

ANDRÉ LUIZ BARCELLOS JUNIOR

**ANÁLISE TERMOECONÔMICA DE
COLETORES SOLARES PLANOS**



CURITIBA – PR

2003

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE TERMOECONÔMICA DE
COLETORES SOLARES PLANOS**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDRÉ LUIZ BARCELLOS JUNIOR

CURITIBA, JUNHO DE 2003

TERMO DE APROVAÇÃO

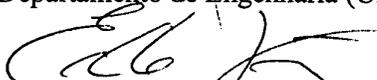
ANDRÉ LUIZ BARCELLOS JUNIOR

“Análise Termoeconômica de Coletores Solares Planos”

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:


Presidente: **Prof. Dr. Nathan Mendes (Orientador)**
Curso de Engenharia Mecânica (PUCPR)


Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Departamento de Engenharia (UNIOESTE)


Prof. Dr. Eduardo Leite Krüger
Departamento de Construção Civil (CEFETPR)


Dr.ª Giovana Aparecida dos Santos Napoleão
Curso de Engenharia Mecânica (PUCPR)


Prof. Dr. Luis Mauro Moura
Curso de Engenharia Mecânica (PUCPR)

//

Curitiba, 30 de agosto de 2003.

Barcellos Junior, André Luiz
B242a Análise termoeconômica de coletores solares planos / André Luiz Barcellos
2003 Junior ; orientadores, Nathan Mendes, Luis Mauro Moura -- 2003.
x, 71 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná,
Curitiba, 2003
Inclui bibliografias

1. Energia solar. 2. Coletores solares. 3. Aquecimento solar.
4. Radiação solar. 5. Energia – Fontes alternativas. I. Mendes, Nathan.
II. Moura, Luis Mauro. III. Pontifícia Universidade Católica do Paraná.
Mestrado em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD-20.ed. 621.47
621.472
523.72
621.042

“O ônus do omissio é ser dirigido por incompetente”

Dedicação

Dedico minha Dissertação de Mestrado aos meus pais, Olga Vieira Barcellos e André Luiz Barcellos, que com todo amor conduziram minha formação educacional.

Agradecimentos

Agradeço ao Criador por mais uma oportunidade de Evolução Espiritual.

À Coordenação do Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica pela oportunidade fornecida.

Ao Prof. Nathan Mendes pela orientação e dedicação.

Ao Prof. Luis Mauro Moura pela orientação e incentivo.

A todos professores do curso de mestrado, pelo conhecimento transmitido ao enriquecimento desta dissertação.

Aos Alunos Eduardo Hideaki Notomi e Filipe Humberto Ciola Medeiros, pela colaboração na montagem e monitoramento do experimento.

A todos os amigos que colaboraram, em diversas formas, para realização e concretização deste trabalho.

A minhas Irmãs Mônica, Lillian e Thais Barcellos pelos momentos de incentivo, força e descontração.

A minha Namorada Laura pela confiança, respeito e paciência para complementação deste trabalho.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Resumo

Abstract

1 – INTRODUÇÃO.....	xi
2 – FONTES DE ENERGIA.....	15
2.1 – Fontes Não Renováveis de Energia.....	15
2.1.1 – Carvão Mineral.....	15
2.1.2 – Gás Natural.....	16
2.1.3 – Petróleo.....	16
2.2 – Fontes Renováveis de Energia.....	18
2.2.1 – Energia Eólica.....	18
2.2.2 – Energia Hidráulica.....	19
2.2.3 – Biomassa.....	20
2.3 – Panorama Energético do Setor Residencial.....	20
2.3.1 – Cenário Energético Brasileiro.....	23
2.4 – Energia Solar.....	25
2.4.1 – Radiação Solar.....	26
2.4.2 – Aproveitamento da Energia Solar.....	29

2.4.3 – Tecnologias de Aproveitamento.....	30
2.4.3.1 – Aproveitamentos Térmicos.....	30
2.4.3.2 – Conversão Direta da Radiação Solar em Energia Elétrica	30
2.4.3.3 – Projetos de Aproveitamento da Energia Solar no Brasil	31
2.4.3.4 – Aquecimento de Água	32
2.4.3.5 – Sistemas Fotovoltaicos	33
3 – METODOLOGIA.....	35
3.1 – Materiais e Métodos	36
3.2 – Montagem do Experimento	36
3.3 – Tomada de Dados	40
3.4 – Sensores Utilizados.....	41
3.4.1 – Fluxímetro de Calor.....	41
3.4.2 – Sistema de Aquisição.....	42
3.4.3 – Termopares.....	42
3.4.3.1 – Termopar Tipo T	43
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1 – Influência do Material de Cobertura.....	44
4.2 – Influência do Isolante Térmico.....	56
4.3 – Influência Combinada do Material de Cobertura e Isolamento Térmico.	59
4.4 – Análise Econômica	60
5 – CONCLUSÕES	61
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXOS	66

Lista de Figuras

<i>Figura 2.1 – Consumo Residencial de Energia Elétrica por Uso Final</i>	23
<i>Figura 2.2 – Consumo Residencial por Habitante</i>	24
<i>Figura 2.3 – Potencial de Conservação da Energia Solar Brasileira</i>	25
<i>Figura 2.4 – Representação das Estações do Ano</i>	27
<i>Figura 2.5 – Radiação solar no Brasil - média anual típica</i>	28
<i>Figura 3.1 – Sistema de aquisição de dados</i>	35
<i>Figura 3.2. – Vistas Isométrica do Sistema de Aquecimento Solar</i>	37
<i>Figura 3.3 – Representação esquemática com Posicionamento dos Termopares e Fluxímetros de calor.</i>	38
<i>Figura 3.4 – Vista Traseira do Aquecedor Solar</i>	39
<i>Figura 3.5 - Princípio da Medição do Fluxo de Calor</i>	45
<i>Figura 4.1 – Comparação em termos de diferença de temperatura para coletores com cobertura de plástico (A1) e cobertura em vidro pontilhado (Referência), ambos com manta de lã de vidro como isolante térmico.</i>	44
<i>Figura 4.2 – Comparação em termos de diferença de temperatura dos reservatórios térmicos, ambos com isolamento térmico em lã de vidro.</i>	45
<i>Figura 4.3 – Comparação em termos de diferença de temperatura para coletores sem cobertura (A2) e cobertura em vidro pontilhado (Referência), ambos com manta de lã de vidro como isolante térmico.</i>	46

- Figura 4.4 – Comparação em termos de diferença de temperatura dos reservatórios térmicos, ambos com isolamento térmico em lã de vidro.* 47
- Figura 4.5 – Comparação em termos de diferença de temperatura para coletores com cobertura em vidro liso (A3) e cobertura em vidro pontilhado (Referência), ambos com manta de lã de vidro como isolante térmico.* 48
- Figura 4.6 – Comparação em termos de diferença de temperatura dos reservatórios térmicos, ambos com isolamento térmico em lã de vidro.* 49
- Figura 4.7 – Comparação em termos de diferença de temperatura para coletores com cobertura em vidro liso com poliuretano, (A4) e cobertura em vidro pontilhado (Referência), com manta de lã de vidro.* 49
- Figura 4.8 – Comparação em termos de diferença de temperatura dos reservatórios térmicos, ambos com isolamento térmico em lã de vidro.* 50
- Figura 4.9 – Comparação em termos de diferença de temperatura para coletores com cobertura em vidro pontilhado e isolamento em poliuretano (A5) e cobertura em vidro pontilhado (Referência), com isolamento em manta de lã de vidro.* 51
- Figura 4.10 – Comparação em termos de diferença de temperatura dos reservatórios térmicos, ambos com isolamento térmico em lã de vidro.* 52
- Figura 4.11 – Comparação em termos de diferença de temperatura para coletores com cobertura em vidro liso e isolamento térmico em serragem (A6) e cobertura em vidro pontilhado e isolamento em lã de vidro (Referência).* 53
- Figura 4.12 – Comparação em termos de diferença de temperatura dos reservatórios térmicos, ambos com isolamento térmico em lã de vidro.* 53

- Figura 4.13 – Comparação em termos de diferença de temperatura para coletores com cobertura em vidro pontilhado e isolamento térmico em serragem (A7) e coletores com cobertura em vidro pontilhado e isolamento em manta de lã (Referência). 54*
- Figura 4.14 – Comparação em termos de diferença de temperatura dos reservatórios térmicos, ambos com isolamento térmico em lã de vidro. 55*
- Figura 4.15 – Comparação em termos de fluxo de calor para os coletores com cobertura de plástico (A1) e em vidro pontilhado (Referência). 57*
- Figura 4.16 – Comparação em termos de fluxo de calor para coletor com vidros pontilhado e isolante em poliuretano (A5) e coletor com vidro pontilhado e manta de lã (Referência). 58*
- Figura 4.17 – Comparação em termos de fluxo de calor para coletor com vidro pontilhado e serragem (Amostra 07) e coletor com vidro pontilhado e manta de lã (Referência). 58*
- Figura 1 – Corte transversal de um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial (S. Güths*, P.C. Philippi*, E. Gaviot† e P. They** - 1994). 66*

Lista de Tabelas

<i>Tabela 2.1 – Consumo final de Energia por setor - %</i>	22
<i>Tabela 3.1 – Tipos de Coletores Utilizados</i>	40
<i>Tabela 4.1 – Materiais de Cobertura e Isolantes Térmicos</i>	59
<i>Tabela 4.2 – Resultados Combinados</i>	59
<i>Tabela 4.3 – Análise Combinada de Coletores Utilizados</i>	60

Resumo

As fontes de energia convencionais, ainda a disposição para o consumo, por muitas vezes irracional, vêm sofrendo indícios de esgotamento e paralelamente causando desequilíbrios ecológicos, o que faz com que o custo unitário de sua utilização e as crises energéticas aumentem substancialmente, tornando cada vez mais oneroso o uso de tais fontes. Entre todas as fontes alternativas de energia em uso atualmente, pode-se considerar a energia solar como uma das mais promissoras, sendo esta limpa, segura e gratuita, podendo ser utilizada a diversos campos de aplicação, por exemplo: secadores, destiladores, geração de energia elétrica, aquecimento de água etc. Dessa forma tendo o objetivo de obter o melhor rendimento térmico em coletores solares planos para aquecimento de água e, visando-se a uma melhor relação custo-benefício, empregaram-se diferentes condições de operação e de materiais. O cumprimento do objetivo deste trabalho exigiu a montagem de bancada, com um modelo com características comerciais como referência e outros oito módulos distintos, permitindo a comparação de resultados em termos de diferença de temperatura e fluxo de calor através da superfície de base do coletor. Os resultados mostraram que coletores sem cobertura podem prover uma melhor eficiência térmica a um custo reduzido.

Abstract

Conventional energy source - still available for consumption, which use is often irrational - start to show indications of extinction, with consequent ecological disequilibria, which makes their cost to gradually increase and energy crises to be more evident. Among all alternative energy sources in use nowadays, the solar one should be considered as the most promising for being clean, safe and totally free. Besides that, it is remarkable its large field of applications in engineering such as in dryers, distillers, electric energy generation systems and water heating systems among many others. In this way, as the main goal is verifying flat-plate solar collectors efficiency for residential water heating systems, we have used different conditions of operations and materials. The fulfillment of this objective required experiments with a commercial models as the reference collector and other eight different modules, allowing making compararisons of results in terms of temperature difference between the collector inlet and outlet and of heat flux across their lower surface as well. Results have shown that collectors without a cover material may give better thermal efficiency with a lower cost.

1 - INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios do ser humano é, sem dúvida, o abastecimento energético mundial. Com o crescente consumo da energia convencional como os derivados de petróleo, energia elétrica, carvão entre outros, torna-se cada vez mais necessária a sua racionalização, evitando oscilações de preços e a sua escassez futura.

Entre todos os problemas enfrentados atualmente devido às crises energéticas provocadas pelo consumo desenfreado de energia, o homem vem procurando meios de supri-las, a partir de fontes alternativas como a energia eólica e a energia solar, tendo esta seus efeitos térmicos aproveitados desde épocas imemoriais.

Uma das formas de aproveitamento da energia solar é a sua utilização para aquecimento de água residencial, tendo em vista que este sistema já vem sendo utilizado no Brasil desde meados de 1970, quando um dos mais sérios problemas mundiais eclodiu, designado de crise energética.

O sistema de aquecimento solar com o objetivo de aquecer água possui elevado custo de aquisição, mas, considerando que o Brasil é um país praticamente de clima tropical, torna-se viável o seu custo-benefício devido à longa vida útil do sistema. Desta forma, faz-se necessária a compreensão funcional do sistema, com base em dados técnicos e experimentais, visando assegurar a demanda necessária a um dimensionamento eficiente.

0-07-450401-0

Mveh *et al.* (1998) realizaram estudos de eficiência térmica em coletores solares sem cobertura de superfície para produção de água quente em locais onde a temperatura é baixa. Segundo os autores, nesse caso a eficiência é muito mais afetada pela temperatura ambiente e pela velocidade do vento.

Siqueira *et al.* (1998) desenvolveram correlações para a determinação da eficiência térmica diária em média mensal de um sistema de aquecimento solar de água operando em regime de termossifão. A equação mostrou que a eficiência é uma função linear das condições meteorológicas, da qualidade do coletor empregado e dos parâmetros de projeto que relacionam o volume do tanque, volume de demanda e área de coleta. Essa correlação é útil já que é uma alternativa simples e rápida para o cálculo da eficiência média mensal sem a necessidade de se recorrer à determinação experimental ou à simulação computacional.

Gomes e Fico (2000) realizaram estudos de otimização teórica do desempenho de coletores de energia solar de placas. Eles introduziram um degrau no perfil da aleta para quatro materiais com diferentes espessuras de placas.

Neto (2000) conduziu testes de campo em diferentes protótipos de coletores solares parabólicos para levantamento de curvas de eficiência térmica, constantes de tempo e eficiências óticas representadas pelos ângulos de incidência solar.

Meir *et al.* (2001) analisaram sistemas solares combinados com coletores solares de diferentes eficiências, através de simulação computadorizada entre um sistema acoplado a um radiador determinado como “coeficiente ideal” e outro com baixa eficiência, mostrando uma diferença na ordem de 1–6%.

Mathiolaukis *et al.* (2001) estudaram o desempenho da circulação da água em coletores solares por termossifão através de uma simples simulação, comparando os dados experimentais com os simulados, podendo ser usado na otimização de projetos em desenvolvimentos futuros.

Eurides *et al.* (2002) verificaram os limites de aplicabilidade de coletores solares sem cobertura para o aquecimento de água doméstica. As simulações simplificadas do comportamento térmico mostraram que estes tipos de coletores podem ser uma ótima opção para aquecimento de água em lugares com temperaturas ambientes médias acima de 20°C, mas devem ser utilizados com cautela para lugares onde o inverno é mais rigoroso.

No entanto, a eficiência dos coletores solares não é uma constante nem se limita a uma faixa estreita de valores como é a eficiência de muitos outros equipamentos utilizados em aquecimento. Depende fortemente dos valores das variáveis atmosféricas que estão sendo alteradas durante o dia todo e também da temperatura do fluido circulante. (PALZ., 1981).

Considerando o sistema de aquecimento como um todo, isto é, levando em consideração os efeitos da tubulação e seu isolamento térmico (reservatório térmico), de sistemas de aquecimento auxiliar e da distribuição geométrica dos componentes, a dificuldade de indicar um número que represente a eficiência aumenta consideravelmente. (PALZ., 1981).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi o de analisar termicamente coletores solares planos, a partir da utilização de sistemas em operação passiva ou termossifão (escoamento por convecção natural no circuito), sendo este o mais comum em países de clima tropical. A análise do sistema ficou a cargo do levantamento da diferença de temperatura entre

a entrada e a saída de coletores e do fluxo de calor através de suas superfícies inferiores, visando o melhor desempenho térmico com diferentes materiais de baixo custo e outros comumente utilizados em sua fabricação.

A seguir o capítulo 2 apresenta uma discussão geral sobre fontes de energia, contextualizando o cenário energético brasileiro. O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada para ensaiar os coletores solares planos e, no capítulo 4, apresentam-se os resultados obtidos e as discussões pertinentes, dando enfoque tanto a análise térmica como econômica desses sistemas de aquecimento de água. Por fim, o capítulo 5 expõe as considerações finais sobre a pesquisa realizada.

2 – FONTES DE ENERGIA

2.1 – Fontes Não Renováveis de Energia

2.1.1 – Carvão Mineral

O carvão mineral é o mais abundante dos combustíveis fósseis, com reservas provadas da ordem de 1 trilhão de toneladas, o suficiente para atender à demanda atual por mais de duzentos anos. (ANP, 2000).

No entanto, o uso energético do carvão mineral ainda é bastante restrito, representando apenas 1% da matriz energética nacional (MME, 2000). Entre as restrições, os altos teores de cinza e enxofre (da ordem de 50% e 2,5%, respectivamente), e o custo elevado para remoção destas partículas são os principais responsáveis pelo baixo índice de aproveitamento do carvão no Brasil.

Embora fontes renováveis, como biomassa, solar e eólica, venham a ocupar maior parcela na matriz energética mundial, o carvão deverá continuar sendo, por muitas décadas, o principal insumo para a geração de energia elétrica, especialmente nos países em desenvolvimento (IEA, 1997).

2.1.2 – Gás Natural

Com o esgotamento dos melhores potenciais hidráulicos do país e a construção do gasoduto Bolívia-Brasil, o gás natural tornou-se uma alternativa importante para a necessária expansão da capacidade de geração de energia elétrica no Brasil.

A participação do gás natural na matriz energética brasileira ainda é pouco expressiva, da ordem de 2,5% do consumo final (valor referente ao ano de 1999); porém, com a entrada de gás importado, notadamente da Bolívia, esse índice aumentará significativamente num futuro próximo.

No Brasil, as reservas provadas são da ordem de 230 bilhões de m³, dos quais 42% estão localizados no Estado do Rio de Janeiro, 25% no Amazonas e 10% na Bahia. A produção é concentrada no Rio de Janeiro (42%) e na Bahia (18%) (ANP, 2000).

2.1.3 – Petróleo

Apesar da expansão recente da hidroeletricidade e da diversificação das fontes de geração de energia elétrica, o petróleo ainda é responsável por aproximadamente 10% de toda a eletricidade gerada no mundo (PAFFENBARGER, 1997).

No Brasil, as reservas provadas são da ordem de 7,36 bilhões de barris e a produção anual está na faixa dos 350 milhões de barris, o que significa uma relação reservas/produção

de vinte anos. Cerca de 90% das reservas estão localizados no mar, principalmente na Bacia de Campos (ANP, 2000).

No caso do Brasil, onde historicamente a geração de energia elétrica é predominantemente hídrica (mais de 90% atualmente), a geração térmica, particularmente com derivados de petróleo, é muito pouco expressiva no âmbito nacional. Contudo, tem desempenhado um papel importante no atendimento da demanda de pico do sistema elétrico e, principalmente, no suprimento de energia elétrica a municípios e comunidades não atendidos pelo sistema interligado (ANP, 2000).

Descoberto no início do século XX, o petróleo se tornou um dos mais importantes elementos da economia mundial. Além de usado como combustível, vários outros derivados colocam o petróleo como base da economia de muitos países, sendo alvo de cobiça e sinal de riqueza para quem detém as jazidas. (O ESTADO DE SÃO PAULO, 2003.)
www.estadao.com.br.

O motivo da guerra no Iraque de 2003 está além das diferenças religiosas, passa pelo controle de fronteiras, de terras e pelo domínio de regiões petrolíferas. (Jornal Cosmo On-line; www.cosmo.com.br; sessão “Especial Oriente Médio”). E este aumento no custo do petróleo internacional, não afetará o abastecimento do produto ao Brasil, mas influenciará no preço (volatilidade).

Apesar do grande salto registrado na produção nacional, a Petrobrás não pode produzir combustível usando apenas o petróleo brasileiro, por ser muito pesado. (Jornal Valor On-line; www.valoronline.com.br; “Petrobrás descarta crise com fechamento do Iraque”; 09/04/2002), e mesmo com todo dinamismo do mercado, a Petrobrás busca rentabilidade, acreditando que se faz necessária uma política que gere lucro sem prejudicar a qualidade de vida da população brasileira, a estabilidade de sua economia e a competitividade internacional. (O ESTADO DE SÃO PAULO, 2003.). www.estadao.com.br

2.2 – Fontes Renováveis de Energia

2.2.1 – Energia Eólica

Para a geração de eletricidade, as primeiras tentativas surgiram no final do Século XIX, mas somente um século depois, com a crise internacional do petróleo (década de 1970), é que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial. (Windpower, Monthly News Magazine, 2000).

Embora ainda haja divergências entre especialistas e instituições na estimativa do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores extremamente consideráveis. Até poucos anos, as estimativas eram da ordem de 20 GW.

Hoje a maioria dos estudos indica valores maiores que 60 GW. A razão dessas divergências decorre principalmente da falta de informações (dados de superfície) e às diferentes metodologias empregadas (CBEE 2000).

A participação da energia eólica na geração de energia elétrica ainda é praticamente desprezível no Brasil, em janeiro de 2002 havia apenas 6 centrais eólicas em operação no país, perfazendo uma capacidade instalada de 18,8 MW (ANEEL, 2002).

2.2.2 – Energia Hidráulica

A participação da energia hidráulica na matriz energética nacional é da ordem de 42%, gerando cerca de 90% de toda a eletricidade produzida no país. Apesar da tendência de aumento de outras fontes, devido a restrições socioeconômicas e ambientais de projetos hidrelétricos e os avanços tecnológicos no aproveitamento de fontes não-convencionais, tudo indica que a energia hidráulica continuará sendo, por muitos anos, a principal fonte geradora de energia elétrica do Brasil.

No Brasil, a geração hidrelétrica tem garantido, nos últimos anos, a produção de cerca de 95% da eletricidade consumida no país (IJHD, 2000). A capacidade instalada atualmente é da ordem de 61 GW, o que representa cerca de 37% do potencial inventariado e 23% do potencial estimado.

2.2.3 – Biomassa

Uma das principais vantagens da biomassa é que, embora de eficiência reduzida, seu aproveitamento pode ser feito diretamente, através da combustão em fornos, caldeiras etc, sendo ainda muito restrito o uso de biomassa para a geração de eletricidade existe vários estudos e aplicações, tanto em países desenvolvidos como em países em desenvolvimento.

No Brasil, a biomassa representa cerca de 20% da oferta primária de energia. A imensa superfície do território nacional, quase toda localizada em regiões tropicais e chuvosas, oferece excelentes condições para produção e uso energético da biomassa em larga escala.

Em janeiro de 2002, havia registro de 159 termelétricas à biomassa em operação no Brasil, perfazendo uma capacidade instalada de 992 MW, o que corresponde a 8% do parque térmico de geração e a 1,4% de toda a capacidade instalada no país (ANEEL, 2002).

2.3 – Panorama Energético do Setor Residencial

Ao longo da história da economia, os fatores de produção tiveram importância variável. Nos primórdios, o capital, entendido como o estoque dos utensílios, ferramentas, edificações etc., empregados na produção, tinha pequena importância e a energia era fornecida pelo próprio homem, por animais domesticados ou a existente *in natura* (quedas d'água, ventos etc.).

Para Palz (1981) já se procura examinar as formas sob as quais a energia solar será utilizada futuramente; a saber: a biomassa para fins energéticos, os aquecedores de água solares, as caldeiras solares e outros sistemas para a indústria, a eletricidade solar do tipo fotovoltaico ou termodinâmico. A importância que a energia solar assumirá através destas formas depende, evidentemente, de numerosos fatores difíceis de prever: a evolução geral da situação energética mundial, possibilidades de armazenagem e controle, reestruturação das necessidades energéticas no país (grau de sucesso das economias de energia, maior utilização da eletricidade), vontade política de desenvolvimento da energia solar e sucesso dos projetos empreendidos.

O uso comercial da energia solar ainda é extremamente inferior ao aproveitamento dos outros recursos energéticos convencionais. O principal uso comercial da energia solar, até mesmo em países altamente industrializados, consiste no aproveitamento dos efeitos térmicos da luz solar, com o objetivo de produzir o aquecimento de água, o aquecimento de residências, a secagem de produtos agrícolas, etc.

Para Medeiros (2000), mais do que em qualquer outro país do mundo, o Brasil utiliza preferencialmente a energia elétrica para o aquecimento de água o que significa dizer que mais de 6% de todo o consumo nacional são usados para alimentar chuveiros elétricos. A utilização de energia solar e eólica em residências parece o primeiro passo para a autonomia energética individual e para a formação de nova perspectiva energética em escala mundial, só a gerência na geração de energia pode mostrar o quanto é importante racionalizar o seu consumo.

Segundo Bezerra (2001), não existem limitações para o uso da energia solar, pois quando não pode ser usada diretamente, o é por via indireta. A energia tem contribuído bastante para reduzir o consumo energético das fontes convencionais, principalmente nas aplicações à baixa temperatura. Uma das aplicações mais difundidas em todo o mundo é sem dúvida o aquecimento de água domiciliar.

Tabela 2.1 – Consumo Final de Energia por Setor - %

SETOR	1970	1980	1990	1997	1998
INDÚSTRIA	30,2	39,8	38,8	37,3	37,0
DA QUAL ENERGO-INTENSIVA	17,3	22,7	23,1	21,9	21,9
TRANSPORTE	18,8	19,8	19,1	20,7	21,1
RESIDENCIAL	34,0	19,9	16,4	15,4	15,7
COMÉRCIO E SERVIÇOS	4,4	6,2	7,8	8,9	9,3
USO NÃO-ENERGÉTICO	2,1	4,3	5,7	5,5	5,6
SETOR ENERGÉTICO	2,8	5,2	7,8	7,7	7,1
OUTROS	7,7	4,8	4,5	4,5	4,2

Fonte: Balanço Energético Nacional (MME, 1998).

2.3.1 – Cenário Energético Brasileiro

O setor residencial responde por 24% do consumo total de energia elétrica no país e dentro deste setor, tem-se uma participação média de 26% do consumo total atribuído ao aquecimento de água (www.green.pucmg.br, 2003).

Portanto, conclui-se facilmente que apenas o aquecimento de água para banho em residências brasileiras é responsável por mais de 6.0% de todo o consumo nacional de energia elétrica. A Fig. 2.1 apresenta a distribuição da energia elétrica no setor residencial brasileiro (www.green.pucmg.br, 2003).

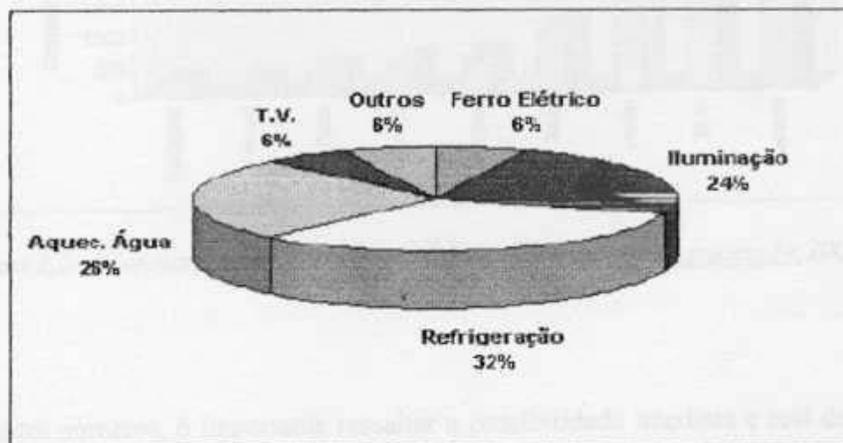


Figura 2.1 – Consumo Residencial de Energia Elétrica por Uso Final (www.green.pucmg.br, 2003)

Ainda assim, o Brasil possui um baixo consumo elétrico residencial por habitante quando comparado a outros países, conforme a Fig. 2.2. Este baixo consumo, que já vem se elevando, crescerá rapidamente a partir da melhoria da condição social e econômica no país.

Nos últimos dois anos o setor de maior crescimento de consumo de energia elétrica foi justamente o setor residencial. Por exemplo, de maio de 1995 à maio de 1996, o setor residencial cresceu 12,9% em consumo, o setor comercial 10,8 % enquanto que o industrial teve queda de 1,9 % no mesmo período.

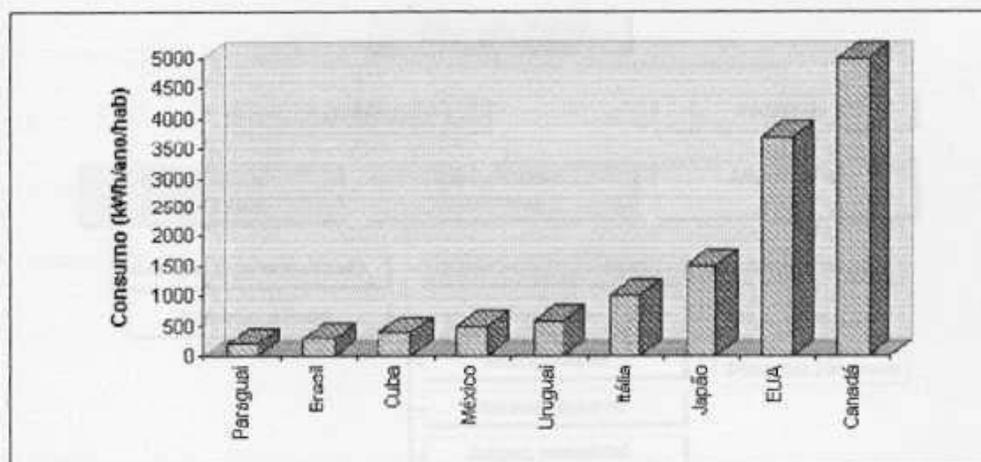


Figura 2.2 – Consumo Residencial por Habitante (www.green.pucmg.br, 2003).

Destes números, é importante ressaltar a possibilidade imediata e real de redução da participação da iluminação e refrigeração, através da instalação de equipamentos mais eficientes, conforme programas já iniciados. Do ponto de vista do aquecimento de água, entretanto, a situação é mais complexa. A forma absolutamente predominante de aquecimento de água no Brasil é o chuveiro elétrico (www.green.pucmg.br, 2003).

Conforme ilustra a Fig 2.3, o potencial brasileiro de conservação de energia no aquecimento de água é bastante significativo, apontando para a aplicação em larga escala os aquecedores solares como uma saída extremamente viável e competitiva (www.green.pucmg.br, 2003).

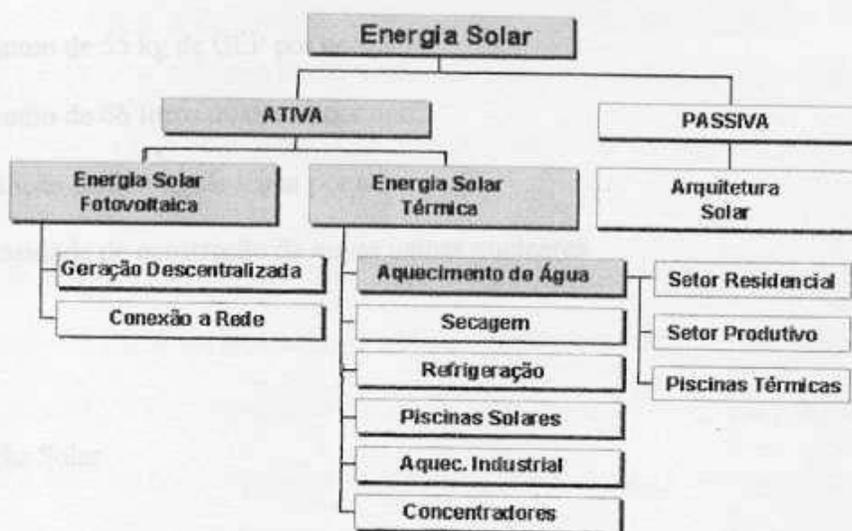


Figura 2.3 – Potencial de Conservação da Energia Solar Brasileira (www.green.pucmg.br, 2003).

2.4 – Energia Solar

A energia solar é a fonte de energia mais antiga disponível na terra. Trata-se de uma fonte não poluente e praticamente inesgotável. Estima-se em alguns bilhões de anos o tempo necessário para o esgotamento da energia solar. (LUIZ, 1985).

Segundo a ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento, utilizando a energia solar para aquecimento de água, sendo uma energia limpa, natural, segura e gratuita, consegue-se com cada metro quadrado evitar:

- A inundação de 56 m² de áreas férteis na construção de novas usinas hidrelétricas;
- O consumo de 55 kg de GLP por ano;
- O consumo de 66 litros de diesel por ano;
- A utilização de 215 kg de lenha por ano;
- A necessidade de construção de novas usinas nucleares.

2.4. – Radiação Solar

Além das condições atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar etc.), a disponibilidade de radiação solar, também denominada energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano). Isso devido à inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente (movimento de rotação) e a trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol (translação ou revolução), como ilustrado na Fig. 2.4.

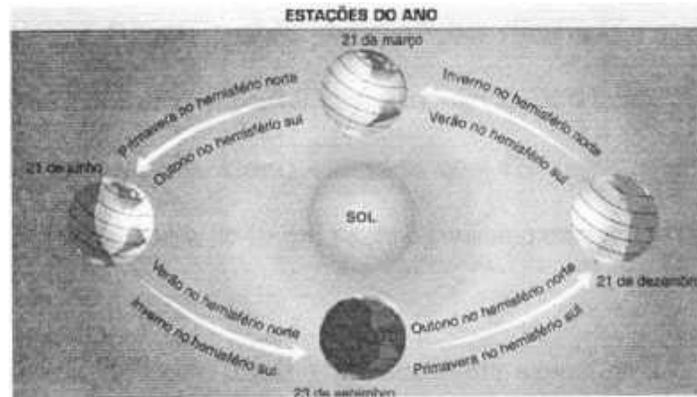


Figura 2.4 – Representação das estações do ano e do movimento da Terra em torno do Sol (INMET – LABSOLAR, 1998).

Desse modo, a duração solar do dia “período de visibilidade do Sol ou de claridade” varia, em algumas regiões e períodos do ano, de zero hora (Sol abaixo da linha do horizonte durante o dia todo) a 24 horas (Sol sempre acima da linha do horizonte). As variações são mais intensas nas regiões polares e nos períodos de solstício. O inverso ocorre próximo à linha do Equador e durante os equinócios, quando a duração solar do dia é igual à duração da noite em toda a Terra. (INMET – LABSOLAR, 1998).

A maior parte do território brasileiro está localizada relativamente próxima da linha do Equador, de forma que não se observam grandes variações na duração solar do dia.

Para maximizar o aproveitamento da radiação solar, pode-se ajustar a posição do coletor ou painel solar de acordo com a latitude local e o período do ano em que se requer mais energia. No Hemisfério Sul, por exemplo, um sistema de captação solar fixo deve ser orientado para o norte, com ângulo de inclinação similar ao da latitude local. (INMET – LABSOLAR, 1998).

A radiação solar depende também das condições climáticas e atmosféricas. Somente parte da radiação solar atinge a superfície terrestre, devido a reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. Mesmo assim, estima-se que a energia solar incidente sobre a superfície terrestre seja da ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial (CRESESB, 1999).

O Atlas Solarimétrico do Brasil – publicado em agosto de 1997 – apresenta uma estimativa da radiação solar incidente no país, através da interpolação e extrapolação de dados obtidos em estações solarimétricas distribuídas em vários pontos do território nacional como apresentado na Fig. 2.5.

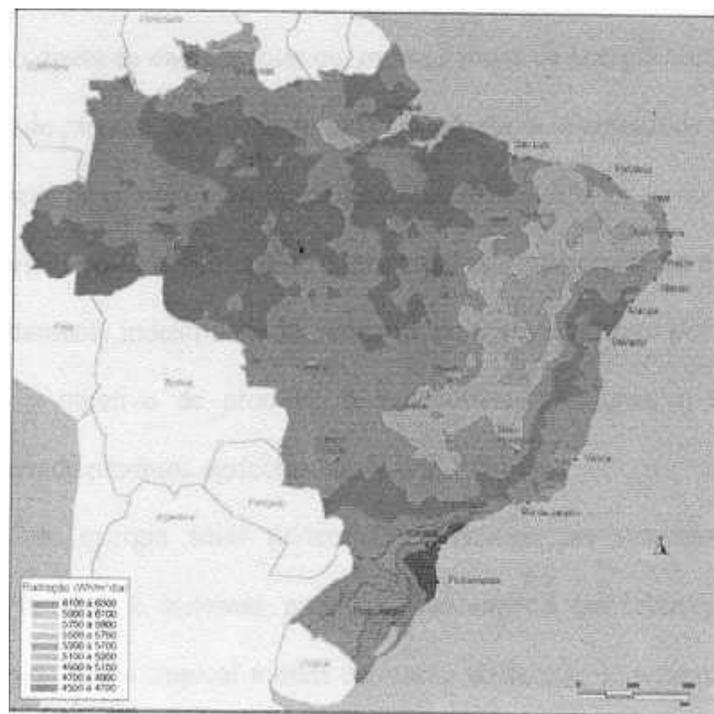


Figura 2.5 – Radiação solar no Brasil - média anual típica ($\text{Wh/m}^2.\text{dia}$) (INMET LABSOLAR, 1998).

2.4.2 – Aproveitamento da Energia Solar

Segundo LUIZ, (1985) “os efeitos térmicos da energia solar são aproveitados desde épocas imemoriais, existem até alguns relatos curiosos, como a história de Arquimedes que teria incendiado as velas dos barcos romanos concentrando a luz solar refletida pelos escudos de milhares de soldados. Lavoisier realizou suas experiências sobre conservação da massa utilizando lentes convergentes para queimar as amostras mediante a concentração dos raios solares. No início do Século XIX Stirling e Ericsson inventaram máquinas térmicas que usavam a energia solar”.

A energia solar pode ser usada diretamente ou indiretamente, em diversas formas de energia. A conversão direta da energia solar em outras formas de energia abrange os seguintes processos: produção de pressão, produção de calor, produção de eletricidade etc.

O uso comercial da energia solar ainda é extremamente inferior ao aproveitamento dos outros recursos energéticos convencionais. O principal uso comercial da energia solar, até mesmo em países altamente industrializados, consiste no aproveitamento dos efeitos térmicos da luz solar, com o objetivo de produzir o aquecimento de água, o aquecimento de residências, a secagem de produtos agrícolas etc. (LUIZ., 1985).

Os sistemas de energia solar podem ser divididos em sistemas ativos (fluido impulsionado com bomba) e sistemas passivos (escoamento por convecção natural no circuito). Nos países de clima tropical é mais comum a utilização de sistemas operando por termossifão (sistema passivo) (PALZ, 1981).

2.4.3 Tecnologias de Aproveitamento

2.4.3.1 – Aproveitamentos Térmicos

A radiação solar pode ser absorvida por coletores solares, principalmente para aquecimento de água a temperaturas relativamente baixas (inferiores a 100 °C). O uso dessa tecnologia ocorre predominantemente no setor residencial, mas há demanda e aplicações significativas em outros setores, como edifícios públicos e comerciais, hospitais, restaurantes, hotéis e similares.

Esse sistema de aproveitamento térmico da energia solar, também denominado aquecimento solar ativo, envolve o uso de um coletor solar. O coletor é instalado normalmente no telhado das residências e edificações. Devido à baixa densidade da energia solar que incide sobre a superfície terrestre, o atendimento de uma única residência pode requerer a instalação de vários metros quadrados de coletores.

2.4.3.2 – Conversão Direta da Radiação Solar em Energia Elétrica

Além dos processos térmicos descritos acima, a radiação solar pode ser diretamente convertida em energia elétrica, por meio de efeitos da radiação (calor e luz) sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. Entre esses, destacam-se os efeitos termoelétrico e fotovoltaico.

O primeiro se caracteriza pelo surgimento de uma força eletromotriz, provocada pela junção de dois metais, quando tal junção está a uma temperatura mais elevada do que as outras extremidades dos fios. Embora muito empregado na construção de medidores de temperatura, seu uso comercial para a geração de eletricidade tem sido impossibilitado pelos baixos rendimentos obtidos e pelos custos elevados dos materiais.

2.4.3.3 – Projetos de Aproveitamento da Energia Solar no Brasil

Recentemente, grandes esforços têm sido direcionados ao aproveitamento da energia solar no Brasil, particularmente por meio de sistemas fotovoltaicos de geração de eletricidade, visando ao atendimento de comunidades isoladas da rede de energia elétrica e ao desenvolvimento regional. Devidamente contemplados pela nova ótica da política energética nacional, esses projetos têm levado eletricidade a milhares de comunidades e domicílios brasileiros.

Também a área de aproveitamento da energia solar para aquecimento de água tem adquirido importância nas regiões Sul e Sudeste do País, onde uma parcela expressiva do consumo de energia elétrica é destinada a esse fim, principalmente no setor residencial.

24.3.4-- Aquecimento de Água

Segundo informações da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA, 2000), existiam até recentemente cerca de 250.000 coletores solares residenciais instalados no Brasil, o que correspondia a somente 0,6% dos cerca de 40 milhões de domicílios brasileiros. Somente com aquecimento doméstico de água para banho, são gastos anualmente cerca de 20 bilhões de kWh de energia elétrica, os quais poderiam ser supridos com energia solar, com enormes vantagens socioeconômicas e ambientais. Mais grave ainda é o fato de que quase toda essa energia deve ser gerada em poucas horas do dia (basicamente entre 18 e 20h), o que significa sobrecarga no sistema.

Estudos revelam que, entre 18 e 19h, cerca de 50% dos aparelhos são usados simultaneamente (FERRARI, 1996). Tomando-se como referência uma potência média de 3 kW por aparelho, uma duração média de 10 minutos por banho e um índice de posse de 0,69 aparelho por domicílio, estima-se que o chuveirô elétrico contribui com 12,8% da demanda máxima do sistema elétrico brasileiro; o que corresponde a aproximadamente 6.800 MW de potência instalada.

Além disso, há uma enorme demanda em prédios públicos e comerciais (escolas, hotéis, motéis, restaurantes, hospitais etc.), que pode ser devidamente atendida por sistemas de aquecimento solar central.

Um dos principais entraves à difusão da tecnologia de aquecimento solar de água é o custo de aquisição dos equipamentos, particularmente para residências de baixa renda. Segundo a ABRAVA, o preço de um coletor solar adequado a uma residência de baixa renda

custa atualmente cerca de R\$ 550,00 ao passo que o preço de um chuveiro elétrico convencional é da ordem de R\$ 15,00. Para as concessionárias, porém, estima-se um custo cerca de 100 vezes maior (ABRAVA, 2000).

Contudo, a conjuntura atual do setor elétrico brasileiro indica cenários futuros muito mais favoráveis ao uso da energia solar para aquecimento de água no País. Entre os principais elementos propulsores dessa tecnologia, destaca-se a criação e a regulamentação da Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Outro fato importante tem sido a criação de linhas de crédito para aquisição e instalação de coletores solares.

Embora pouco significativos diante do grande potencial existente, já existem vários projetos de aproveitamento da radiação solar para aquecimento de água no País, tanto para fins comerciais (hotéis, restaurantes, hospitais etc.) como residenciais.

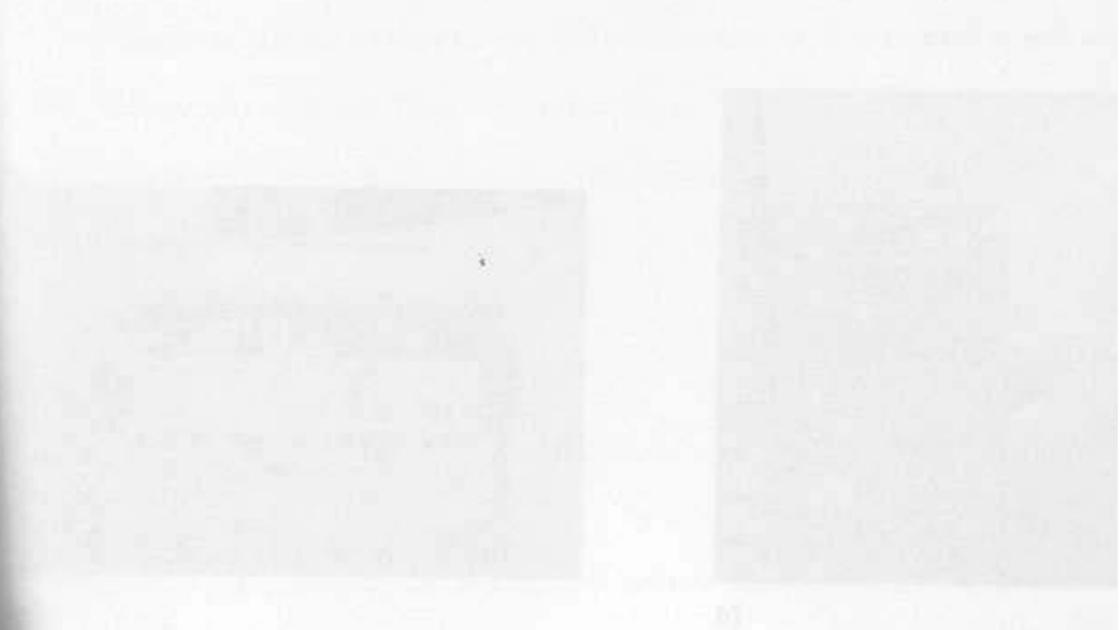
2.4.3.5 – Sistemas Fotovoltaicos

Existe uma infinidade de pequenos projetos nacionais de geração fotovoltaica de energia elétrica, principalmente para o suprimento de eletricidade em comunidades rurais e (ou) isoladas do Norte e Nordeste do Brasil. Esses projetos, de cunho essencialmente social, dividem-se basicamente em três categorias: i) bombeamento de água, para abastecimento doméstico, irrigação e piscicultura; ii) iluminação pública; e iii) sistemas energéticos coletivos – eletrificação de escolas, postos de saúde e telefônicos e centros comunitários.

3 - METODOLOGIA

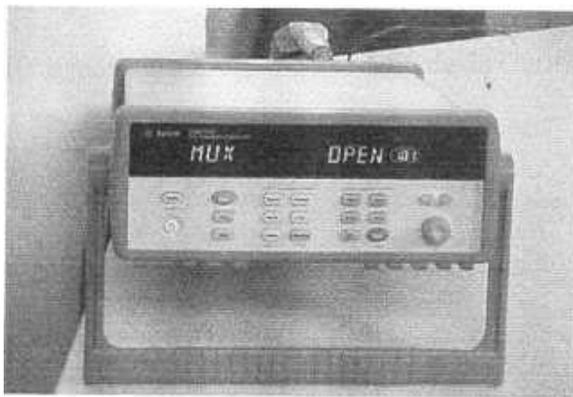
O planejamento e a coordenação da grande maioria desses projetos são de responsabilidade do Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios – Prodeem, instituído pelo Governo Federal, em dezembro de 1994, no âmbito da Secretaria de Energia, do Ministério de Minas e Energia – MME.

Este trabalho foi realizado em conjunto com o Grupo de Estudos e Pesquisas em Energia Elétrica (GEP) do Departamento de Engenharia de Energia e Power Systems da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). O trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do Projeto de Pesquisa em Energia Elétrica (PPEE) do Departamento de Engenharia de Energia e Power Systems da UFMG. Este trabalho foi baseado no trabalho de [1].



3 – METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado na Pontifícia Universidade Católica do Paraná – Campus Curitiba, a uma latitude de 25,4° Sul, com altitude média de 917 metros acima do nível do mar. O experimento foi montado no terraço do Bloco 2 do Parque Tecnológico, onde foram instaladas duas bancadas de ensaios, sendo uma delas considerada como referência, possuindo um coletor solar plano interligado a um reservatório térmico, sendo o reservatório alimentado por uma caixa d' água, completando assim o sistema por circulação natural de água através de forças de empuxo. Todo esse aparato foi conectado a um sistema de aquisição de dados *Agilent 34970 A*, Fig 3.1.



a)



b)

Figura 3.1 – Sistema de aquisição de dados (a) e microcomputador com programa instalado para leitura, e gravação (b).

3. – Materiais e Métodos

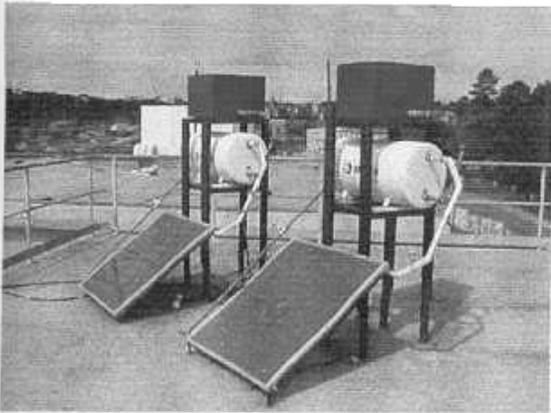
A metodologia utilizada na análise de sistemas geradores de água quente através da energia solar é baseada na medição e análise de temperatura de entrada de água fria e saída de água quente dos coletores solares e reservatórios térmicos. Empregou-se uma análise experimental ao variar tanto o material de cobertura do coletor como seu isolamento térmico.

Para a cobertura de superfície, utilizou-se vidro comercial pontilhado, vidro comercial liso e chapa alveolar Termoclear de policarbonato, sendo todas as coberturas de superfícies com espessuras de 4,0 mm. Além disso, analisou-se também a performance do coletor solar na ausência de cobertura de superfície.

Realizaram-se também ensaios simultâneos para extração do fluxo de calor através da superfície inferior dos coletores. Para isto, utilizaram-se isolantes térmicos como a lã de vidro, o poliuretano e a serragem. Os coletores foram orientados para o Norte com inclinação de 10° a mais da correspondente latitude de Curitiba.

3.2 – Montagem do Experimento

Cada sistema foi composto de uma caixa d' água de 50 litros, um reservatório com isolamento térmico com volume de armazenamento de 50 litros e um coletor solar de 1,0 m² em diferentes níveis, formando o sistema por circulação natural (termossifão) (Figs. 3 e 3.2).



a)



b)

Figura 3.2. – Vistas Isométrica (a) e Frontal (b) do Sistema de Aquecimento Solar

Os componentes do sistema de aquecimento solar estão dispostos na seguinte ordem:

Por primeiro e em nível superior uma caixa d' água, abaixo um reservatório térmico, e em nível inferior a caixa d' água e o reservatório um coletor solar, estes interligados entre si.

As interligações das tubulações seguem a mesma ordem: a caixa d' água alimenta o reservatório térmico, sendo este interligado pela parte inferior e superior do coletor solar, facilitando desta forma a circulação natural de água quente pelo sistema. O reservatório térmico possui um ponto para consumo d' água quente e respiro.

Foram fixados termopares e fluxímetros de calor ao sistema ilustrado na Figura 3.4, permitindo o monitoramento e armazenagem de dados através do sistema de aquisição *Agilent 34970A*.

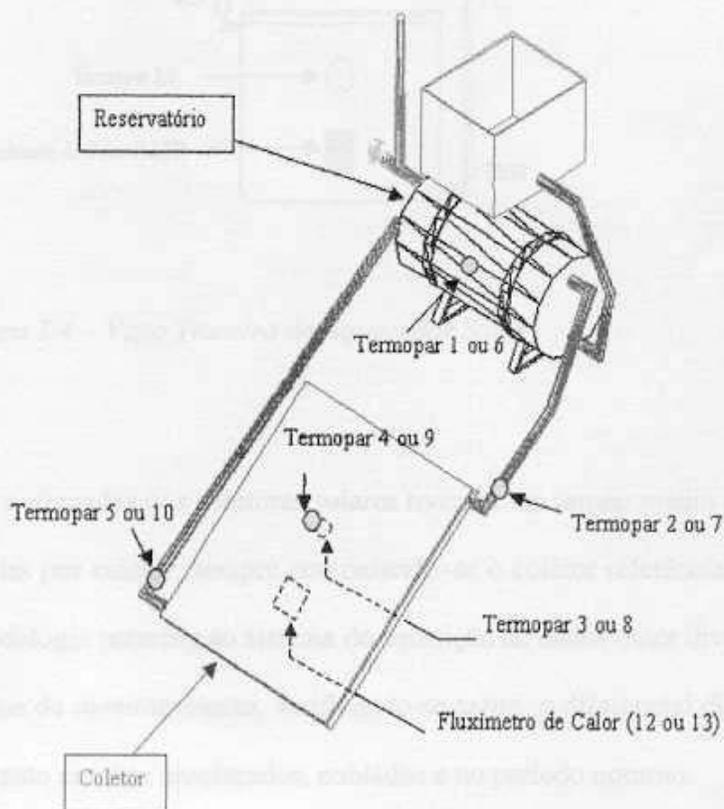


Figura 3.3 – Representação esquemática com Posicionamento dos Termopares e Fluxímetros de calor.

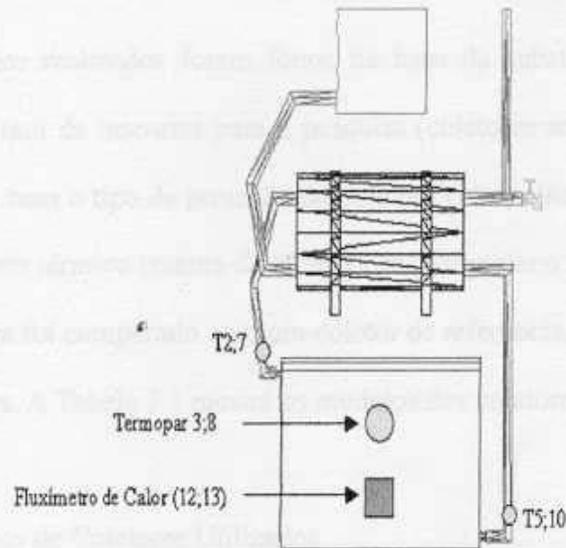


Figura 3.4 – Vista Traseira do Aquecedor Solar

As medições efetuadas nos coletores solares tiveram um tempo médio aproximado de aquisição de três dias por coletor, sempre comparando-se o coletor referência com o coletor amostra. Esta metodologia permitiu ao sistema de aquisição de dados obter diversas variações nos diferentes pontos de monitoramento, verificando-se assim, o diferencial de temperatura e as perdas de calor tanto em dias ensolarados, nublados e no período noturno.

3.3 – Tomada de Dados

Os ensaios realizados foram feitos na base da substituição de diferentes tipos de coletores que foram de interesse para a pesquisa (coletores amostra). A diferença entre eles está relacionada com o tipo de proteção do coletor (vidro, plástico ou sem cobertura etc.) e o tipo de isolamento térmico (manta de lã de vidro, poliuretano ou serragem). Cada um desses coletores amostra foi comparado com um coletor de referência, fixo, de material e isolamento pré-determinados. A Tabela 3.1 mostra os modelos dos coletores utilizados nos ensaios.

Tabela 3.1 – Tipos de Coletores Utilizados

Tipo de Coletor	Material de Cobertura Utilizado	Tipo de Isolamento
Referência – Ref	Vidro Pontilhado	Manta de Lã de Vidro
Amostra – A1	Plástico	Manta de Lã de Vidro
Amostra – A2	Sem Cobertura	Manta de Lã de Vidro
Amostra – A3	Vidro Liso	Manta de Lã de Vidro
Amostra – A4	Vidro Liso	Poliuretano
Amostra – A5	Vidro Pontilhado	Poliuretano
Amostra – A6	Vidro Liso	Serragem
Amostra – A7	Vidro Pontilhado	Serragem

Em cada ciclo de leitura do sistema de aquisição, obteve-se valores de temperatura interna do reservatório térmico, entrada de água fria e saída de água quente do coletor, temperatura na parte frontal e traseira do coletor, temperatura externa ou ambiente e fluxo de calor.

A tomada de dados compreendeu a elaboração de uma planilha para cada coletor solar com uma duração média de 72 horas, contendo as variáveis necessárias à análise dos diferentes modelos de sistema de aquecimento de água solar.

3.4 – Sensores Utilizados

3.4.1 Fluxímetro de Calor

A medição do fluxo de calor é baseada na lei de Fourier, relacionando a densidade de fluxo de calor \dot{q} que atravessa um corpo (chamado parede auxiliar) com a diferença de temperatura (ΔT), entre as faces conforme a Fig. 3.5. (S. Güths*, P.C. Philippi* E. Gaviot* e P. Thery* - 1994

$$\dot{q} = k \frac{\Delta T}{L}$$

onde k é a condutividade térmica e L a espessura da parede auxiliar.

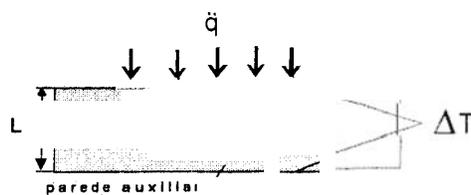


Figura 3.5 – Princípio de medição do fluxo de calor (S. Güths* P.C. Philippi*, E. Gaviot** e P. Thery** - 1994).

3.4.2 – Sistema de Aquisição

O sistema de aquisição de dados *Agilent 34970 A* possui uma Unidade Multiplexadora de 20 canais (34901A) com compensação automática de temperatura. Os erros de medição são facilmente obtidos no catálogo de especificação deste produto.

A este equipamento são conectados os diversos transdutores e o equipamento realiza uma leitura seqüencial dos diferentes canais num passo de tempo de milisegundos, estes valores então são armazenados num computador PC que apresenta em tempo real as leituras no monitor, através do programa BenchLink.

3.4.3 – Termopares

Consiste de dois condutores metálicos, de natureza distintas, na forma de metais puros ou ligas homogêneas. Os fios são soldados em um extremo ao qual se dá o nome de junta quente ou junta de medição. A outra extremidade dos fios é levado ao instrumento de medição, fechando o circuito elétrico por onde flui a corrente. O ponto onde os fios que formam o termopar se conectam ao instrumento de medição é chamado de junta fria ou de referência.

3.4.3.1 – Termopar Tipo T

- Elemento Positivo – Cobre
- Elemento Negativo – Constantan
- Faixa de Utilização - -184 a 370 °C
- Vantagens: Resiste a atmosferas corrosivas; aplicável em atmosferas redutoras ou oxidantes abaixo de 0°C; útil abaixo de 0 °C devido à estabilidade e precisão.
- Desvantagens: Oxidação do cobre acima de 310 °C.

Limite de Erro: Padrão: $\pm 1,0$ °C ou $\pm 0,75$ %

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Influência do Material de Cobertura

Nesta seção, apresentam-se resultados em termos de diferença de temperatura para os reservatórios térmicos e coletores listados na Tabela 3.1, representados pelas Figs. 4.1 a 4.14, i.e., alternando-se o material utilizado para cobertura (vidro liso, vidro pontilhado, plástico ou sem cobertura) e o material utilizado como isolante térmico (manta de lã, poliuretano e serragem).

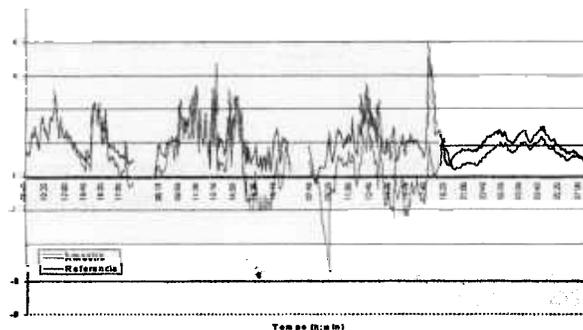


Figura 4.1 – Comparação em termos de diferença de temperatura para coletores com cobertura de plástico (A1) e cobertura em vidro pontilhado (Referência), ambos com manta de lã de vidro como isolante térmico.

A Figura 4.1 mostra claramente que a cobertura com plástico (A1) apresentou-se mais termicamente eficiente que a cobertura com vidro pontilhado (Referência). Através da média da diferença de temperatura, a cobertura plástica se apresentou superior a de vidro em $1,2^{\circ}\text{C}$ para o período analisado tal como mostrado na Fig. 4.1.

Os parâmetros favoráveis a esse resultado devem-se possivelmente tanto à alta transmissividade do plástico empregado como à sua baixa condutância térmica em relação ao vidro utilizado.

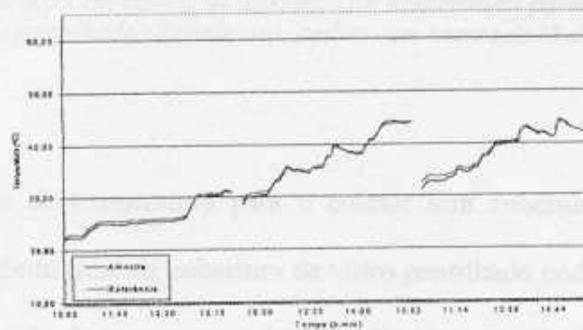


Figura 4.2 – Comparação em termos de diferença de temperatura dos reservatórios térmicos, ambos com isolamento térmico em lã de vidro.

A Fig. 4.2 mostra a diferença de temperatura interna dos reservatórios térmicos, explicitando que a temperatura da água do reservatório A1 é equivalente em relação ao reservatório de referência, demonstrando um aumento gradual ao decorrer do tempo, devido a sua alta capacidade térmica. A média obtida da temperatura do reservatório amostra é de 34,0 °C, sendo inferior em relação à referência em 0,2 °C.

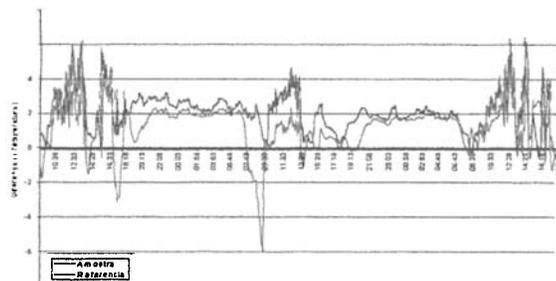


Figura 4.3 – Comparação em termos de diferença de temperatura para coletores sem cobertura (A2) e cobertura em vidro pontilhado (Referência), ambos com manta de lã de vidro como isolante térmico.

A diferença de temperatura para o coletor sem cobertura é ilustrada na Fig. 4.3, mostrando que o efeito final da cobertura de vidro pontilhado pode ser a redução dos ganhos térmicos para elevação da temperatura da água. O vidro pontilhado contribui com os aportes térmicos por prover o efeito estufa e por reduzir as perdas convectivas. No entanto, a sua presença reduz a quantidade da energia solar direta absorvida pela placa aletada do coletor. Dessa forma, entende-se que esse vidro mostra-se como um material que não possui a transmissividade adequada para ser empregado no tipo de coletor analisado neste trabalho. Para o coletor sem cobertura, conseguiu-se uma média, em termos de diferença de temperatura entre a entrada e a saída do coletor, de $1,2^{\circ}\text{C}$ acima da obtida para o vidro pontilhado.

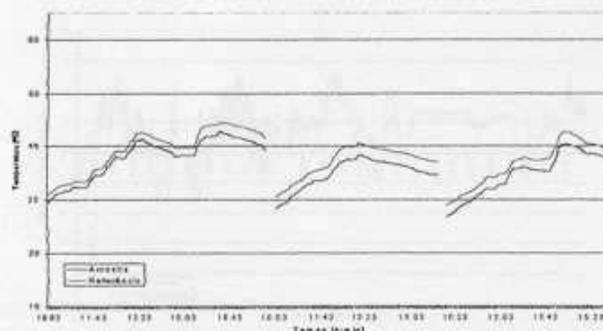


Figura 4.4 – Comparação em termos de diferença de temperatura dos reservatórios térmicos, ambos com isolamento térmico em lâ de vidro.

A diferença de temperatura para o vidro com 1000 mm (A2) é ilustrada na Fig. 4.4. A Fig. 4.4 mostra que a temperatura interna do reservatório térmico A2 é inferior ao reservatório térmico de Referência. Esse resultado é devido à elevada absorvidade dos raios solares e, conseqüentemente, a alta perda térmica, devido à falta de cobertura de superfície. A média da temperatura interna do reservatório térmico de Referência apresentou-se superior ao reservatório amostra em 2,0 °C.

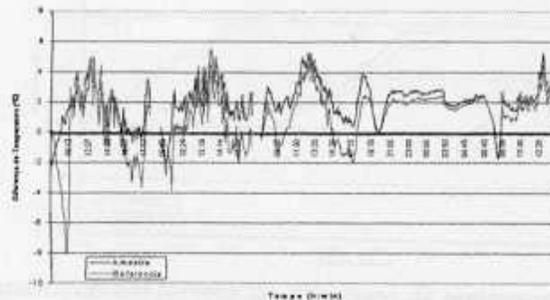


Figura 4.5 – Comparação em termos de diferença de temperatura para coletores com cobertura em vidro liso (A3) e cobertura em vidro pontilhado (Referência), ambos com manta de lã de vidro como isolante térmico.

A diferença de temperatura para o coletor com vidro liso (A3) é ilustrada na Fig. 4.5, verificando-se na média de temperatura que o efeito produzido pelo vidro liso é o aumento do ganho térmico em relação ao vidro pontilhado, sendo que o vidro pontilhado reduz os ganhos térmicos por radiação para elevação da temperatura da água. No coletor de referência, a perda por convecção foi maior do que o ganho por radiação solar, o que resulta em uma diferença negativa de temperatura. Isto pode ter ocorrido devido à presença de nuvens e/ou correntes de ar frio. Desta forma, entende-se que o vidro liso mostra-se como um material que possui uma transmissividade mais adequada em comparação com o vidro pontilhado, obtendo uma média de temperatura superior ao coletor de vidro pontilhado de $1,3^{\circ}\text{C}$.

A transmissividade dos vidros comerciais cai abruptamente para comprimentos de onda superiores a 2900 nm. Entretanto, nota-se uma redução expressiva da transmitância (de 0.9 a 0.78) quando o comprimento de onda vai de 600 a 400 nm, que ainda é uma faixa importante do espectro solar próximo à superfície da Terra.

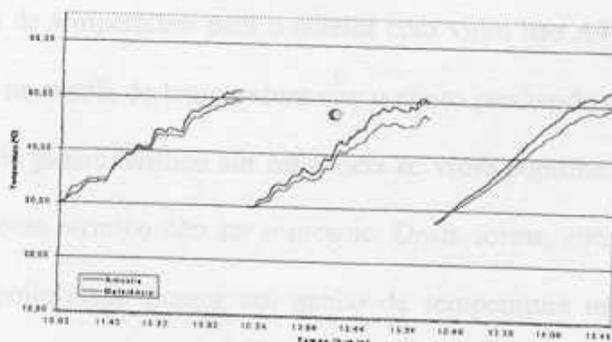


Figura 4.6 – Comparação em termos de diferença de temperatura dos reservatórios térmicos, ambos com isolamento térmico em lã de vidro.

A Fig. 4.6 comprova o aumento do ganho térmico do coletor solar com vidro liso A3 em relação ao coletor com vidro pontilhado (Referência), sendo que seu desempenho é comprovado pela temperatura interna do reservatório térmico, obtendo uma média de $1,8^{\circ}\text{C}$ em relação ao reservatório de referência.

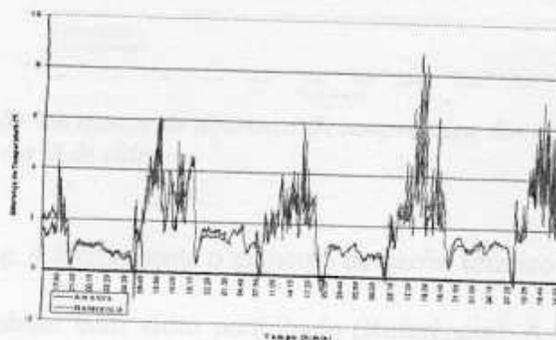


Figura 4.7 – Comparação em termos de diferença de temperatura para coletores com cobertura em vidro liso com poliuretano, (A4) e cobertura em vidro pontilhado (Referência), com manta de lã de vidro.

A diferença de temperatura para o coletor com vidro liso A4 é apresentada na Figura 4.7, verificando-se na média de temperatura que o efeito produzido pelo vidro liso foi de um pequeno aumento do ganho térmico em referência ao vidro pontilhado, sendo este devido ao material de isolamento térmico não ser o mesmo. Desta forma, entende-se que o vidro liso com isolante em poliuretano possui um ganho de temperatura maior do que com vidro pontilhado e manta de lã de vidro, obtendo-se desta forma uma média de temperatura de $0,4^{\circ}\text{C}$ superior ao coletor de referência, ou seja, o efeito térmico obtido com o vidro liso foi suficiente para superar a perda com a troca de isolamento térmico da manta de lã para o poliuretano.

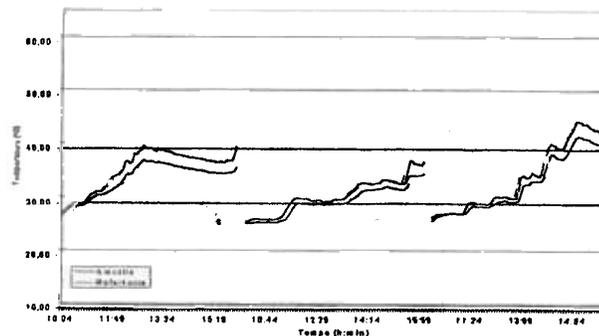


Figura 4.8 – Comparação em termos de diferença de temperatura dos reservatórios térmicos, ambos com isolamento térmico em lã de vidro.

O gráfico da Fig. 4.8 representa o aumento do ganho térmico do coletor com vidro liso (A4) em relação ao coletor com vidro pontilhado (Referência). A média de temperatura da amostra é de $1,10^{\circ}\text{C}$ superior em relação à referência, obtendo uma temperatura máxima no período de $45,2^{\circ}\text{C}$.

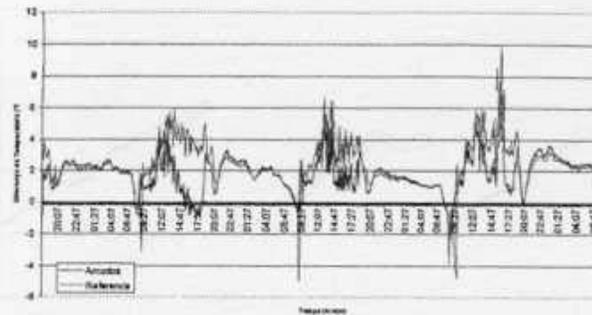


Figura 4.9 – Comparação em termos de diferença de temperatura para coletores com cobertura em vidro pontilhado e isolamento em poliuretano (A5) e cobertura em vidro pontilhado (Referência), com isolamento em manta de lã de vidro.

Nesta análise, pode-se observar que estão sendo empregados os mesmos materiais de cobertura de superfície (vidro pontilhado) e diferentes materiais para isolamento térmico (poliuretano e manta de lã de vidro) nos coletores solares, assim, a diferença de temperatura, observada na amostra 5, deve-se unicamente ao material empregado como isolante térmico no coletor, o que não o favoreceu no balanço de energia pois a condutividade térmica da manta de lã de vidro é 28% superior que a do poliuretano. A sua diferença de temperatura entre a saída e a entrada foi em média $0,9^{\circ}\text{C}$ inferior ao valor do coletor referência, neste último a média de temperatura obtida foi de $20,2^{\circ}\text{C}$.

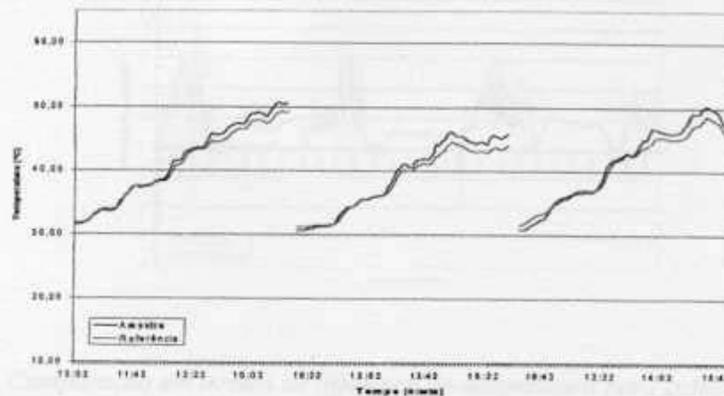


Figura 4.10 – Comparação em termos de diferença de temperatura dos reservatórios térmicos, ambos com isolamento térmico em lã de vidro.

A Fig. 4.10 mostra que a temperatura interna do reservatório térmico A5 apresenta-se relativamente superior ao reservatório de referência, sendo que os coletores possuem o mesmo material de cobertura e diferem-se apenas pelo isolamento térmico utilizado. A média da temperatura interna do reservatório amostra é de 30,7 °C, e a temperatura máxima é de 50,8°C, sendo a diferença de temperatura em relação ao reservatório referência de 0,4°C.

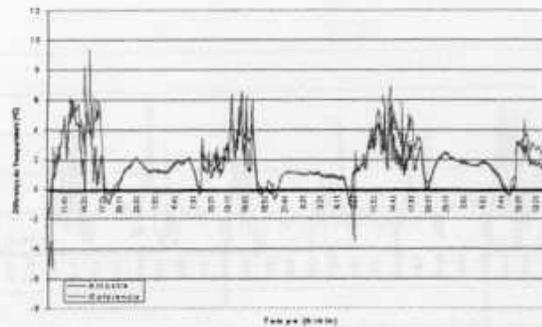


Figura 4.11 – Comparação em termos de diferença de temperatura para coletores com cobertura em vidro liso e isolamento térmico em serragem (A6) e cobertura em vidro pontilhado e isolamento em lã de vidro (Referência).

Neste caso, com a adição de serragem, o coletor A6 não obteve um ganho de temperatura em relação à referência, sendo a diferença da média de temperatura inferior em $0,40^{\circ}\text{C}$, e a média de temperatura obtida pelo coletor amostra foi de $25,60^{\circ}\text{C}$.

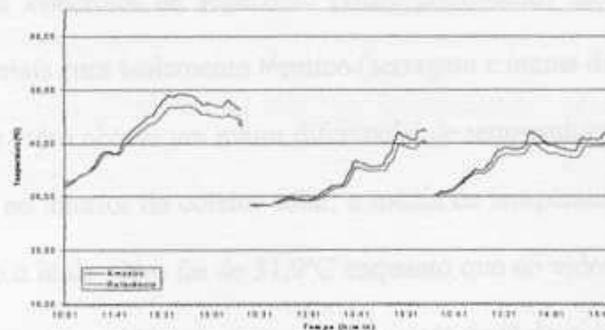


Figura 4.12 – Comparação em termos de diferença de temperatura dos reservatórios térmicos, ambos com isolamento térmico em lã de vidro.

Na fig. 4.12, a temperatura máxima obtida pelo reservatório amostra foi de $49,2^{\circ}\text{C}$, enquanto que, no reservatório de referência, a temperatura atingiu o máximo de $47,3^{\circ}\text{C}$, a diferença nas media de temperatura foi relativamente baixa, sendo na faixa de $0,60^{\circ}\text{C}$.

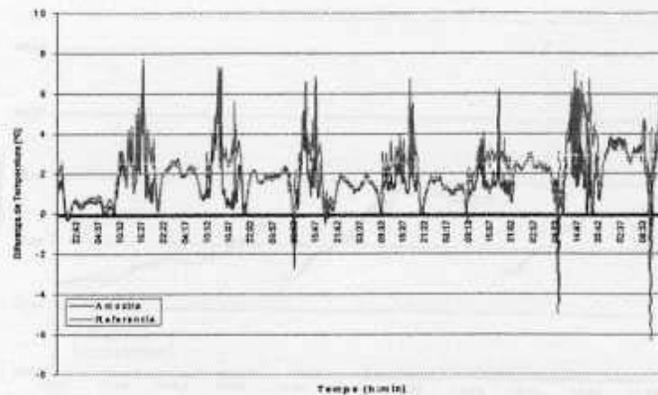


Figura 4.13 – Comparação em termos de diferença de temperatura para coletores com cobertura em vidro pontilhado e isolamento térmico em serragem (A7) e coletores com cobertura em vidro pontilhado e isolamento em manta de lã (Referência).

Nesta análise, a fig. 4.13 compara em termos de diferença de temperatura para coletores com cobertura de vidro pontilhado e isolamento térmico em serragem e coletores com cobertura em vidro pontilhado e isolamento em manta de lã de vidro que os materiais empregados para cobertura de superfície (vidro pontilhado) são os mesmos e diferem-se apenas nos materiais para isolamento térmico (serragem e manta de lã). Pode-se observar que a manta de lã de vidro obteve um maior diferencial de temperatura, favorecendo na formação do efeito estufa no interior do coletor solar; a média de temperatura obtida pelo coletor com vidro pontilhado e lã de vidro foi de $31,9^{\circ}\text{C}$ enquanto que no vidro pontilhado e serragem foi de $31,3^{\circ}\text{C}$, ou seja, em média o isolamento em manta de lã de vidro beneficiou a elevação de temperatura em 1,91%, o que é considerado um ganho pequeno em relação aos custos entre esses dois materiais.

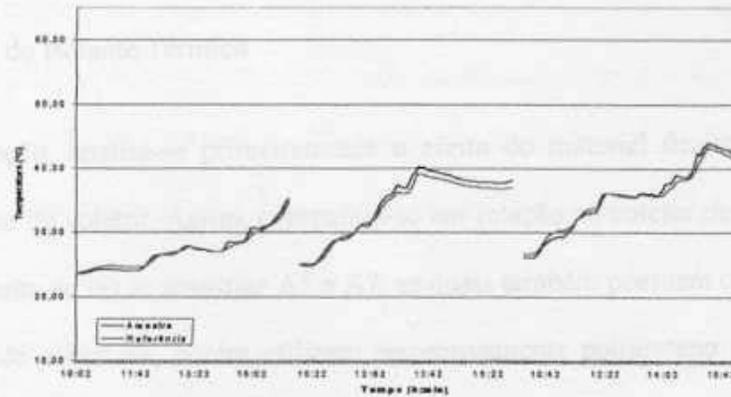


Figura 4.14 – Comparação em termos de diferença de temperatura dos reservatórios térmicos, ambos com isolamento térmico em lã de vidro.

Nesta análise, os reservatórios térmicos possuem o mesmo comportamento da amostra 6, sendo menores as temperaturas máximas obtidas nos reservatórios térmicos. A média das temperaturas no reservatório amostra foi de $32,4^{\circ}\text{C}$, sendo sua diferença para o reservatório de referência de $0,26^{\circ}\text{C}$.

No resultado apresentado na Fig. 4.14, a temperatura do reservatório térmico amostra, mostra-se novamente superior ao reservatório de referência, sendo a média de temperatura obtida de $0,26^{\circ}\text{C}$ superior.

4.2 – Influência do Isolante Térmico

Nesta seção, analisa-se primeiramente o efeito do material de isolamento térmico instalado na base do coletor. Assim, comparam-se em relação ao coletor de referência (vidro pontilhado e manta de lã) as amostras A5 e A7, as quais também possuem o vidro pontilhado como material de cobertura, porém utilizam respectivamente poliuretano e serragem como isolantes térmicos.

As Figs. 4.15 e 4.17 apresentam valores medidos de fluxo de calor ao longo do tempo e, como esperado, a manta de lã mostrou-se superior. Por outro lado a serragem demonstrou o pior efeito de isolamento. Porém, como mostrado na Fig 4.13, esse efeito não é significativo no balanço de energia do coletor, pois a perda de calor pela base ainda é baixa, propiciando um aquecimento de água significativo.

Em média, a perda térmica através da base do coletor referência foi de 75,4% menor que através da base da Amostra 5 e 77,5% menor que através da base da Amostra 7.

Logicamente, esse fluxo de calor também é função do material de cobertura como mostrado na Fig. 4.15, quando comparou-se o coletor com cobertura de plástico (A1) com o de vidro pontilhado, ambos com manta de lã.

Na Figura 4.15, pode-se observar que a perda de calor na base do coletor com cobertura de plástico é inferior àquela do vidro pontilhado. A média do ganho de calor para o coletor referência foi de $18,4 \text{ W/m}^2$, enquanto para a A1 foi de $7,7 \text{ W/m}^2$.

A perda máxima de calor para a referência foi de $9,8 \text{ W/m}^2$, e para a A1 de $3,4 \text{ W/m}^2$. Este aumento no fluxo de calor é decorrente do aumento da diferença de temperatura utilizando-se o coletor com vidro pontilhado, o qual pode ser explicado pelo aumento de temperatura na superfície de absorção. Este aumento de temperatura pode ter ocorrido pela redução da perda de radiação de onda longa através da superfície do vidro pontilhado.

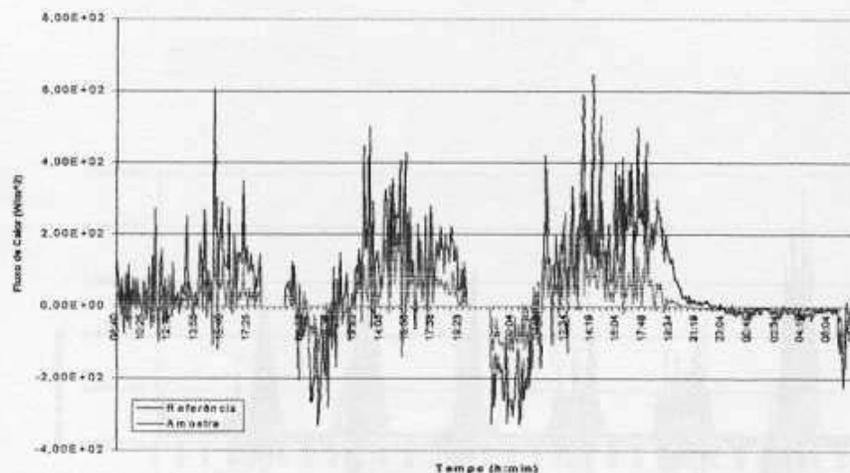


Figura 4.15 – Comparação em termos de fluxo de calor para os coletores com cobertura de plástico (A1) e em vidro pontilhado (Referência).

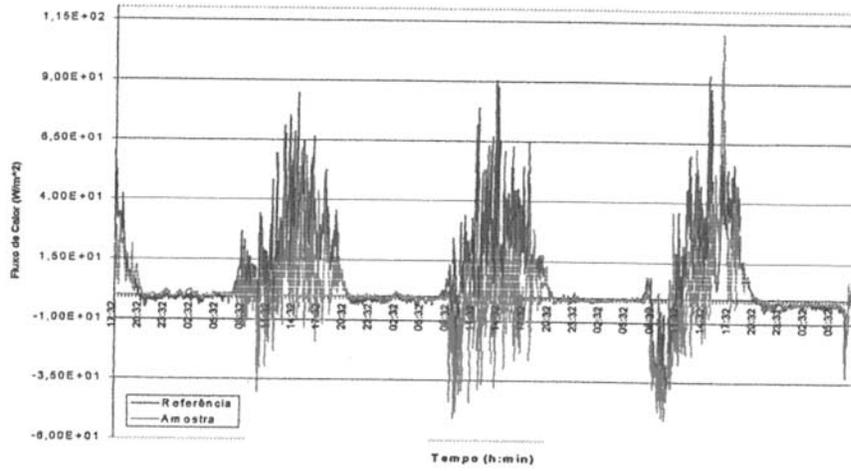


Figura 4.16 – Comparação em termos de fluxo de calor para coletor com vidros pontilhado e isolante em poliuretano (A5) e coletor com vidro pontilhado e manta de lã (Referência).

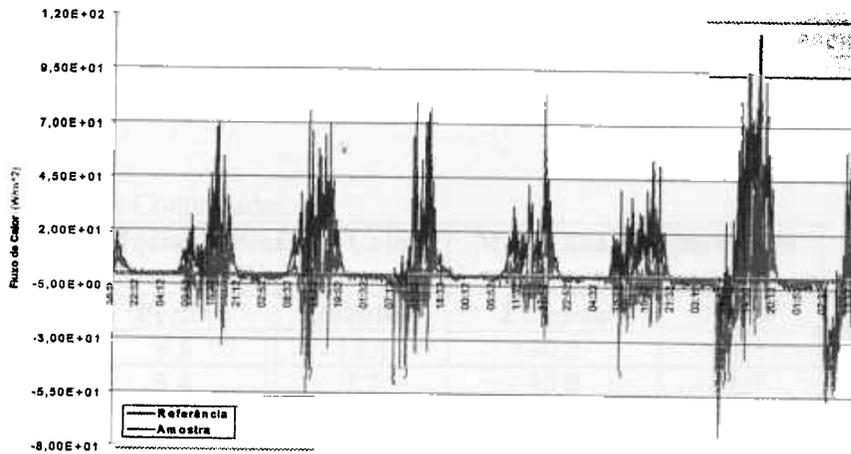


Figura 4.17 – Comparação em termos de fluxo de calor para coletor com vidro pontilhado e serragem (Amostra 07) e coletor com vidro pontilhado e manta de lã (Referência).

4.3 – Influência Combinada do Material de Cobertura e Isolamento Térmico.

Através dos resultados monitorados referentes às médias de temperatura de entrada de água fria, saída de água quente dos coletores solares e transferência de fluxo de calor, pode-se combinar os resultados, pretendendo desta forma obter um coletor solar com melhor comportamento térmico e menor custo, sendo designado neste caso como um coletor ótimo. As Tabelas 4. e 4.2 mostram os resultados obtidos e materiais empregados no monitoramento.

Tabela 4. – Materiais de Cobertura e Isolantes Térmicos

Referência	Vidro Pontilhado	Manta de Lã
Amostra – A1	Plástico	Manta de Lã
Amostra – A5	Vidro Pontilhado	Poliuretano
Amostra – A7	Vidro Pontilhado	Serragem

Tabela 4.2 – Resultados Combinados

Coletores	Média de Fluxo de Calor (W/m ²)		Média das Temperaturas (°C)		ΔT (°C)
	Perda	Ganho	Entrada	Saída	
Referência	9,8	18,4	30,2	31,8	1,5
Amostra – 01	3,4	7,7	30,0	32,7	2,6
Amostra – 05	6,0	9,9	18,6	19,7	1,1
Amostra – 07	6,5	5,4	28,7	31,3	2,5

Através da análise combinada dos materiais empregados no monitoramento dos coletores solares, pode-se verificar que o coletor com superfície plástica obteve um maior ganho de temperatura entre a entrada de água fria e saída de água quente de 2,6 °C, isto

devido à alta transmissividade do material plástico empregado, em relação ao fluxo de calor entre a superfície e a parte traseira do coletor pode-se observar um melhor comportamento da Manta de lã, com um ganho médio de 8,5 W/m²

4.4 – Análise Econômica

Tabela 4.3 – Análise Combinada de Coletores Utilizados

Tipo de Coletor	Material de Cobertura	Isolamento Térmico	Custo Relativo %
Referência – Ref	Vidro Pontilhado	Manta de Lã	100
Coletor Ótimo	Plástico	Manta de lã	114,1
Amostra – A1	Plástico	Manta de Lã	114,1
Amostra – A2	Sem Cobertura	Manta de Lã	59,3
Amostra – A3	Vidro Liso	Manta de Lã	103
Amostra – A4	Vidro Liso	Poliuretano	105
Amostra – A5	Vidro Pontilhado	Poliuretano	101
Amostra – A6	Vidro Liso	Serragem	103
Amostra – A7	Vidro Pontilhado	Serragem	99,3

A Tab. 4.3 apresenta os custos de cada amostra em relação ao custo do coletor referência, notando-se a importância da cobertura na avaliação de custos do sistema como um todo. Deve-se também salientar as condições de durabilidade dos materiais selecionados para o coletor ótimo, tendo o termoplástico empregado na cobertura de superfície uma durabilidade superior a dez anos. Quanto à manta de lã de vidro, há dados de funcionamento de coletores com mais de vinte anos de uso sem avaria do material utilizado, podendo, assim, obter um coletor solar com bom aproveitamento térmico, com alta durabilidade, mas com custo superior ao do coletor referência

5 – CONCLUSÕES

De acordo com os resultados e as diversidades através dos experimentos, pode-se observar, do ponto de vista da eficiência térmica, que pode-se substituir o vidro pontilhado pelo plástico com aumento do rendimento de aquecimento de água e redução de custos com material. Desta forma, a manta de lã de vidro apresentou os melhores resultados, seguidos pelo poliuretano e serragem.

Em relação à cobertura de superfície utilizada, pode-se observar que o melhor material utilizado foi o termoplástico. Isto provavelmente tenha ocorrido pela natureza da matéria-prima empregada em sua composição, e também por apresentar um espaço de ar entre a superfície externa e interna da chapa, fazendo que não haja uma significativa perda por refração na incidência dos raios solares, caso que não ocorre no vidro liso, e no vidro pontilhado, este por apresentar ondulações em sua superfície, o que provoca divergência entre os raios solares.

Na análise de eficiência, observou-se também um bom rendimento térmico para o coletor sem cobertura ou ótimo, o que acarretaria uma redução ainda maior de custos (cerca de 40%) e permitiria a maior disseminação de seu uso para edificações populares. No entanto, a comparação pode ter sido beneficiada pela presença, no coletor utilizado como referência, de um vidro de baixa transmissividade para radiação de ondas eletromagnéticas de alta frequência (ultra-violeta).

Assim, como complemento a este trabalho, sugere-se a avaliação da transmissividade de coberturas em um espectro em frequência acima do correspondente à faixa do visível.

Adicionalmente, com o intuito de melhorar o procedimento experimental, sugere-se a utilização de medidores de vazão e de condições controladas tanto de temperatura externa como de radiação solar.

- Associação Brasileira de Engenharia de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Climatização (ABRACON). 2002. Disponível em: <http://www.abracon.org.br/>
- Agência Internacional de Energia (IEA). 1997. Energy Technology: In the 21st Century. <http://www.iaea.org/tecd/pubs/reports/energy.html>
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Banco de Informações de Geração - BIG/Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>
- Agência Nacional de Planos (ANP). Anuário Estatístico de Energia Brasileira de 1990 - 1999. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/>
- Acto, K. e outros. 2002. "Técnicas de Utilização de Diferentes Tipos de Ventiladores", Manuscrito 2002 - Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul", Porto Alegre, 2002.
- Bezerra, M.A. "Aplicações Técnicas de Energia Solar". Ed. Universidade, 2001.
- Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE). 1994. Disponível em: <http://www.cbее.gov.br/>
- Centro de Referência para Energia Solar - Editora de São Carlos (CENRESOL). 2000. Disponível em: <http://www.cenresol.org.br/>
- Evans, H. L. "Derivação de Curvas de Carga de Consumidores Residenciais, Indústria e Comércio de Diversidade de Carga de Carregamento de Transformadores de Distribuição". Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica USP, São Paulo, 1976.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento.

Agência Internacional de Energia (IEA). 1997. Energy Technologies for the 21st Century. Disponível em www.iea.org/techno/index.htm.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Banco de Informações de Geração – BIG. Disponível em www.aneel.gov.br.

Agência Nacional do Petróleo (ANP). Anuário Estatístico da Indústria Brasileira do Petróleo 1990 – 1999. Disponível em www.anp.gov.br.

Arno Krenzinger e Eurides Ramos Costa, “Limites de Utilização de Coletores Solares Sem Cobertura”, Mercofrio 2002 – Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul”, Porto Alegre, 2002.

Bezerra, M.A. “Aplicações Térmicas da Energia Solar”. Ed. Universitária, 2001.

Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE)/UFPE. 2000. Disponível em www.eolica.com.br.

Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica de Salvo Brito (CRESESB). 2000. www.crescesb.cepel.br.

Ferrari, E. L. Utilização de Curvas de Carga de Consumidores Residenciais, Medidas para Determinação de Diversidade da Carga de Carregamento de Transformadores de Distribuição. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica/USP, São Paulo, 1996.

Gomes D.G. e Fico N. G., Otimização de Coletores Solares de Placas Planas, “Mercofrio 2000 – Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul”, Porto Alegre, 2000.

Green Solar. “Cenário Energético Brasileiro”. 2003. disponível em www.green.pucminas.br/energiasolar.htm.

Guths, S, Philippi, P.C., Gaviot, E. e Thery, P. – Um Transdutor de Fluxo de Calor Gradiente Tangencial. XI Congresso Brasileiro em Engenharia Mecânica (COBEM), Belo Horizonte/MG, 1994.

Instituto Nacional de Meteorologia – Laboratório de Energia Solar EMC/UFSC (INMET – LABSOLAR). Atlas de Irradiação Solar do Brasil. Brasília, 1998. www.aneel.gov.br.

Jornal O Estado de São Paulo, <http://www.estadao.com.br>; sessão “Grandes Acontecimentos Internacionais”; 2003.

Jornal Cosmo On-line; www.cosmo.com.br; sessão “Especial Oriente Médio”, 2003.

L. Henden, J. Rekstad and M. Meier, “Thermal Performance of combined solar systems with different collector efficiencies”, 2001.

Luiz, M. A. “Como Aproveitar a Energia Solar”. Ed. Edgard Blucher Ltda, 1985.

Magnoli, D.; e Scalzaretto. R. Geografia – espaço, cultura e cidadania. V. 1. São Paulo: Moderna, 1998.

Medeiros, L.A. “Geração de Energia Elétrica e Sistemas Alternativos”. www.geocities.com/electricaltechnology/papers/gereelsa.html.

MME – Ministério de Minas e Energia, Balanço Energético Nacional. Brasília: 2000.

Referências Bibliográficas

Mveh J.D.M., Prieb C.W.M. e Krenzinger A., Eficiência de Coletores Solares sem Cobertura, “Mercofrio 1998 – Feira e Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul”, Porto Alegre, 1998.

Neto J.H.M., Projeto, Fabricação, Montagem e Testes de Diferentes Protótipos de Coletores Solares Parabólicos Compostos “CPCS”, “Mercofrio 2000 – Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul”, Porto Alegre, 2000.

Paffenbarger, J Oil in Power Generation. Paris: International Energy Agency/OCDE,

Palz, W “Energia Solar e Fontes Alternativas”. França-Paris: Ed. Hemus, 1995. 358 p.

Siqueira A.M.O. e Krenzinger A., Cálculo da Eficiência Diária em Média Mensal de um Sistema de Aquecimento Solar Operando em Regime de Termossifão, “Mercofrio 1998 – Feira e Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul”, Porto Alegre, 1998.

The International Journal on Hydropower & Dams (IJDH). World Atlas & Industry Aqua-Media International Ltda., 2000.

Vassilis Belessiotis and Emmanouil Mthioulakis, “Analytical approach of thermosyphon solar domestic hot water system performance”, 2001

Windpower Monthly News Magazine. Volume 14 (1998), 15 (1999) e 16 (2000). Dinamarca, 2000. Disponível em www.windpower-monthly.com.

ANEXOS

Transdutores de Fluxo de Calor a Gradiente Tangencial

Seu princípio de funcionamento consiste em desviar as linhas de fluxo de calor de modo a gerar uma diferença de temperatura num plano tangencial ao plano de medição (GÜTHS, 1994). O desvio das linhas de fluxo é causado pelo contato pontual entre a superfície isotérmica superior e a parede auxiliar, segundo o esquema mostrado nas Figuras 3.6 e 3.7.

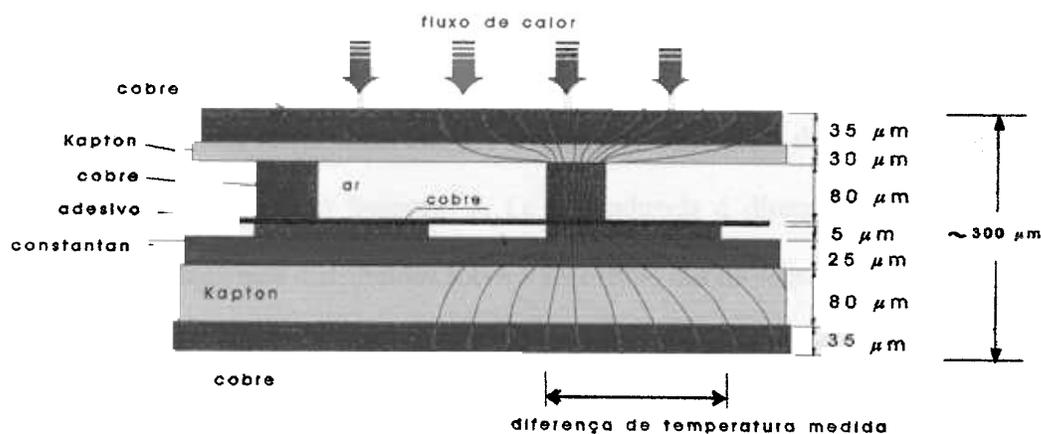


Figura 1 – Corte transversal de um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial (S. Güths*, P.C. Philippi*, E. Gaviot** e P. Thery** - 1994).

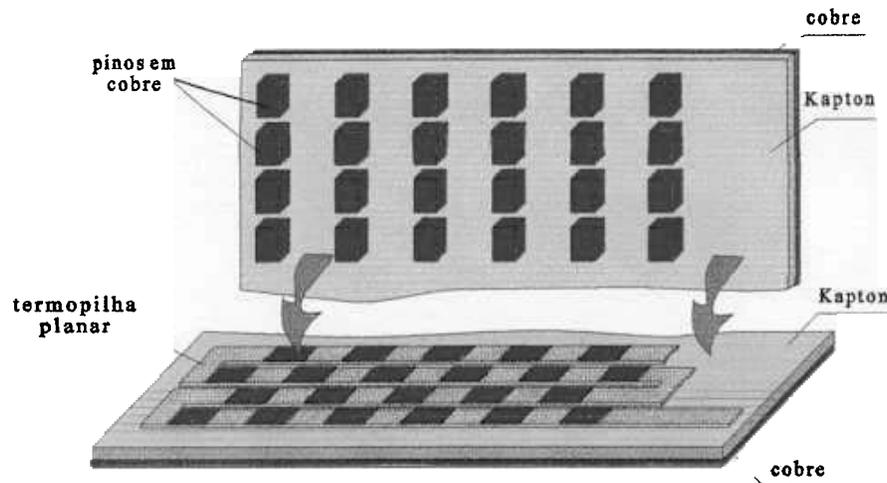


Figura 2 – Vista aberta do transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial (S. Güths, P.C. Philippi*, E. Gaviot** e P. Thery** - 1994)*

As diferenças de temperaturas são medidas por termopares planares a eletrodos depositados ligados em série. Cada um dos termopares converte a diferença de temperatura em f.e.m (força eletromotriz) Seebeck. A f.e.m produzida é diretamente proporcional ao número de termoelementos distribuídos sobre a superfície útil do sensor.

Essa técnica permite a realização de termopares desprovidos de soldas, facilitando a fabricação de transdutores com grande superfície de medida, alta sensibilidade e espessura reduzida.