeficientes de aquecimentos destas placas solares.

Os ensaios de validação foram feitos com quatro placas solares fabricadas utilizando resíduos e/ou escória industrial misturados, junto com o negro de fumo, à resina de polietileno. Estes coletores foram encomendados pela Cetrel S/A e denominados de coletor solar de formulação 9,0% de resíduo tipo A (A9%), coletor solar de formulação 9,0% de resíduo tipo B (B9%), coletor solar de formulação 9,0% de resíduo tipo C (C9%) e coletor solar de formulação 5,0% de resíduo tipo A (A5%), todas elas fabricado pelo processo X. Já as placas comerciais, com diferentes dimensões, foram denominadas de coletor fabricado por processo Y (PY) e o coletor fabricado por Processo X (PX). O código adotado tem por finalidade manter o sigilo industrial, como solicitado pela empresa parceira deste projeto de pesquisa.

No total, seis coletores solares foram instalados no terraço (solário) do IF-UFBA, com o objetivo de comparar a variação de temperatura no líquido contido no interior destas placas em função da insolação. A figura 3.19 apresenta o diagrama de disposição dos coletores solares térmicos e o esquema de distribuição dos sensores de temperatura do tipo Pt-100 inseridos nos painéis.



**Figura 3.19 – Diagrama da disposição das placas solares e de rotulação dos sensores de temperatura.**

O procedimento adotado para a execução do primeiro experimento foi posicionar corretamente as seis placas solares térmicas no suporte mecânico, para obter a maior insolação diária possível. Para isso adotou-se as recomendações do critério de posicionamento pela média anual vista em Abrava, (2008) e em Teodoro da Silva, (2010). Esta inclinação foi de  $13^\circ$  de inclinação, já que Salvador encontra-se nesta latitude. A figura 3.20 exibe a disposição das placas solares nos suportes mecânicos montados.



**Figura 3.20 – Disposição das placas solares térmicas durante os testes.**

Complementando o procedimento acima descrito, os dados de temperatura e de irradiância solar foram coletados a cada minuto entre 07h 15min e 17h 30min. Os dois programas de coleta de dados eram inicializados simultaneamente para que os sinais de

temperatura e irradiância fossem síncronos e não houvesse distorções ou atrasos nos resultados e consequências sobre as análises finais.

No dia anterior ao início dos experimentos todas as placas solares térmicas eram preenchidas com água em temperatura ambiente, em torno de 26°C, até transbordar, com o objetivo de se eliminar as bolhas de ar e fazer com que todas estivessem numa mesma temperatura ao amanhecer do dia. Desta maneira, todas as placas térmicas encontravam-se num mesmo equilíbrio térmico.

Ao final das medições, a análise de dados buscou avaliar a capacidade da plataforma de ensaio em registrar o limite máximo de temperatura que os coletores atingiriam. Além disso, este ensaio determinou quais placas atingiram as mais altas temperaturas, estando os coletores em um circuito hidráulico fechado, bem como a determinação do coeficiente de aquecimento dessas placas solares. Deste experimento foram selecionadas três placas solares que obtiveram destaque, sendo dois coletores solares fabricados utilizando resíduos de compósitos misturados ao negro de fumo e a placa comercial fabricada pelo processo PY.

### **3.3.2 Determinação da Constante de Tempo**

Após selecionar as três placas solares térmicas que apresentaram desempenho diferenciado, usando para tanto o teste anterior, determinou-se a constante de tempo das mesmas. Esta determinação tem o objetivo de validar o experimento na plataforma de testes e conhecer a resposta dinâmica da placa solar quando estimulada por um agente externo.

A constante de tempo é definida como sendo o tempo em que o coletor solar térmico leva para alcançar 63,2% da temperatura final a partir de um estímulo do tipo degrau. Este parâmetro determina o tempo mínimo para que haja uma variação de temperatura perceptível na placa solar.

A determinação do comportamento dinâmico de um coletor solar pode ser realizada por uma excitação do tipo degrau do fluxo de radiação solar incidente, ou por um degrau na temperatura do fluido na entrada da placa ou por um degrau na vazão mássica de operação do sistema. O método escolhido neste trabalho foi o de aplicação de um degrau no fluxo de radiação solar nas placas solares, que é o método mais utilizado para a obtenção da constante de tempo deste tipo de coletor. A figura 3.21 mostra o diagrama do sistema montado para a realização desta etapa.

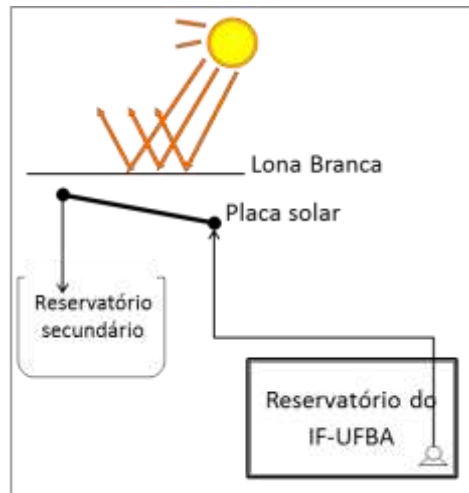


Figura 3.21 - Diagrama experimental da resposta ao degrau.

Para o ensaio da determinação da constante de tempo de um coletor solar recomendam-se as seguintes práticas (caso do degrau na irradiação solar) (ABNT, 2009; SOUTO, 2009; MVEH, 1999):

- Fluxo de radiação mínima de  $750 \text{ w/m}^2$  durante o ensaio;
- Velocidade do vento inferior a  $5 \text{ m/s}$ ;
- Vazão mínima recomendada de  $1 \text{ L/min}$  para cada  $\text{m}^2$  de placa solar térmica;
- Com o coletor operando em regime permanente, reduzir instantaneamente a zero a irradiação solar que incide sobre a placa, com uma cobertura opaca branca, com um *gap* entre a placa e a cobertura de maneira que não impeça a circulação do ar;
- Recomenda-se também que a temperatura de água de entrada seja próxima da temperatura ambiente.

O procedimento para o cálculo da constante de tempo é mostrado na equação 3.2.

$$\frac{T_s(t_1) - T_e}{T_s(t_0) - T_e} = 0,368 \quad (3.2)$$

Sendo  $T_s$  a temperatura de saída da água na placa solar,  $T_e$  a temperatura de entrada da água na placa solar,  $t_0$  o tempo inicial do começo do experimento, e  $t_1$  o tempo em que se é atingido o valor de 63,2 % da temperatura final.

O tempo mínimo necessário para a conclusão do experimento deve satisfazer a condição da equação 3.3, tempo em que a temperatura de saída já está a um valor abaixo de 36,8% da temperatura de entrada.

$$\frac{T_s(t) - T_e}{T_s(t_0) - T_e} < 0,3 \quad (3.3)$$

Com os procedimentos descritos acima, aplicando a equação 3.2 e tendo respeitado a condição final imposta pela equação 3.3, é possível determinar a constante de tempo das placas solares térmicas estudadas. Os gráficos com as curvas de resposta do teste de determinação da constante de tempo e o valor do tempo encontrado para cada placa analisada, será apresentado no capítulo reservado aos resultados.

### 3.3.3 Determinação da Eficiência Térmica Máxima

Este teste tem o objetivo de avaliar o grau de transferência de calor entre o coletor solar e a água circulando em seu interior. Este teste leva em consideração a configuração de parâmetros de vazão de alimentação, irradiação solar incidente e de temperatura da água de entrada.

Para a realização dos testes de eficiência térmica máxima regulou-se a vazão nominal de saída da placa solar em 0,02 kg/s ou 1,2 L/min, conservou-se a irradiação solar média maior do que 600 W/m<sup>2</sup>, seguindo as recomendações da norma ABNT (2009). Manteve-se a temperatura da água de entrada igual à temperatura do reservatório de água potável do Instituto de Física e próxima da temperatura ambiente.

Para manter um regime estável de temperatura da água de entrada, a água aquecida na saída do coletor solar térmico não retornava para o reservatório do IF, sendo recolhida em outro tanque externo. Assim, a temperatura da água de entrada foi mantida constante durante os ensaios. O *setup* experimental é apresentado na figura 3.22.

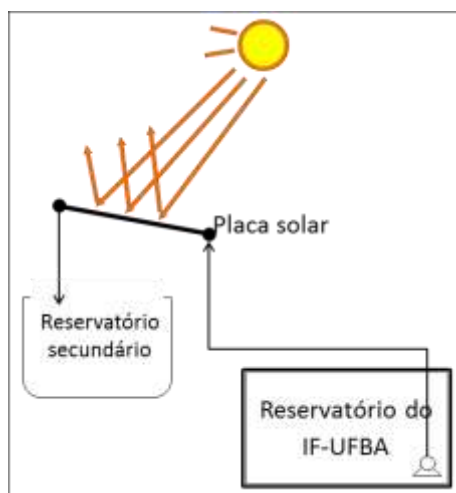


Figura 3.22 – Setup experimental do teste de eficiência máxima.

A equação que determina a eficiência térmica dos coletores solares foi determinada na secção **2.2.2 Eficiência Térmica** e aplicada nos dados coletados da bancada experimental operando nesta configuração.

### 3.3.4 Determinação da Eficiência Instantânea

Segundo Costa (2002), o levantamento da curva de eficiência instantânea é de extrema importância para análise de desempenho do coletor solar térmico. Esta análise traz informações sobre o comportamento da eficiência térmica ( $\eta$ ) em relação à razão da diferença de temperatura da água de entrada da placa e a temperatura do ambiente, além da própria irradiação solar. A partir dessas informações é possível determinar uma relação linear, como discutido na secção **2.2.2 (Eficiência Térmica)**.

Existem vários métodos para obter esta curva de eficiência conforme a literatura técnica, vide Zilles (1988) e Mveh (1999). O procedimento básico adotado neste trabalho consistiu em colocar o coletor exposto ao Sol e fazer circular água entre um reservatório térmico isolado e ele, com uma vazão regulada e contínua. A temperatura da água do reservatório aumenta gradativamente e, portanto, a temperatura da água de entrada do coletor, até o ponto de saturação. Concomitantemente realizou-se a coleta de dados de irradiação solar, temperatura do fluido na entrada e na saída do coletor, temperatura ambiente, velocidade do vento.

Terminada a coleta destas variáveis foi possível calcular a reta da eficiência instantânea de acordo com a fórmula discutida na secção **2.2.2 Eficiência Térmica**. O *setup* experimental montado para realizar o ensaio é apresentado na figura 3.23.

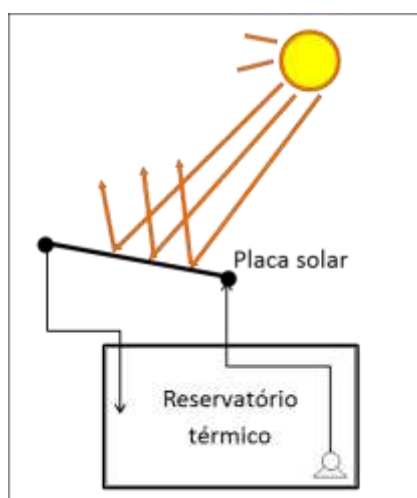


Figura 3.23 – Setup montado para o ensaio de eficiência instantânea.

As condições de teste para a determinação da reta de eficiência instantânea foram:



- Vazão de operação: 1,2 L/min ou 0,02 Kg/min;
- Irradiação média maior do que 700 W/m<sup>2</sup>;
- Volume de água circulada no experimento: 120 litros;
- Utilizou-se sempre o mesmo par de sensores PT-100 para as placas avaliadas;
- Pelo menos 6 horas do dia de irradiação solar incidente;
- Alteração gradativa da temperatura de entrada da água partindo da temperatura ambiente até o valor máximo de aquecimento;
- Estação do ano: Verão.

## 4. RESULTADOS

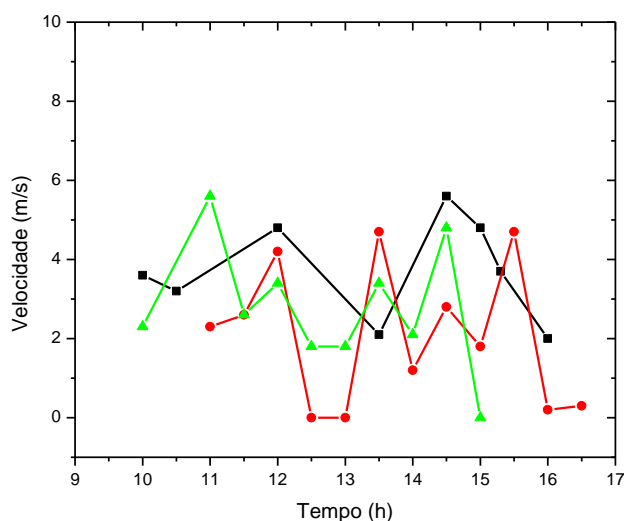
Os testes de validação da plataforma experimental de ensaios de coletores térmicos desenvolvida e os testes comparativos entre os coletores solares ocorreram no período de novembro de 2010 até fevereiro de 2011.

As primeiras medidas de temperatura das placas solares e de irradiância, feita com o radiômetro, foram colhidas simultaneamente no dia 04/11/2010 a partir das 07h 33min, com intervalo de sessenta segundos entre as aquisições. Nessas primeiras medições os canais 03, 09 e 12 estavam desligados, pois apresentavam problemas técnicos.

A segunda tomada de dados aconteceu em 05/11/2010 às 07h 45min e teve como objetivo testar o programa e o sistema eletrônico verificando seu funcionamento.

No dia 08/11/2010 as placas foram completadas com água, substituiu-se os Pt-100 danificados (03, 09 e 12) e refez-se a calibração de temperatura dos três novos sensores. A aquisição dos dados válidos começou as 09h 30min deste mesmo dia.

Após a etapa de verificação funcional da plataforma de testes, foram escolhidos os dias com as melhores condições climáticas, pois os testes foram realizados ao ar livre, simulando uma condição mais próxima da condição de uso dos painéis térmicos. A figura 4.1 apresenta os gráficos das velocidades de vento obtidas durante os experimentos. Ao todo, foram coletados os dados de três dias de velocidade de vento e realizada uma média para conhecer o valor médio dessas velocidades. Este intervalo estende-se de 1,5 a 3,5 m/s.



**Figura 4.1 – Medida da velocidade do vento durante os ensaios. Em preto, a medida do dia 24/01/2011, em vermelho, a medida do dia 25/01/2011 e em verde, a medida do dia 27/01/2011.**

Os dados dos testes para obtenção da eficiência máxima dos coletores solares térmicos foram adquiridos nos dias 27/01/2011 e 02/02/2011, a partir das 10 horas da manhã, para a placa C9%. A placa A5% foi avaliada nos dias 28 e 29/01/2011, a partir das 12 horas. Por fim, avaliou-se a placa comercial (PY) nos dias 31/01/2011 e 01/02/2011, a partir das 10h40min da manhã.

Nos dias 03 e 04/02/2011 foram realizados os testes de degrau de irradiância solar, para tanto, foi utilizado um sistema de cobertura composto por uma lona branca que serviu para cobrir completamente a área da placa. O primeiro coletor solar térmico testado foi o coletor comercial (PY), seguido das placas C9% e A5%. Finalmente, os testes de eficiência térmica instantânea ocorreram no período de 08 à 21/02/2011.

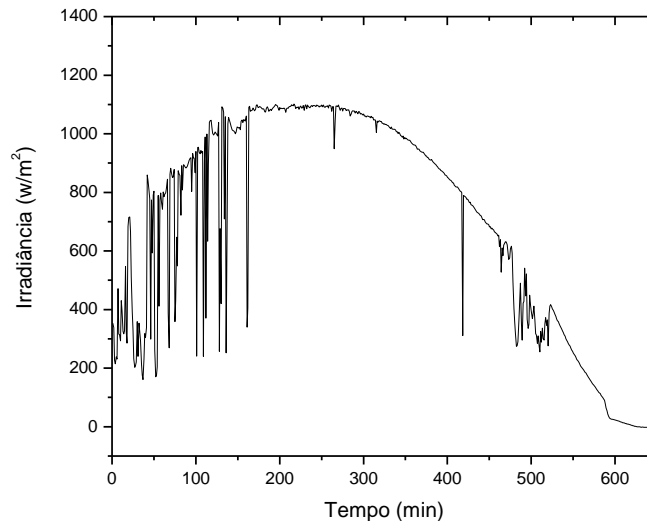
Por fim, foram realizados os testes de obtenção da reta de eficiência instantânea, o período de experimentação durou de 08 de fevereiro de 2011 até 21 de fevereiro de 2011 e a sequência das placas térmicas avaliadas foi C9% seguida por A5% e o coletor comercial (PY).

#### **4.1 Testes de Levantamento da Curva de Aquecimento**

Ao todo, quatro placas solares fabricadas utilizando os resíduos misturados ao negro de fumo, junto com duas placas comerciais, foram testadas. As medidas da curva de aquecimento ocorreram durante o período de 05/11/2010 até 18/11/2010, com as tomadas de dados começando entre 07 e 08 da manhã e eram finalizadas entre 17 e 18 no final da tarde.

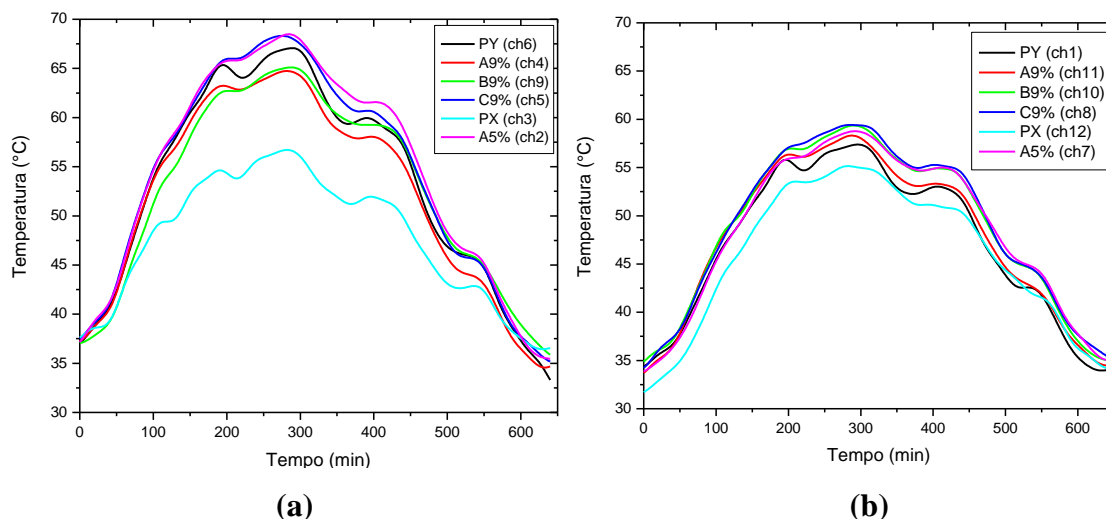
Ao total foram adquiridos 13 dias de dados ou cerca de 120h de insolação. O dia 13/11/2010 foi o dia com menor incidência de nuvens, sendo o melhor dos dias de medida. Este dia foi escolhido como referência para a obtenção da maior temperatura dos painéis e do coeficiente térmico dos doze coletores solares térmicos.

Na figura 4.2 está representado o gráfico de irradiância em função do tempo para o dia selecionado. Os dados foram colhidos a partir das 07h 15min, assinalado como  $t = 0$  min no gráfico.



**Figura 4.2 – Irradiância solar do dia 13/11/2010 a partir das 07h15min.**

Na figura 4.3 podem ser encontrados os gráficos das temperaturas em função do tempo, para os doze canais de medição, em 4.3 (a) estão os sensores que se localizam na parte superior da placa, enquanto em 4.3 (b) estão os sensores da parte baixa. Para melhor visualização colocou-se na legenda dos gráficos a referência dos sensores seguindo a ordem de instalação das placas. Assim, por exemplo, em 4.3 (a), PY (ch6) é o sensor de cima e em 4.3 (b), PY (ch1) corresponde ao sensor de baixo, ambos da placa comercial fabricada por PY.



**Figura 4.3 (a) – Gráfico das temperaturas nas placas solares da região superior e (b) – Gráfico das temperaturas da parte inferior.**

#### 4.1.1 Análise de maior temperatura atingida no dia

Nesta análise foi levada em conta a maior temperatura atingida em cada placa durante o experimento do dia 13/11/2010. Na tabela 4.1 são apresentadas as mais altas temperaturas atingidas por par de sensores dos coletores solares.

**Tabela 4.1 – Comparação entre as maiores temperaturas das placas solares.**

	PY	A9%	B9%	C9%	PX	A5%
Temp_Alto (°C)	67,1	64,8	65,1	<b>68,3</b>	56,7	<b>68,5</b>
Temp_Baixo (°C)	57,4	58,3	<b>59,4</b>	<b>59,4</b>	55,2	58,8
$\Delta$ Temp (°C)	9,7	6,5	5,7	8,9	1,5	9,7

Em destaque na tabela 4.1 encontram-se os melhores resultados de aquecimento obtidos. Tomando por base os dados em destaque (assinalados em cinza), os valores absolutos da temperatura da parte alta das placas (Temp\_Alto) seguem a ordem: placa de formulação 5,0% de resíduo tipo A experimentou o maior aquecimento, seguida pelas placas com 9,0% de resíduo tipo C, comercial feita por PY, placa com 9,0% de resíduo tipo B, placa com 9,0% de resíduo tipo A e por fim a placa comercial feita por PX.

Nesta análise foram apenas utilizados os valores de temperatura da parte alta da placa solar-térmica, pois em um sistema real de aquecimento solar a água sai, para armazenamento no tanque térmico, pela conexão superior.

Neste tipo de ensaio, a diferença de temperatura ( $\Delta$ Temp) entre o par de PT-100's montados em uma mesma placa, é proporcional à eficiência térmica. Quanto maior esta diferença, maior será a eficiência da placa solar térmica em converter energia radiante em calor. Analisando os resultados sob esta ótica, a placa comercial feita por PY apresentou melhor desempenho, seguida pela placa com 5,0% de resíduo tipo A em sua formulação, placa com 9,0% de resíduo tipo C, placa com 9,0% de resíduo tipo A, placa com 9,0% de resíduo tipo B e por fim a placa comercial feita por PX.

#### 4.1.2 Coeficiente de aquecimento da placa relativo à irradiância do dia

O coeficiente de aquecimento, de cada placa, relativo à irradiância do dia, equivale ao coeficiente angular da reta que pode ser associada ao início do gráfico de temperatura em função do tempo. Para o cálculo destes coeficientes foram tomados os pontos entre 38,8 e 101,2 minutos de exposição, para os canais superiores, e entre 39,8 e 101,17 minutos para os canais inferiores.

**Tabela 4.2 – Coeficientes de aquecimento das placas solares.**

	PY		A9%		B9%		C9%		PX		A5%	
Canal	CH6	CH1	CH4	CH11	CH9	CH10	CH5	CH8	CH3	CH12	CH2	CH7
Coef.	0,226	0,151	<b>0,23</b>	0,18	0,206	0,165	<b>0,237</b>	0,157	0,156	0,142	<b>0,235</b>	0,155
Coef. Méd.	0,189		0,205		0,186		0,197		0,149		0,195	
Razão	<b>1,493</b>		1,267		1,243		<b>1,506</b>		1,1		<b>1,519</b>	

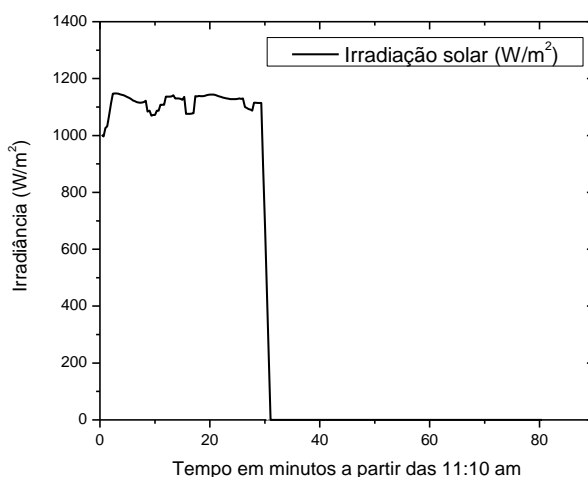
Quanto maior o coeficiente de aquecimento, mais rápido a placa ganha ou perde calor, as placas térmicas com maiores coeficientes médios foram as placas com 9,0% de resíduo tipo A, 9,0% de resíduo tipo C e 5,0% de resíduo tipo A (ver tabela 4.2).

Como os valores dos coeficientes são muito próximos, este método não foi capaz de diferenciar o comportamento dos diferentes painéis solares térmicos. Contudo é possível concluir que as placas 9,0% de resíduo tipo B e a comercial feita por PX, têm um desempenho inferior em relação às demais, essa conclusão é corroborada pelos resultados obtidos na medição da temperatura da água de saída das placas.

Na tabela 4.2 encontra-se também a razão entre os coeficientes de aquecimento da água de saída pela de entrada, em uma mesma placa. Esta razão indicará a capacidade desta placa solar em realizar a troca térmica com a água no seu interior. Para uma placa com maior razão, um maior volume de água poderá ser aquecido em um mesmo intervalo de tempo, quando comparada às demais.

#### 4.2 Avaliação da Constante de Tempo dos Coletores Solares

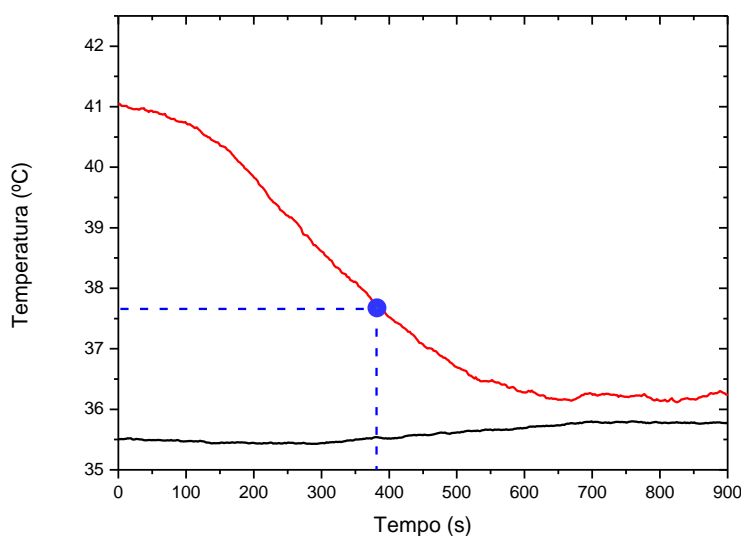
Os testes de resposta ao degrau foram realizados regulando a vazão nominal de entrada de água para 1,2 L/min (0,02 kg/s) para todas as placas testadas, manteve-se também constante a temperatura da água de entrada, próxima à temperatura ambiente. A irradiação solar média durante o teste foi de 1064 W/m<sup>2</sup> para a placa comercial PY realizado no dia 03/02/2011, 1060 W/m<sup>2</sup> para a placa C9% coletado no dia 04/02/2011 e 1086 W/m<sup>2</sup> para a placa A5% coletado no dia 04/02/2011. Estes fluxos de irradiação foram bruscamente levados a zero cobrindo-se com um tecido o coletor solar, a partir de um determinado momento. A figura 4.4 mostra este instante de bloqueio do sol para o teste realizado na primeira placa.



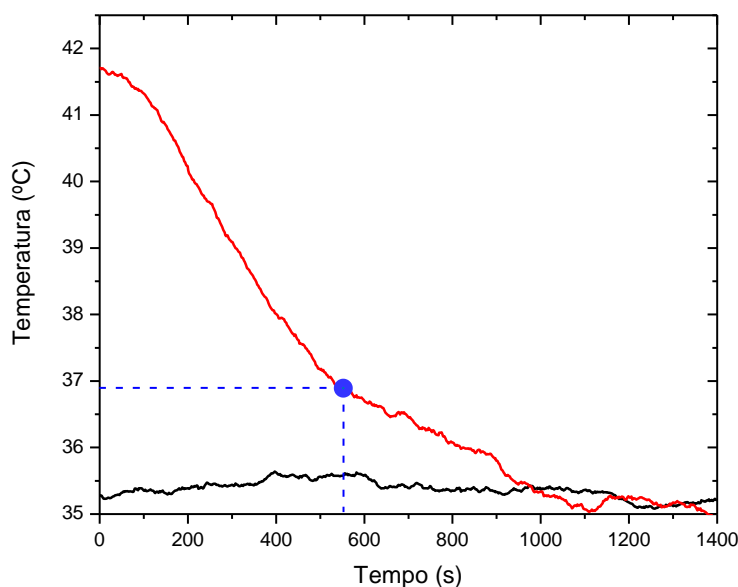
**Figura 4.4 – Radiação solar com o instante de bloqueio total para a realização do teste de resposta ao degrau.**

As figuras 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam os gráficos de resposta ao degrau para as placas comercial PY, C9% e A5%, respectivamente. O tempo  $t_0$  para todos os gráficos é o instante em que se cobriu cada placa testada. As curvas pretas representam a temperatura de entrada da água e as vermelhas a temperatura de saída da água.

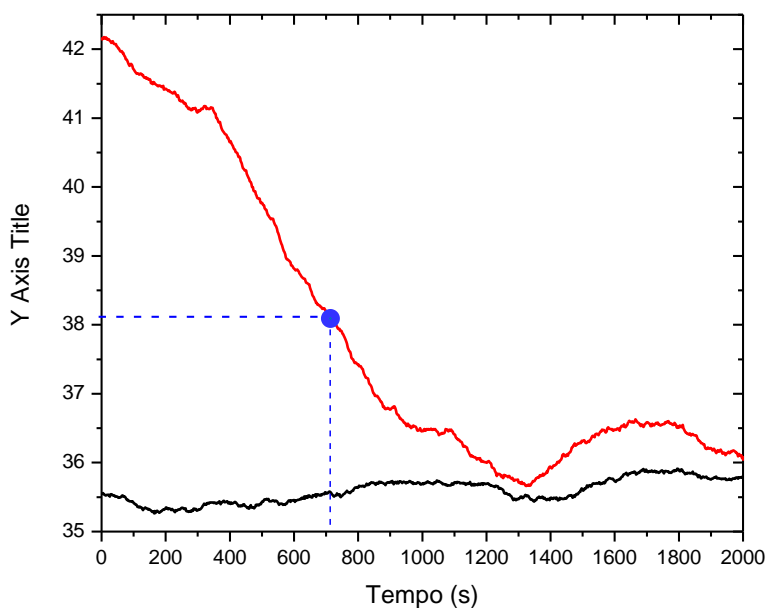
Nos gráficos das figuras 4.5, 4.6 e 4.7 são destacados em azul os pontos em que a temperatura de saída atinge o valor de 36,8% do valor final da temperatura de entrada, estes valores de tempo, encontrados para cada temperatura de entrada, são conhecidos como constantes de tempo do coletor solar térmico.



**Figura 4.5 – Gráfico da resposta ao degrau para a placa PY. Em preto a temperatura de entrada, em vermelho a temperatura de saída e em azul a constante de tempo.**



**Figura 4.6 – Gráfico da resposta ao degrau para a placa B9%. Em preto a temperatura de entrada, em vermelho a temperatura de saída e em azul a constante de tempo.**



**Figura 4.7 – Gráfico da resposta ao degrau para a placa A5%. Em preto a temperatura de entrada, em vermelho a temperatura de saída e em azul a constante de tempo.**

Utilizando a equação 3.2, foi possível obter a constante de tempo para as três placas a partir dos ensaios realizados, a Tabela 4.3 apresenta os valores encontrados. Quanto menor a constante de tempo de um coletor solar, mais rápido ele aquecerá a água de entrada, conseguindo, desta maneira, aquecer uma maior quantidade de água em um mesmo período de sol.

Em ordem crescente de valores, tem-se que a placa comercial PY possui o menor tempo de resposta, seguida pelo coletor solar térmico C9% e por último a placa solar térmica A5%.

**Tabela 4.3 – Valores das constantes de tempo obtidas durante os ensaios dos coletores solares térmicos.**

<b>Tipo de coletor solar</b>	<b>Constante de tempo (s)</b>
Placa comercial (PY)	$383 \pm 12$
C9%	$551 \pm 23$
A5%	$720 \pm 25$

### **4.3 Avaliação da Eficiência Térmica Máxima**

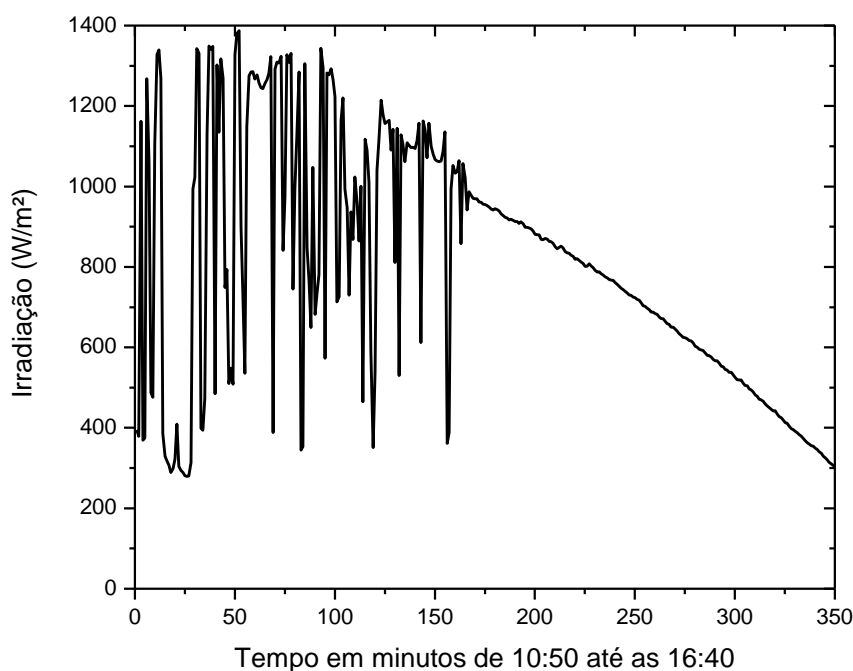
Os ensaios experimentais para obter a eficiência térmica máxima dos coletores solares térmicos, foram realizados de acordo com o procedimento descrito na seção de Materiais e Métodos.



Dentre todos os dias de dados adquiridos selecionaram-se, para determinar a eficiência térmica máxima, os dias que apresentaram uma irradiação solar média maior que  $700 \text{ W/m}^2$  durante o período de ensaio. Este valor é indicado pelas Normas brasileiras que regulamentam os experimentos de eficiência térmica (ABNT, 2009).

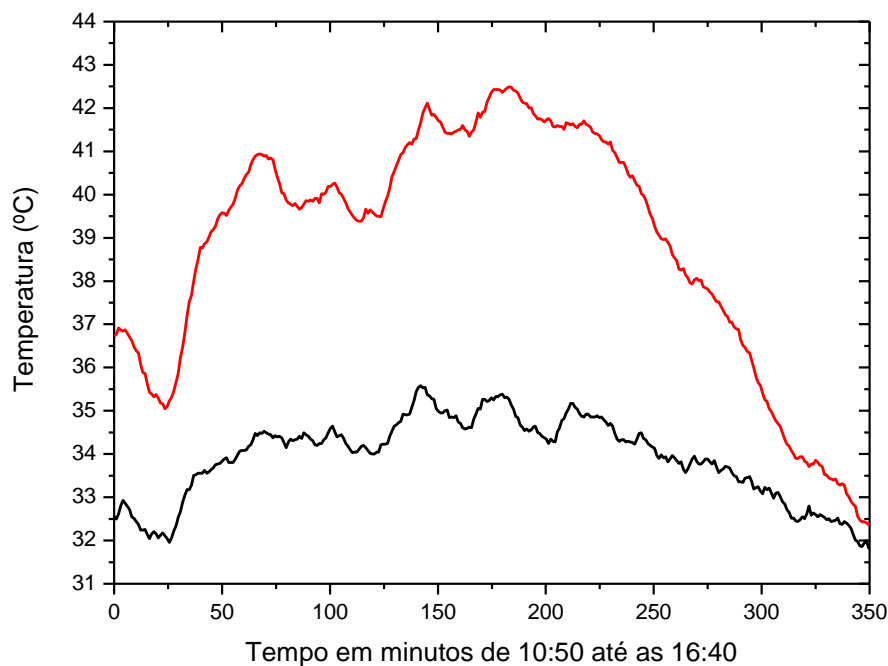
A seguir, são apresentados gráficos da irradiação solar selecionados, para cada uma das placas testadas. Além disso, são apresentados gráficos do comportamento das temperaturas e os resultados para a eficiência térmica máxima. Esses valores de temperatura, juntamente com os valores de irradiação, foram utilizados para calcular a eficiência térmica usando, para tanto, a equação 2.4.

No dia 31/01/2011 a placa comercial PY foi analisada, o período de teste foi das 10 horas e 50 minutos até 16 horas e 40 minutos. A figura 4.8 apresenta os dados da irradiação solar para o dia do teste. Observa-se a presença de nuvens passageiras durante o período da manhã, o que não ocorre no período da tarde.

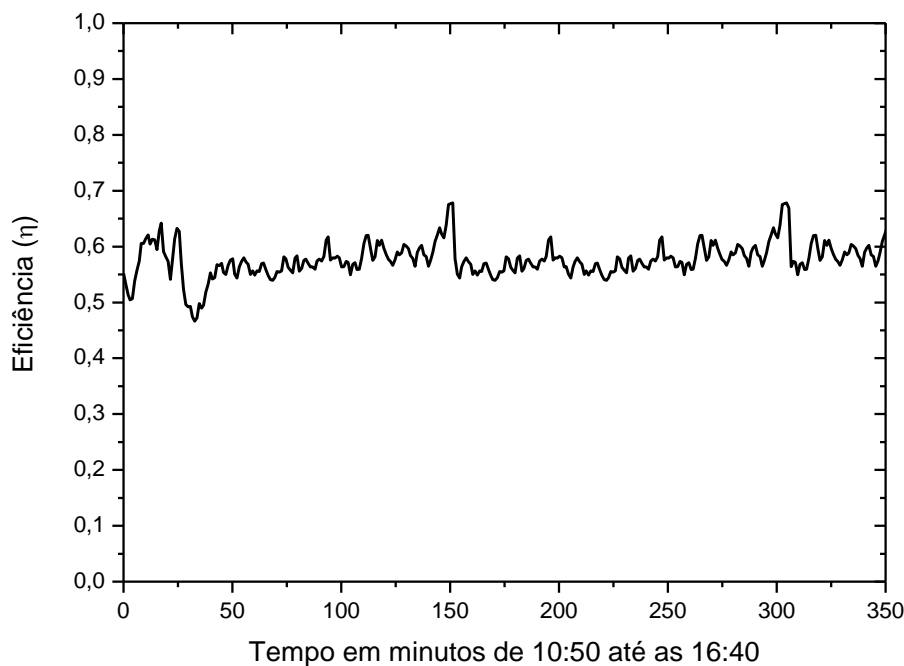


**Figura 4.8 – Gráfico da irradiação solar do dia 31/01.**

O gráfico da figura 4.9 mostra o comportamento da temperatura de entrada e de saída da placa comercial PY. A figura 4.10 apresenta o resultado da eficiência térmica máxima desta placa durante todo o ensaio, o valor numérico médio da eficiência máxima é 0,55.

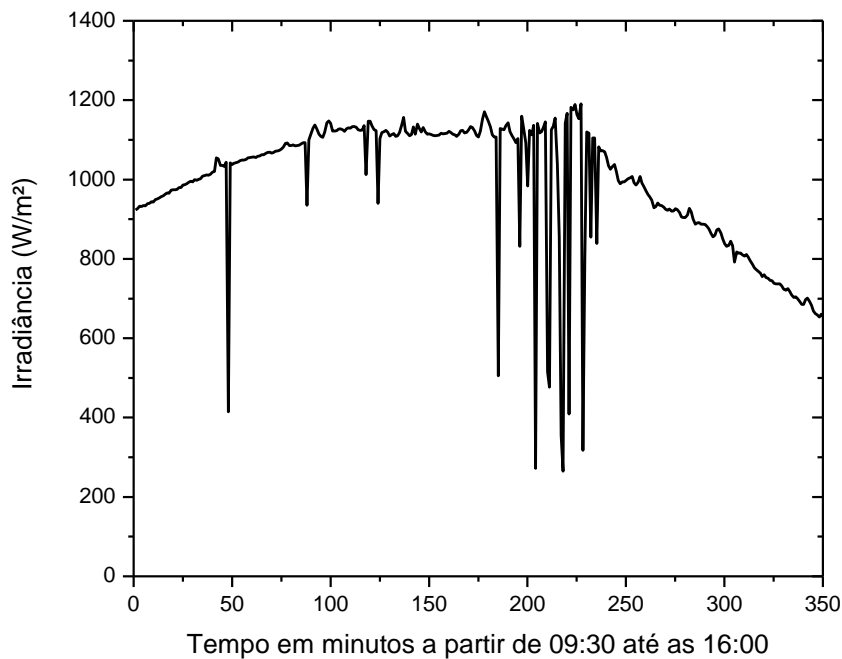


**figura 4.9 – Gráfico das temperaturas de entrada (em preto) e saída (em vermelho) na placa solar comercial PY.**



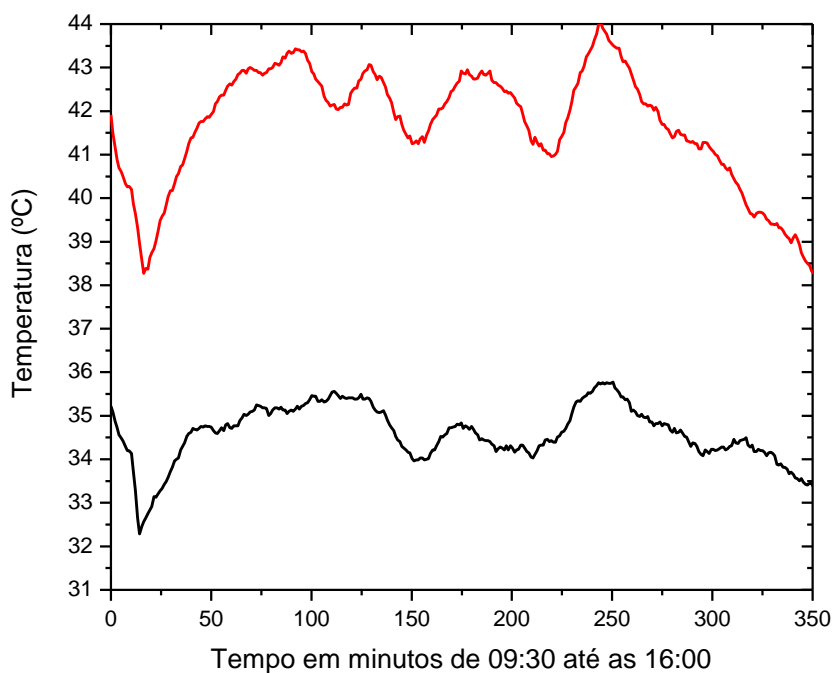
**Figura 4.10 – Gráfico da eficiência térmica do coletor solar PY.**

No dia 24/01/2011 a placa C9% foi ensaiada, o período de teste foi das 09 horas e 30 minutos até 16 horas. A figura 4.11 apresenta os dados da irradiação solar para o dia do teste. Observa-se a presença de nuvens passageiras e rápidas durante o período do experimento, porém em média o nível de irradiação é superior ao valor mínimo indicado para a realização do teste.

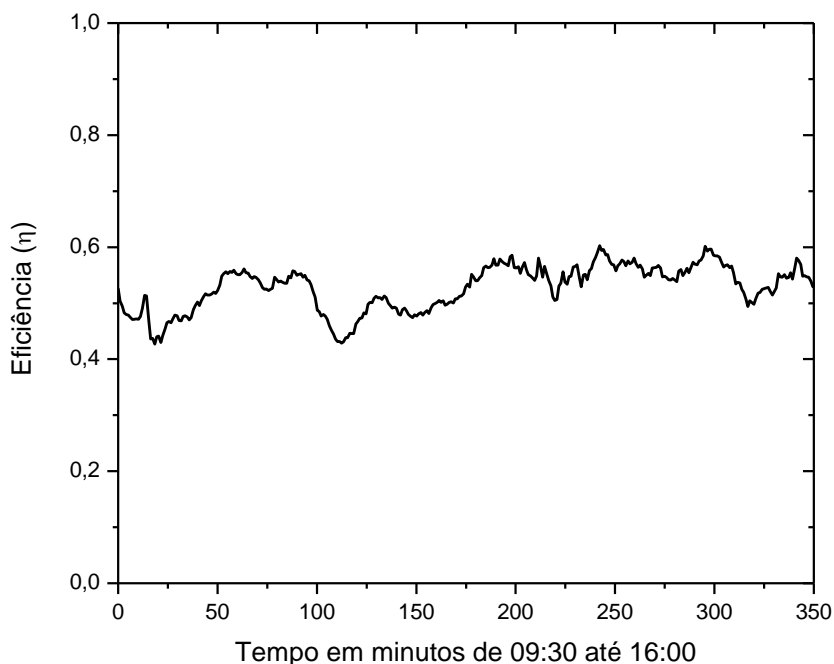


**Figura 4.11 – Gráfico da irradiação solar do dia 24/01.**

O gráfico da figura 4.12 mostra o comportamento da temperatura de entrada e de saída da placa C9%. A figura 4.13 apresenta o resultado da eficiência térmica máxima desta placa durante todo o ensaio, o valor numérico médio da eficiência máxima é 0,53, um valor próximo da placa comercial PY.

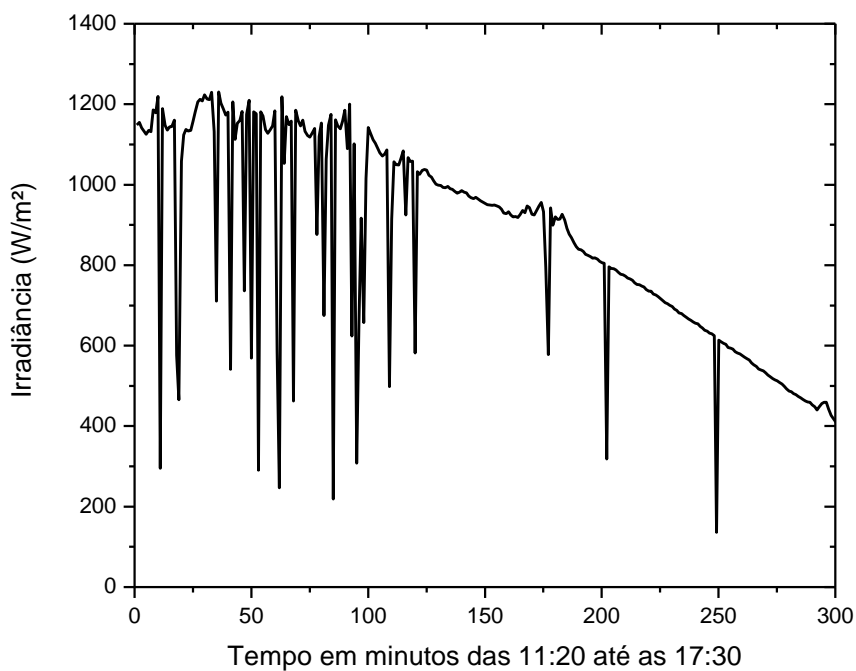


**figura 4.12 – Gráfico das temperaturas de entrada (em preto) e saída (em vermelho) na placa solar C9%.**



**figura 4.13 – Gráfico da eficiência térmica do coletor solar C9%.**

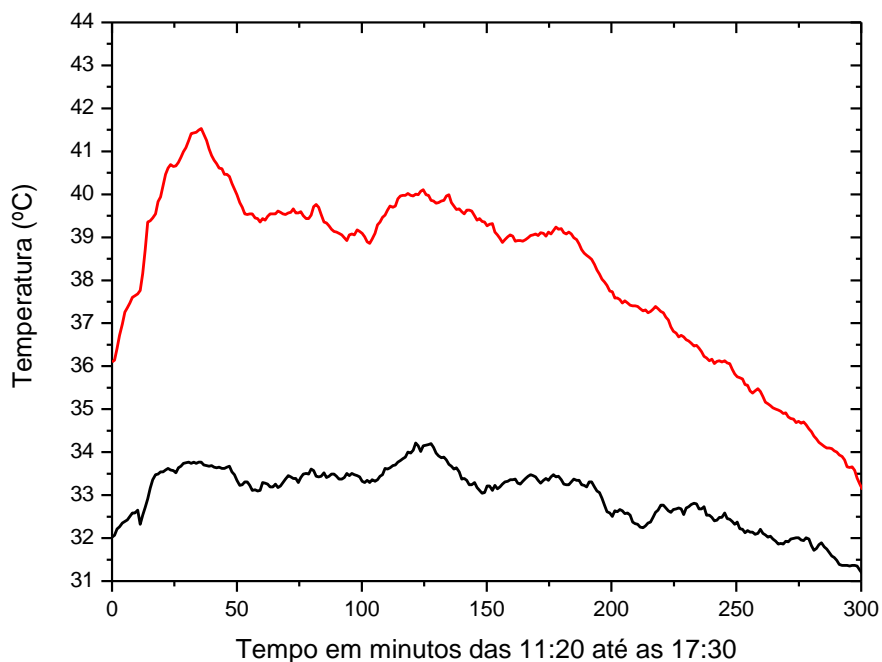
No dia 29/01/2011 foi realizado o experimento de eficiência térmica máxima da placa A5%, o período de teste foi das 11h 20min até 17h 30min. A figura 4.14 apresenta os dados da irradiação solar para o dia do teste. Observa-se a presença de nuvens passageiras e rápidas ao meio dia, porém no restante do dia não houve a presença intensa de nuvens. Mais uma vez o nível de irradiação médio superou o valor mínimo indicado para a realização do teste.



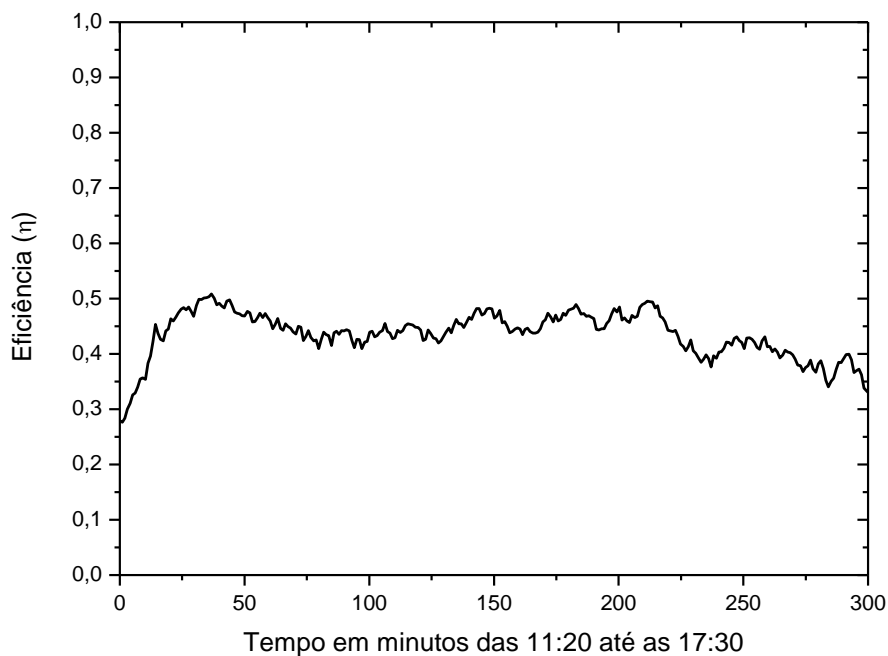
**Figura 4.14 – Gráfico da irradiação solar do dia 29/01.**

O gráfico da figura 4.15 mostra o comportamento da temperatura de entrada e de saída da placa solar térmica A5%. A figura 4.16 apresenta o resultado da eficiência

térmica durante todo o ensaio desta placa, o valor numérico médio da eficiência máxima é 0,44. Em comparação com os outros valores de eficiência encontrados, esta placa teve o menor rendimento térmico médio.



**Figura 4.15 – Gráfico das temperaturas de entrada (em preto) e saída (em vermelho) na placa solar térmica A5%.**



**Figura 4.16 – Gráfico da eficiência térmica do coletor solar A5%.**

A tabela 4.4 apresenta, em ordem decrescente, todos os valores médios da eficiência térmica máxima para os ensaios realizados. Em primeiro lugar encontra-se a placa solar térmica comercial PY, seguido da placa C9%, que apresentou um valor

muito próximo a placa solar térmica comercial PY, e por último o coletor solar térmico A5%.

**Tabela 4.4 – Valores da eficiência térmica para as placas solares térmicas ensaiadas.**

Coletor solar térmico	Eficiência térmica máxima ( $\eta$ )
Placa comercial (PY)	$0,551 \pm 0,011$
C9%	$0,5283 \pm 0,0020$
A5%	$0,4368 \pm 0,0023$

#### 4.4 Avaliação da Eficiência Instantânea

Nos últimos testes foi feita a determinação da eficiência térmica instantânea, estes ensaios ocorreram no período de 08 de fevereiro de 2011 a 21 de fevereiro de 2011. Os testes consistiram em utilizar uma circulação forçada da água entre o reservatório térmico isolado e a placa solar térmica em teste. Com isso, a temperatura da água de entrada aumentou gradativamente até o valor de saturação.

Para a determinação da eficiência instantânea foi medida a irradiância solar a cada dia de ensaio (figuras 4.17, 4.19 e 4.21). Foram também medidas as temperaturas de saída e de entrada da água, esta medida aparece representada na figura 4.18(a), 4.20(a) e 4.22(a) pela linha preta, enquanto que a temperatura de saída é representada pela linha vermelha. A linha verde representa a medida da temperatura ambiente durante os ensaios. Nessas mesmas figuras, designadas pela letra (b) estão representadas as eficiências instantâneas de cada placa.

Para obter a reta que melhor se ajusta aos dados de eficiência instantânea utilizou-se uma aproximação linear dos pontos representados em cada uma das figuras 6(b), 8(b) e 10(b), ou seja, uma reta na forma ( $Y = \alpha + \beta X$ ). Fazendo analogia com a equação 3 do modelo utilizado, o termo independente  $\alpha$  é equivalente a eficiência máxima ( $F_R(\alpha\tau)$ ), e o coeficiente angular ( $\beta$ ) é análogo às perdas globais ( $F_R(U_L)$ ) do sistema avaliado.

A placa solar térmica comercial (PY) foi testada no dia 20/02/2011, um dia com passagem de nuvens rápidas. A figura 5 apresenta o gráfico da irradiação solar para este dia. A figura 6(a) mostra os dados dos sensores de temperatura. A reta obtida da eficiência instantânea é mostrada na figura 6(b), para esta placa a eficiência máxima vale  $0,5425 \pm 0,0067$  e as perdas térmicas  $25,65 \pm 0,81$ . A equação 4.1 descreve esta reta.

$$\eta_{inst} = 0,5425 - 25,65 \left( \frac{T_e - T_a}{G_t} \right) \quad (4.1)$$

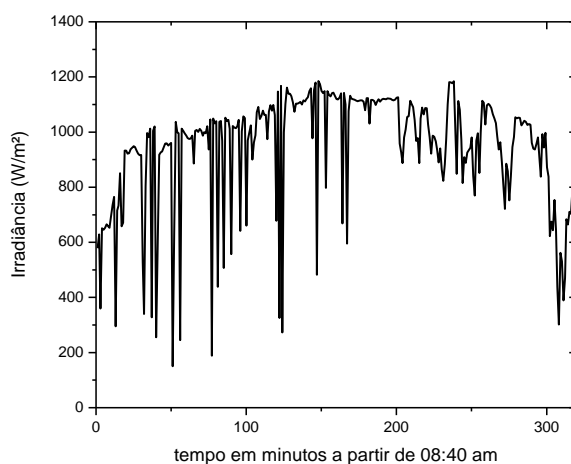


figura 4.17 – Gráfico da irradiação solar do dia 20/02/2011.

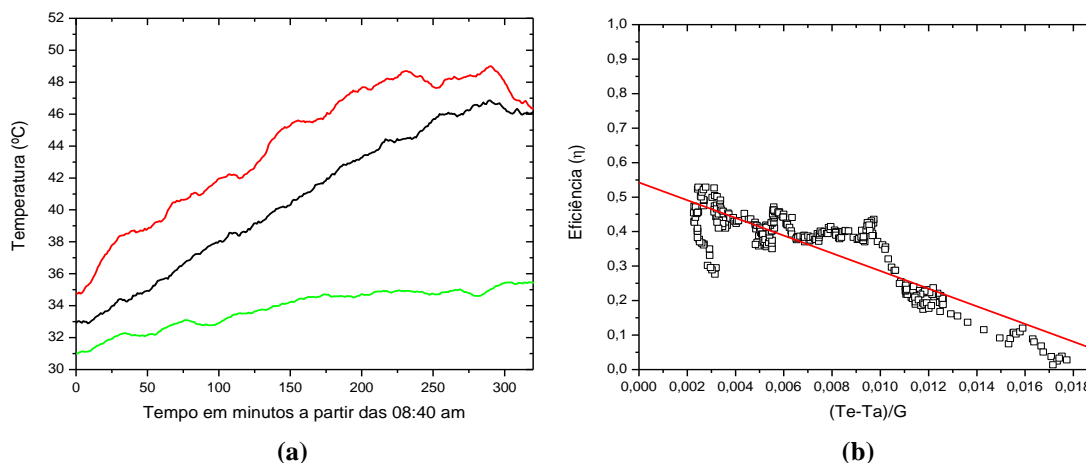
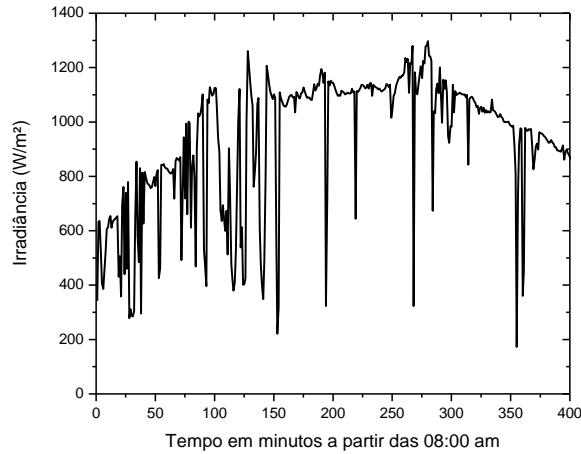


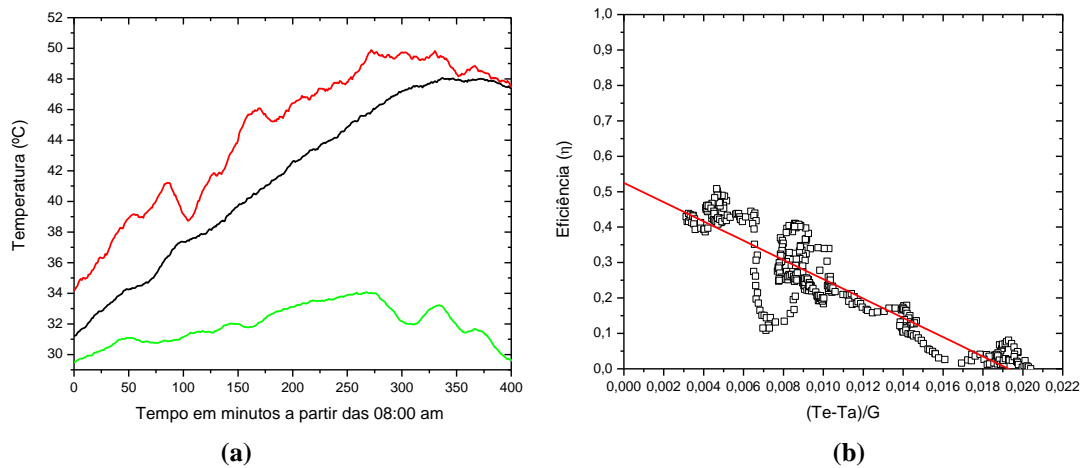
figura 4.18– (a) Temperaturas de entrada (preto), saída (vermelho) e do ambiente (verde) do coletor solar térmico comercial; (b) Determinação da eficiência instantânea deste coletor solar por uma aproximação linear.

Os melhores dados para a análise da eficiência térmica instantânea da placa C9% foram obtidos no dia 08/02/2011 a partir da 08 horas. Este dia também apresentou nuvens rápidas, a figura 4.19 mostra o gráfico de irradiação. A figura 8(a) apresenta os dados de temperatura e na figura 4.18(b) pode ser vista a reta da eficiência instantânea. A eficiência máxima para este coletor vale  $0,5247 \pm 0,0072$  e as perdas térmicas  $27,20 \pm 0,64$ , a equação 4.2 descreve esta reta.

$$\eta_{inst} = 0,5247 - 27,20 \left( \frac{T_e - T_a}{G_t} \right) \quad (4.2)$$



**Figura 4.19 – Gráfico da irradiação solar do dia 08/02/2011.**

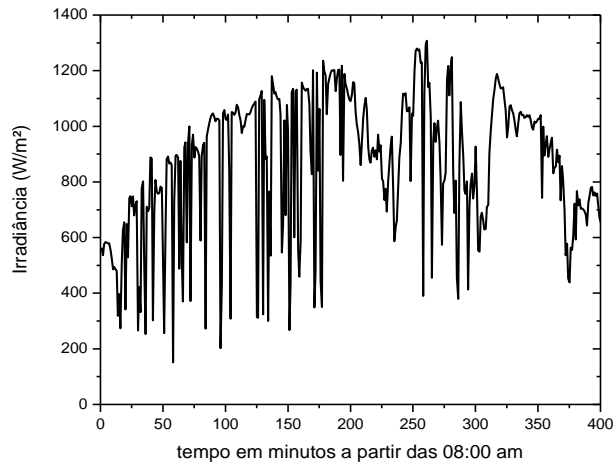


**Figura 4.20 – (a) Temperaturas de entrada (preto), saída (vermelho) e do ambiente (verde) do coletor solar térmico com 9% de resíduo C; (b) Determinação da eficiência instantânea deste coletor solar por uma aproximação linear.**

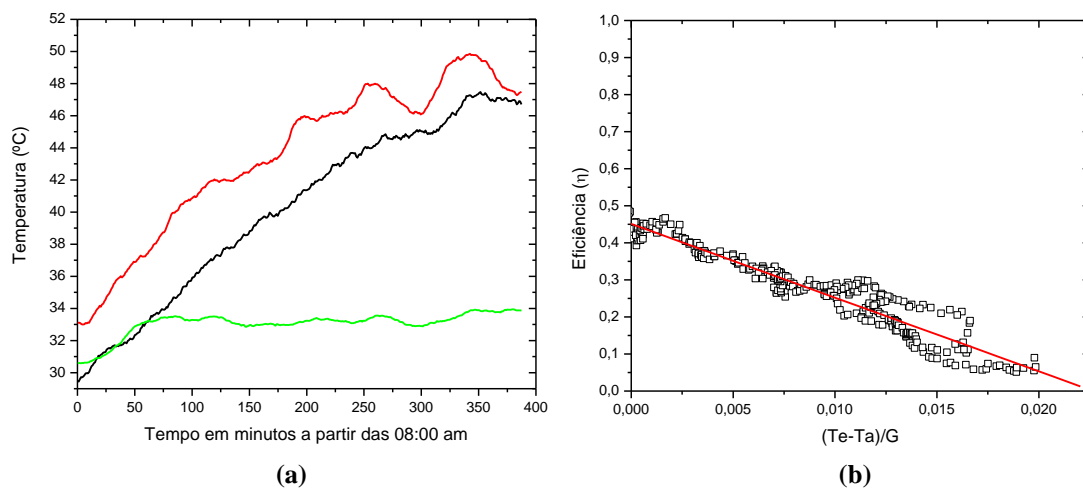
Por fim, para a última placa solar, A5%, o melhor dia foi 21/02/2011 a partir das 08 horas. Este dia também teve a ocorrência de nuvens rápidas, a figura 4.21 mostra o gráfico de irradiação. O gráfico contendo os dados de temperatura de entrada, saída e temperatura ambiente estão na figura 4.22 (a). A reta da eficiência instantânea é mostrada na figura 4.22 (b), sendo a eficiência máxima desta placa de  $0,4510 \pm 0,0026$  e as perdas térmicas valem  $19,89 \pm 0,27$ , a equação 4.3 é a equação desta reta.

$$\eta_{inst} = 0,4510 - 19,89 \left( \frac{T_e - T_a}{G_t} \right) \quad (4.3)$$





**Figura 4.21 – Gráfico da irradiação solar do dia 21/02/2011.**



**figura 4.22 – (a) Temperaturas de entrada (preto), saída (vermelho) e do ambiente (verde) do coletor solar térmico com 5% de resíduo A; (b) Determinação da eficiência instantânea deste coletor solar por uma aproximação linear.**

Observando os termos independentes das equações lineares obtidas nota-se que eles são bastante próximos dos valores da eficiência térmica máxima, obtidos durante o ensaio anterior, este termo representa o instante em que a diferença entre a temperatura de entrada e a ambiente é praticamente zero, o que aconteceu quando foi realizado o teste para a determinação da eficiência térmica máxima.

Comparando as retas encontradas podemos classificar as placas solares térmicas em termos da maior eficiência instantânea. A inclinação da reta reflete o coeficiente das perdas térmicas globais da placa solar térmica. O coletor que apresentou melhor desempenho foi a placa solar comercial, seguida pela placa C9%, e por fim a placa A5%. Apesar da placa A5% apresentar uma baixa eficiência térmica máxima, este coletor solar foi o que apresentou o menor coeficiente de perda térmica global quando comparado às outras duas placas.

Não foi possível diferenciar com clareza o desempenho das placas selecionadas a partir simplesmente da determinação do coeficiente de aquecimento térmico. Entretanto, a partir do resultado do teste de levantamento da curva de aquecimento esta diferença entre os painéis fica evidente, o que torna possível selecionar os três melhores coletores.

Os testes seguintes (levantamento da constante de tempo, eficiência máxima e eficiência instantânea) conseguiram classificar os três coletores avaliados por ordem de maior eficiência. Assim, a placa comercial PY é a mais eficiente, seguida pela placa solar C9% e por fim, a placa solar térmica A5%.

## 5. CONCLUSÕES e PERSPECTIVAS

### 5.1 Conclusões

No Instituto de Física da UFBA foi montada uma plataforma instrumentada capaz de levantar a curva resposta de temperatura, testar a eficiência térmica e determinar a constante de tempo de coletores solares térmicos. Esta plataforma é composta pelos elementos de instalação mecânica, circuito hidráulico, e pela instrumentação eletrônica e de sensoriamento para medição de temperatura, irradiância solar e velocidade do vento.

Foi desenvolvido hardware e software para o condicionamento e aquisição de dados de doze canais de medição de temperatura por PT-100. Foi montado um sistema separado de medida de irradiância, baseado no radiômetro do tipo piranômetro modelo CMP3 da Kipp&Zonen (KIPP&ZONEN, 2006).

Durante os testes foi possível diferenciar e classificar as diferentes placas solares avaliadas nos aspectos de maiores temperaturas, tempo de resposta e eficiência máxima e instantânea com clareza.

Com os dados adquiridos foram feitas as análises das temperaturas máximas atingidas, além da determinação do coeficiente de aquecimento. Os coeficientes de aquecimento médio, para as diferentes placas térmicas, apresentaram valores muito próximos, conclui-se então que somente este parâmetro não é suficiente para diferenciar o desempenho dos painéis solares investigados. Por outro lado, quanto maior o valor da razão entre os coeficientes de aquecimento da água de saída e da água de entrada, em uma mesma placa, maior será a capacidade desta placa em aquecer volumes maiores de água em um determinado intervalo de tempo.

Os resultados das primeiras análises deste trabalho mostraram que a placa com 5,0% de resíduo tipo A em sua formulação apresentou maior aquecimento, seguida da placa com 9,0% de resíduo tipo C e da placa comercial produzida através do Processo Y (PY). No que concerne a diferença de temperatura entre os extremos (entrada e saída), a placa comercial feita por PY e a placa com 5,0% de resíduo tipo A apresentaram maior  $\Delta T$  (valores equivalentes), seguidas pela placa com 9,0% de resíduo tipo C. Com relação à razão entre os coeficientes de aquecimento, as placas com melhor desempenho foram as mesmas e seguiram a mesma ordem das de maior aquecimento.

Ao final dos primeiros testes três placas se destacaram por apresentar melhor

desempenho: a placa com 5,0% de resíduo tipo A, a placa com 9,0% de resíduo tipo C e a placa comercial fabricada através do Processo Y sendo classificadas para os demais testes.

As análises de tempo de resposta, eficiência térmica máxima e da eficiência térmica instantânea foram feitas a partir dos dados coletados durante os ensaios na plataforma experimental com as três placas solares selecionadas nos primeiros testes. Os ensaios foram realizados em dias cuja velocidade do vento variou entre 1,5 e 3,5 m/s. Ao final das análises o coletor solar térmico que apresentou melhor desempenho foi a placa solar comercial, com eficiência máxima de  $54,3 \pm 0,3\%$ , seguida pela placa solar térmica com formulação 9,0% de resíduo tipo C, com eficiência máxima de  $52,5 \pm 0,7\%$ . A placa confeccionada no processo PX C9% apresentou eficiência térmica apenas 2% inferior a da placa comercial fabricada pelo processo PY.

A placa solar térmica com a formulação contendo 5,0% do resíduo tipo A apresentou eficiência máxima de  $45,1 \pm 0,3\%$ .

Quanto às perdas térmicas, a placa com menor índice de perda global foi a placa com 5,0% de resíduo tipo A, com  $19,89 \pm 0,27$  ( $^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$ ), seguida pela placa comercial, com  $25,65 \pm 0,81$  ( $^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$ ) e por fim, a placa com 9,0% de resíduo tipo C, com  $27,20 \pm 0,64$  ( $^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$ ). Apesar da placa com 5,0% de resíduo tipo A ter a menor eficiência térmica máxima, esta por outro lado apresentou maior capacidade de retenção de calor quando comparada às duas outras. Contudo, vale ressaltar que a placa solar térmica usada como referência neste trabalho foi fabricada pelo Processo Y. Sabe-se que devido ao material utilizado neste processo tecnológico o produto final, via de regra, tem um coeficiente térmico superior às placas processadas no Processo X. Tal fato indica que os resultados obtidos neste trabalho são bastante animadores quanto ao potencial do uso de resíduos absorvedores para melhorar a eficiência térmica de coletores plásticos.

Por fim, neste trabalho foi usada uma montagem simples e de baixo custo para a comparação de desempenho de coletores solares. Só foi possível este grau de simplicidade, pois a avaliação feita teve um caráter comparativo.

## 5.2 Perspectivas

Como sugestões de continuação de trabalho podem ser citadas:

- Integração eletrônica da plataforma de ensaios de eficiência e desenvolvimento de um sistema embarcado para tornar o sistema independente de um computador pessoal;
- Limitar a capacidade de testes para um conjunto de dois coletores solares por período visando objetivar a obtenção de resultado mais rápido e diminuir o sistema eletrônico facilitando sua integração;
- Melhor adequação às recomendações das Normas técnicas do sistema de testes para a realização também de eficiência absoluta e poder ser órgão credenciado para fazer a certificação “selo INMETRO” nos coletores avaliados;
- Desenvolver e acoplar um sistema de controle de aquecimento e resfriamento independente melhorando, desta maneira, os testes de levantamento da reta de eficiência instantânea.

## 6. REFERÊNCIAS

- ABNT (1988). **10185 Reservatórios Térmicos para Líquidos Destinados a Sistema de Energia Solar – Determinação de Desempenho Térmico**. Rio de Janeiro, Brasil. 1988.
- ABNT (1993). **7198 Projeto e Execução de Instalações Prediais de Água Quente**. Rio de Janeiro, Brasil. 1993.
- ABNT (2008). **15569 Sistema de Aquecimento Solar de Água em Circuito Direto – Projeto e Instalação**. Rio de Janeiro, Brasil. 2008.
- ABNT (2009). **15747-2 Sistemas solares térmicos e seus componentes – Coletores solares – Parte 2: Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, Brasil. 2009.
- ABRAVA (2008). **Manual de Capacitação em Projetos de Sistemas de Aquecimento Solar**. São Paulo, edição abril de 2008, 2008, 137 p.
- ALDABÓ, R. (2002). **Energia Solar**. São Paulo: Artliber Editora, 155p. 2002.
- ANEEL (2005). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 33p. Brasília.
- BASSO, D. (1980). **Desenvolvimento, Construção e Calibração de Radiômetros para Medida da Radiação Solar**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1980.
- BASTOS, J. B.; MORAES, E. C.; AMARAL, M. S. (1996). **Implementação de um método de Estimativa de Radiação Solar por Satélite**. VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais do congresso. Salvador, Bahia, Brasil. 1996.
- BEGA, E. A., et al. (2006). **Instrumentação Industrial**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.
- CARR, J. J. (1993). **Sensors and Circuits**. USA: Prentice Hall, 1993.
- CETREL (2011). **Institucional | A Empresa**. Disponível em: <<http://www.cetrel.com.br/>>. Acessado em 29 de março de 2011.
- CHAMONE, C.,L.; Scalon, V., L.; Padilha, A. (2008). **Método comparativo de baixo custo para estimativa de eficiência térmica no desenvolvimento de sistemas de aquecimento solar**. 8º Congresso Iberoamericano de engenharia mecânica.

- COSTA, E., R. (2002). **Limitações no Uso de Coletores Solares Sem Cobertura para Sistemas Domésticos de Aquecimento de Água**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS. 69p. 2002.
- DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. (1980). **Solar Engineering of Thermal Processes**. A Wiley-Interscience Publication (John Wiley & Sons, Inc.)
- FRADEM, J. (2003). **Handbook of Modern sensors**. USA: AIP Press, 2003.
- FRÖHLICH, C.; BRUSA, R. (1981). **Solar radiation and its variation in time**. Solar Physics, 74, p. 209.
- EPE (2006). **Balanco energético nacional 2006**. MME / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2006. 188 p.
- FULL GAUGE (2006). Datasheet do Ti-33 Termômetro digital. Brasil. 2p. 2006
- KIPP&ZONEN (2006). **Datasheet do CMP3 Pyranometer**. United States. 12 p. 2006.
- LAMBRECHT (1996). **Datasheet do METEO DIGIT I**. Alemanha. 1996. 3 p.
- LOPO, A. B. (2010). **Análise do Desempenho Térmico de um Sistema de Aquecimento Solar de Baixo Custo**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2010.
- MACDOWELL, A. M. A., (1976). **Programas do Governo em Energia Solar**. In: Seminário Alternativas de Desenvolvimento: Energia solar, Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Economia e Planejamento: São Paulo, SEP.
- MATSUURA, O. T.; PICAZZIO, E. (2006). In: E. d. Paulo (Ed.), **Astronomia: Uma visão geral do universo**. (2ª edição ed., pp. 81-102). São Paulo, SP.
- MOLERO, N., et. al (2008). **Nuevo modelo detallado del comportamiento térmico de captadores plano**. XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Galicia, España, 2008.
- MOREIRA, M. A. (2007). **Linearização por Realimentação de Sistemas de Medição Baseados em Sensores de Medição Baseados em Sensores Termo-Resistivos Mantido a Temperatura Constante**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Bahia. Salvador, outubro de 2007.

MVEH, J., D., B., M. (1999). **Análise Teórica e Experimental da Eficiência Térmica de Coletores Solares Sem Cobertura e de Baixo Custo**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS. 77p. 1999.

NETO, J.H.M.; et al. (2008). **Análise técnica e econômica de coletores solares de baixo custo e convencionais utilizados para aquecimento de água de banho**. CBENS – ISES –CLA. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Latino-Americana da ISES, Florianópolis/SC - 2008.

OLIVEIRA, Amauri et al. (1996). **Termoresistive Sensor Parameters from Its Static I x V**. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Bélgica, 1996.

OLIVEIRA, Amauri. (1997). **Sensores Termo-Resistivos em Configurações Realimentadas**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 1997.

PALLAS-ARENY, Ramon; WEBSTER, John (2001). **Sensors and signal conditioning**, 2ª ed. USA: John Wiley e Sons, 2001.

PALZ, W. (1981). **A Radiação: Matéria Prima da Energia Solar**. São Paulo: Hemus Editora, 1981. Cap 2. 59 – 63 p.

PEREIRA, R. G.; FREITAS, A. L. D.; TORRES, C. S.; COSTA, N. G. (2000). **Desenvolvimento de um Coletor Solar Alternativo Utilizando Materiais Reaproveitáveis**. Mundo & Vida. Vol. 2 (1), 57 – 60, 2000.

PEREIRA, R. C.; SHIOTA, R. T.; MELLO, S. F.; ASSIS, V. Jr.; BARTOLI, J. R., (2006). **Eficiência Térmica de Coletores Solares de Baixo Custo – CSBC**, 17º CBEC/Mat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, 15 a 19 de novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2006.

PINHEIRO, V., F. (2008). **Estudo do Uso de Sensores de Temperatura na Medição e Controle de Vazão de Gases com Aplicação em HVAC**. Dissertação de mestrado do programa de pós-graduação em mecatrônica – UFBA, Salvador, Bahia. 110 p. 2008.

POZZEBON, F.; KRENZINGER. A. (2008). **Desenvolvimento de um programa de simulação computacional para análise de sistemas térmicos de aquecimento de água**, CBENS – ISES –CLA. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Latino-Americana da ISES, Florianópolis/SC - 2008.



PROCEL (2005). **Centrais elétricas brasileiras (eletrobrás): programa nacional de conservação de energia elétrica**. Plano de ação do Procel Sanear 2006/2007. Rio de Janeiro: Eletrobrás; Procel, 2005. 80 p.

PROCOBRE (2010). **Tipos de coletores solares**. Disponível em: [http://www.procobre.org/pr/aplicacoes\\_do\\_cobre/energia\\_solar\\_detalle3.html](http://www.procobre.org/pr/aplicacoes_do_cobre/energia_solar_detalle3.html). Acesso em: 06 de dezembro de 2010.

SARMA, Garimella (1993). **Analysys of a constant voltage anemometer circuit**. Analytical Services and Materials, 1993.

SILVA A. C.G.C; et al (2008). **Modelo de simulação numérica para sistemas de aquecimento de água utilizando energia solar**, CBENS – ISES –CLA. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência LatinoAmericana da ISES, Florianópolis/SC - 2008.

SOARES, L., C., S., J, (2008). **Desenvolvimento de Sistema de Controle: Conjunto de Circuitos Eletrônicos e Código de Programação, para Veículo Operado Remotamente (ROV)**. Dissertação de mestrado do programa de pós-graduação em mecatrônica – UFBA, Salvador, Bahia. 110 p. 2008.

SOUTO, W.A.; BELO, F.A.; SILVA, M.G., (2009). **Development of a system of supervision and data acquisition for tests of performance of solar collectors**. Proceedings of COBEM 2009, 20 th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, Brazil in November 15-20, 2009.

SOUZA, J. V. D. (2008). **Contribuições em Solarimetria para a Composição de uma Rede Baiana de Radiômetros**. Monografia de graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, 2008.

SOUZA, L.G.M.; Gomes, U.U. (2002). **Viabilidades térmica, econômica e de materiais da utilização de tubos de PVC como elementos absorvedores em coletores de um sistema de aquecimento de água por energia solar**. Tese de Doutorado do Programa de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, UFRN, 2002.

SOUZA, L.G.M.; et al. (2008). **Sistema de aquecimento solar utilizando elementos recicláveis**, CBENS – ISES – CLA. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Latino Americana da ISES, Florianópolis/SC - 2008.

TEODORO DA SILVA, I. (2010). **Desenvolvimento de um sistema mecatrônico para posicionamento de um painel fotovoltaico e comparação com painel fixo.** Dissertação de mestrado do programa de pós-graduação em mecatrônica – UFBA, Salvador, Bahia. 78 p. 2010.

WEBSTER, J. (1999). **The Measurement Instrumentation and Sensor Handbook.** USA: IEE Press., 1999.

ZILLES, R. (1987). **Comparação Experimental de Testes de Coletores Solares Planos com Simulador e com Radiação Solar.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, 1987.



TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO  
DAS TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFBA

Eu, Achal Rucas Andrade Achy  
Nacionalidade: Brasileiro, estado civil: Solteiro, profissão: Engenheiro Eletricista, residente e domiciliado na (endereço): Rua Santa Ma Goretti, Nº 265, apt 201 A, Cond. Quinta do Bosque, Vila Laura, cidade: Salvador, estado: Bahia, portador do documento de identidade nº 08876653-57, CPF nº 022.327.195-02, na qualidade de titular dos direitos morais e patrimoniais de autor da OBRA (título) Sistema Mecatrônico para Avaliação Comparativa da Eficiência Térmica de Coletores Solares Térmicos Planos dissertação de (nível) Mestrado ou tese de (nível) \_\_\_\_\_, apresentada na Universidade Federal da Bahia – UFBA em (data) 16 / 12 / 2011, com base no disposto da Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998:

DECLARO, dessa forma, que cedo, em caráter gratuito e por tempo indeterminado, minha tese ou dissertação acima identificada, cuja cópia, segue em anexo, para que seja reproduzida ou divulgada, total ou parcialmente no site: <http://www.bdtf.ufba.br/>

DECLARO, que sou o único e exclusivo responsável, pelo conteúdo da mencionada tese ou dissertação acima referida.

a- (  ) AUTORIZO a Universidade Federal da Bahia/ Sistema de Bibliotecas a disponibilizar, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, o texto integral da publicação acima citada, de minha autoria, no site: <http://www.bdtf.ufba.br/> e em forma de arquivo PDF, para fins de leitura e/ou impressão pela Internet, a título de divulgação da produção científica gerada pela Universidade, a partir de 16 / 12 / 2011.

b- (  ) AUTORIZO, ainda, a Universidade Federal da Bahia/ Sistema de Bibliotecas a remover a tese ou dissertação referida acima do site: <http://www.bdtf.ufba.br/> a qualquer tempo e independentemente de motivo e/ou notificação prévia à minha pessoa.

S. M. Achy, 16 / 12 / 2011  
Local Data


Achal Rucas Andrade Achy  
Ass. do (a) Autor (a)/Representante legal.



CADASTRO DE INFORMAÇÕES PARA PUBLICAÇÃO DIGITAL  
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFBA

<b>1. Identificação do tipo de material</b>	
Tese ( ) Dissertação ( x ) Monografia ( ) Trabalho de Conclusão de Curso ( )	
<b>2. Colegiado do Curso de Pós-Graduação: Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica</b>	
Título:	
<b>Sistema Mecatrônico para a Avaliação Comparativa da Eficiência Térmica de Coletores Solares Térmicos Planos</b>	
Autor(a): Aechal Rucas Andrade Aechy	
CPF: 022.327.195-02	E-mail: aechal.aechy@gmail.com
Orientador(a):	
Nome: Iuri Muniz Pepe	
CPF: 328.133.845-34	E-mail: iupo.ufa@gmail.com
Co-Orientadores:	
Nome:	
CPF:	E-mail:

Membros da Banca	
Nome: Iuri Muniz Pepe	
CPF: 328.133.845-34	E-mail: iupo.ufa@gmail.com
Nome: Denis Gilbert Francis David	
CPF: 609.080.095-34	E-mail: denisgfdca@ufba.br
Nome: Cleber Marcos Ribeiro Dias	
CPF: 893.210.225-20	E-mail: cleber.dias@vetrel.com.br
Nome:	
CPF:	E-mail:

Data de Homologação Pós-Graduação:
Financiadores: Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado da Bahia - FAPESB
Data: 10 de dezembro de 2011
Assinatura: 

Salvador, 16/12/2011

## DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que o texto apresentado na dissertação apresentada para a conclusão do meu curso de Mestrado em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia é de minha autoria e que quaisquer informações utilizadas neste texto que tenha proveniente de outros trabalhos tem fonte claramente expressa e, quando for o caso, devidamente autorizada.

  
Nome: Acbal Rucas Andrade Achy  
CPF: 022.327.195-02