

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

AUREA LÚCIA VENDRAMIN GEORGI

AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA – DESEMPENHO E RACIONALIZAÇÃO DE
MATERIAIS E ENERGIA ALTERNATIVA FUNDAMENTAL PARA O
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

CURITIBA

2015

AUREA LÚCIA VENDRAMIN GEORGI

AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA – DESEMPENHO E RACIONALIZAÇÃO DE
MATERIAIS E ENERGIA ALTERNATIVA FUNDAMENTAL PARA O
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Tese apresentada como requisito à obtenção de grau de Doutor. Área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Itsuo Yamamoto

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

CURITIBA

2015

G352a

Georgi, Aurea Lúcia Vendramin

Aquecimento solar de água: desempenho e racionalização de materiais e energia alternativa fundamental para o desenvolvimento sustentável / Aurea Lúcia Vendramin Georgi. – Curitiba, 2015.

118 f. : il. color. ; 30 cm

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE, 2015.

Orientador: Carlos Itsuo Yamamoto.

Coorientador: Carlos Eduardo Camargo Nogueira

Bibliografia: p. 112-118.

1. Aquecedores solares de água. 2. Coletores solares. 3. Energia solar. 4. Sustentabilidade. I. Yamamoto, Carlos Itsuo. II. Nogueira, Carlos Eduardo Camargo. III. Universidade Federal do Paraná. IV. Título.

CDD: 621.47



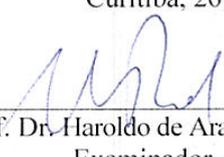
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais
Setor de Tecnologia

RELATÓRIO DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

Aos vinte e seis dias do mês de junho de 2015, no Auditório Inferior da Engenharia Química - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pelo Prof. Dr. César Augusto Dartora, vice-coordenador do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a septuagésima segunda defesa de tese de doutorado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Carlos Itsuo Yamamoto (UFPR), Haroldo de Araújo Ponte (UFPR), Marilda Munaro (UFPR), Jair Antonio Cruz Siqueira (UNIOESTE), Reginaldo Ferreira Santos (UNICAMP). Às 14:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando a candidata **AUREA LUCIA VENDRAMIN GEORGI** a fazer a apresentação da tese de doutorado intitulada **“AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA - DESEMPENHO E RACIONALIZAÇÃO DE MATERIAIS E ENERGIA ALTERNATIVA FUNDAMENTAL PARA DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL”**. O referido trabalho teve a co-orientação do Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de argüição pelos membros participantes. Tendo em vista a tese e a argüição, a banca decidiu pela APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

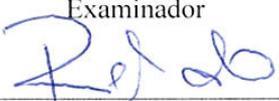
Curitiba, 26 de junho de 2015.


Prof. Dr. Carlos Itsuo Yamamoto
Orientador


Prof. Dr. Haroldo de Araújo Ponte
Examinador


Prof.^a Dr.^a Marilda Munaro
Examinador


Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira
Examinador


Prof. Dr. Reginaldo Ferreira Santos
Examinador


Prof. Dr. César Augusto Dartora
Vice-Coordenador do PIPE

" Aqueles que passam por nós, não vão sós, não nos deixam sós. Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós."

Antoine de Saint-Exupéry

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu grande exemplo, professor Carlos Itsuo Yamamoto, para mim uma imensa honra e orgulho tê-lo como orientador durante essa caminhada, não esqueço seus eternos ensinamentos, seus conselhos e inestimável confiança.

Meus respeitosos agradecimentos pela contribuição e participação dos membros da banca examinadora de defesa.

Manifesto aqui a minha gratidão a todos os professores do campus UNIOESTE, amigos e família, não deixo de agradecer o imprescindível apoio do PIPE, LACAUT e FUNPAR.

Meu muito obrigada a quem me encoraja em todos os aspectos da vida, meu amado Gunnar, que aposta em mim, mais do que ninguém.

Mais uma etapa foi vencida! Preciso agradecer ao papai do céu a sua presença em minha vida!

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência energética e o custo benefício de um sistema de aquecimento solar de água – SWHS, com 1,00 m² de coletor solar plano – FPC instalado na Casa Inteligente – *campus* Unioeste, cidade de Cascavel – PR, o estudo contempla benefícios e avanços tecnológicos para eficiência energética e sustentabilidade, sem danos ao meio ambiente, empregando materiais como o polietileno expandido, tubos PVC, alumínio, vidro e mantas de isolamento térmico, mesclando-os com materiais de reuso para minimizar a perda de eficiência e ao mesmo tempo diminuir o seu custo de aquisição. O sistema foi testado ao longo de um ano e o coletor obteve temperatura máxima registada de fluido de saída de 69 °C, enquanto a temperatura máxima da água na parte inferior do reservatório de água quente foi de 57 °C. A eficiência média diária do coletor solar foi de 60,6%, enquanto a eficiência média do sistema foi 52,8%.

Palavras-chave: Eficiência energética, Materiais reciclados, Coletor Solar, Sustentabilidade, Aquecedor solar de água.

ABSTRAT

This study aimed to evaluate the energy efficiency and the cost benefit of a solar heating system water - SWHS with 1,00 m² of flat solar collector - FPC installed in Smart Home - Unioeste *campus*, city of Cascavel - PR, the study includes benefits and technological advances for energy efficiency and sustainability, without damage to the environment, using materials such as expanded polyethylene, PVC pipes, aluminum, glass and insulation blankets, mixing them with reuse materials to minimize the loss of efficiency and same time lower your cost. The system was tested over a year and the collector obtained maximum temperature recorded was 69 °C fluid outlet, while the maximum temperature of the water in the lower part of the hot water tank was 57 °C. The daily average efficiency of solar collector was 60.6%, while the average efficiency of the system was 52.8%.

Keywords: Energy efficiency, Recycled materials, solar collector, Sustainability, solar water heater.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Evolução do mercado de Aquecedor Solar.....	28
Figura 2.2: Desagregação da curva de carga da CPFL observada em 1998.....	33
Figura 2.3: Aquecedor solar de baixo custo (ASBC) de Woels e coletor solar de baixo custo (CSBC) de Bartoli.....	40
Figura 2.4: Deformação acidental em placa de PVC alveolar.....	40
Figura 2.5: Modelos fabris brasileiros compactos em metal e termoplásticos.....	41
Figura 2.6: Otimização australiana de aquecedor solar compacto com redução da placa absorvedora e produto final acabado.....	42
Figura 2.7: Instalação por convecção com desníveis entre reserva de água fria, quente e coletores solares debaixo de um telhado residencial em baixa pressão de funcionamento.....	44
Figura 2.8: Instalação por convecção com desníveis entre reserva de água fria, quente e coletores solares com explosão de uma torre para fora do telhado residencial em baixa pressão de funcionamento.....	45
Figura 2.9: Instalações por convecção com equipamento popular de linha fabril disposto sobre o telhado da edificação residencial em baixa pressão de funcionamento.....	45
Figura 2.10: Instalação por convecção com nível entre reservas de água debaixo de um telhado residencial em baixa pressão de funcionamento.....	46
Figura 2.11: Instalação com circulação forçada e controlada entre o reservatório de água quente e os coletores solares numa situação de baixa pressão.....	47
Figura 2.12: Apoio elétrico simples acoplado ao tanque de água quente.....	49
Figura 2.13: Esquema simplificado de apoio a gás a um aquecedor solar residencial.....	50
Figura 2.14: Projeto Racional 1 na Cidade de Americana SP em 2010.....	51
Figura 2.15: Componentes da radiação solar incidente na superfície terrestre.....	57
Figura 2.16: Heliógrafo.....	59
Figura 2.17: Actinógrafo.....	60
Figura 2.18: Piranômetro fotovoltaico.....	61
Figura 2.19: Piranômetro tipo branco e preto.....	61

Figura 2.20: Piroheliômetro de incidência normal.....	62
Figura 2.21: Irradiação solar média mensal do Brasil em MJ/m ² para Junho.....	63
Figura 2.22: Informe de satélite brasileiro METSAT.....	64
Figura 2.23: Isotropia e anisotropia da atmosfera durante o dia.....	66
Figura 2.24: Ângulos da declinação solar em função do movimento aparente do Sol – Solstícios de verão, inverno e Equinócios.....	67
Figura 2.25: Eclíptica, declinação Solar e datas dos Solstícios e Equinócios.....	68
Figura 2.26: Abóbada Celeste e movimento aparente do Sol em torno da Terra.....	68
Figura 2.27: Ângulos para um plano horizontal e para um plano inclinado.....	78
Figura 2.28: Convenção nórdica para orientação do coletor solar.....	80
Figura 2.29: Datalogger CR 1000; conexões ao computador.....	84
Figura 2.30: Curva de rendimento coletores colares de baixa e média temperatura.....	86
Figura 2.31: Aquecedor solar desagregado do telhado da residência.....	88
Figura 3.1: Sistema de aquecimento solar de água com coletor de placa plana.....	93
Figura 3.2: Manta térmica, composta por fita multiuso autoadesiva.....	94
Figura 3.3: Caixa d'água envolta com manta térmica.....	95
Figura 3.4: Fluxômetro.....	96
Figura 3.5: Esferas de poliestireno expandido 3cm de diâmetro.....	97
Figura 3.6: Termopar tipo J utilizado para as medições de temperatura.....	98
Figura 3.7: Coletor solar de placa plana (FPC).....	102
Figura 3.8: Tubo de PVC 32".....	103
Figura 3.9: Espuma de poliuretano expandido	104
Figura 3.10: Piranômetro.....	105
Figura 4.1: Diferencial térmico no interior do reservatório de água.....	115
Figura 4.2: Radiação solar global na superfície do coletor por três dias característicos.....	117
Figura 4.3: Temperatura ambiente nos três dias característicos.....	117
Figura 4.4: Variação diária de TC,o, TB,T, TCW,i, três dias característicos.....	118

Figura 4.5: Energia coletada.....	119
Figura 4.6: Energia coletada diariamente X entrada de energia solar.....	119
Figura 4.7: Temperatura de água máxima mensal.....	121
Figura 4.8: Média mensal e anual de insolação diária solar global sobre a superfície do coletor, energia coletada, entregue e perdas nos tubos de alimentação.....	122
Figura 4.9: Média diária mensal da eficiência do coletor e eficiência do sistema.....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Parâmetros sugeridos pelo fabricante do CDT para assessorar automaticamente a circulação em aquecedores solares.....	48
Tabela 2.2: Conversão de qualquer data para número ordinal de 1 a 365 com valores calculados para o dia médio de cada mês e declinação solar.....	69
Tabela 2.3: Valores da refletividade para diferentes tipos de superfícies.....	80
Tabela 2.4: Índices de transparência atmosférica do céu brasileiro calculados a partir do Atlas Solarimétrico do Brasil.....	84
Tabela 4.1: Experiência com e sem esferas flutuantes.....	112

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Justificativa e hipóteses.....	24
1.2 Objetivos.....	25
1.2.1 Objetivo geral.....	25
1.2.2 Objetivos específicos.....	26
1.3 Delimitações do trabalho.....	26
1.4 Estrutura do trabalho.....	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1 Demanda de energia no Brasil	29
2.2 O consumo de energia elétrica.....	30
2.3 Demanda das ações brasileiras	34
2.4 A propagação da tecnologia nos países em desenvolvimento.....	35
2.5 Aquecedores solar de baixo custo	37
2.6 Aquecedores solares – tecnologia brasileira	42
2.7 Substituição por alternativa metálica.....	51
2.8 Dimensionamento de um sistema de aquecedor solar.....	53
2.9 Radiações, irradiância e irradiação solar.....	56
2.9.1 Instrumento de medição de irradiância solar e dados brasileiros.....	57
2.9.2 Irradiância e irradiação solar sobre um plano inclinado.....	65
2.9.3 Utilização de software da irradiação solar em planos inclinados.....	82
2.9.4 Chuveiros elétricos - potência variável eletronicamente.....	85
2.9.5 Desempenho dos coletores solares de uso residencial.....	85
2.9.6 Período de retorno do capital investido no sistema de aquecimento de água.....	88
2.10 Considerações finais.....	90
3 MATERIAL E MÉTODOS	92
3.1 Materiais.....	92
3.2 Métodos.....	97
3.2.1 Concepção de um corpo de prova com esferas de poliestireno expandido.....	97
3.2.2 Concepção do coletor solar.	100
3.2.3 Dimensionamento da área do coletor solar.....	104

3.2.4 Irradiação solar global sobre plano do coletor solar.....	107
3.2.5 Análise desempenho térmico do coletor solar.....	107
3.2.5.1 Energia coletada.....	108
3.2.5.2 Energia útil e fornecimento das perdas nos tubos.....	109
3.2.5.3 Fração solar (FS).....	109
3.2.5.4 Eficiência do coletor solar.....	110
3.2.5.5 Eficiência do sistema.....	110
3.2.6 Cálculos do período de retorno financeiro do sistema de aquecimento de água em KWh.....	111
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	112
4.1 Variação de temperatura da água na caixa d'água de polietileno envolta por manta térmica.....	112
4.2 Influência da anisotropia no dimensionamento e aferimento de uma área coletora solar.....	113
4.3 A influência da variação periódica do ângulo de inclinação dos coletores solares planos.....	114
4.4 Desempenho energético do coletor solar de paca plana - FPC.....	116
4.4.1 Desempenho diário.....	116
4.4.2 Variação diária de temperatura.....	118
4.4.3 Energia diária coletada.....	119
4.4.4 Desempenho mensal.....	120
4.4.5 Energia coletadas, entregue e perdas.....	121
4.4.6 Eficiência do sistema e eficiência do coletor solar.....	122
4.5 Cálculos do período de retorno do capital investido no sistema de aquecimento de água em kWh.....	123
5 CONCLUSÕES	126
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	128
7 REFERÊNCIAS	129

1 INTRODUÇÃO

Este projeto de tese apresenta uma contribuição para as populações buscando prover subsídio técnico e condições básicas de boa qualidade de vida, que devem contemplar soluções que considerem os benefícios e avanços tecnológicos da eficiência energética e da sustentabilidade. As áreas de recursos hídricos, energéticos e ambientais, buscam uma união com o planejamento energético pelo lado da demanda, atuando positivamente na estabilidade dos sistemas elétricos convencionais.

O uso de sistemas termos solares ou coletores solares, como forma de substituir a eletricidade para o aquecimento de água é uma solução adotada em diversos países do mundo, inserindo-se como uma alternativa que causa menores danos ambientais que pode trazer retorno financeiro para as populações de baixa renda, pela economia de energia elétrica.

Vários são os fatos que deixaram historicamente o uso da energia solar em segundo plano, um deles é o baixo desempenho no processo de transformação quando comparado com outros vetores convencionais e suas potências nominais de uso final.

A improbabilidade em função da climatologia local também conspirou para que o aproveitamento da energia solar ficasse numa escala insignificante diante das fontes convencionais. Outro fator foi o custo da conversão da energia solar para outro tipo de energia aproveitável na rotina humana, o que tem sido um fator relevante na baixa disseminação desse vetor energético junto aos países em desenvolvimento. Além disso é preocupante a questão da má distribuição populacional em função das reservas hídricas existentes.

Nesse contexto, o uso racional dos recursos naturais, principalmente água e energia, vem se impondo como uma ação fundamental para o desenvolvimento sustentável da sociedade.

O desenvolvimento de um sistema de aquecimento solar de água potável de baixo custo de aquisição e instalação, para efeito de proliferação junto às classes

sociais brasileiras de menor poder aquisitivo, tem sido tema de inúmeros trabalhos científicos.

Alguns trabalhos práticos podem ser encontrados na rede mundial de computadores, contudo percebe-se que, mesmo com toda a contribuição e esforço dos pesquisadores e fabricantes, não existe uma transferência tecnológica capaz de produzir um real impacto no sistema elétrico nacional, como a desagregação da carga noturna do chuveiro elétrico junto ao horário de pico por volta das 19h. Referido pico tem sido o principal objeto de discussão e polêmica em torno do crescimento da demanda e complicada proposta de crescimento para a oferta da energia elétrica.

A curva de carga do sistema elétrico brasileiro atinge seu pico entre as 18h e 21h e esse comportamento deve-se principalmente ao setor residencial e à ampla utilização de chuveiros elétricos para o aquecimento de água, estando presente em cerca de 73% dos domicílios. A consequência desse comportamento é uma elevada demanda energética associada a um baixo fator de carga (NASPOLINI, 2010).

Uma causa da inibição da transferência de tecnologia solar se dá por conta da ausência de uma política pública que adote com maior ênfase a administração do setor elétrico pelo lado da demanda, ante o insustentável orçamento do aumento da oferta com o indesejável aumento do passivo ambiental.

Todas as fontes energéticas são formas indiretas de energia solar, sendo que a sua irradiação pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica e geração de energia elétrica, auxiliando na mitigação da queima de combustíveis fósseis. A corrida pelo domínio deste mercado já iniciou com vários grandes projetos no mundo como, por exemplo, nos EUA há um projeto de instalação de um milhão de casas com energia solar até o ano de 2020. O Japão quer instalar 4,6 GW em placas solares até 2015 e tem multiplicado anualmente o número de casas com coletores solares nos tetos das residências.

Também existem projetos para instalação de 500 mil sistemas de aquecimento solar na União Europeia e na Holanda. Gigantes do petróleo como a Shell e a British Petroleum têm planos para competir por frações do mercado de energia solar para geração de energia elétrica ou aquecimento de água.

As energias solar e eólica serão os principais substitutos do petróleo, gás e carvão até 2050, indica o informe da Folha de São Paulo - 2010, elaborado pela Fundação Europeia para o Clima, que será entregue à Comissão Europeia. A Alemanha é considerada o país com o mais bem-sucedido mecanismo de incentivo às fontes renováveis de energia.

Dada sua localização geográfica o Brasil é particularmente privilegiado por ter uma insolação média superior à das nações industrializadas. O País não pode perder esta corrida. É preciso criar programas que promovam a criação da indústria de energia solar no país. A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, a Agência Nacional do Petróleo – ANP e as empresas que operam no setor elétrico e de combustíveis têm papel preponderante neste processo. O Brasil é solar. (Greenpeace, 2013)

A utilização da energia solar para a produção de água quente para fins residenciais e industriais representa uma das aplicações mais viáveis dessa fonte limpa de energia e massificada nos países desenvolvidos, porém a principal barreira para sua utilização massiva está em seus custos elevados. Suplantar esta barreira ajudaria a aliviar nossa matriz energética de fontes não renováveis de energia.

O Brasil possui grande potencial para uma utilização abrangente da energia solar. A irradiação solar global média incidente sobre um território de 8.514.876,599 km² varia entre 4,25 kWh m² a 6,5 kWh m² entre as diferentes regiões do país e grande parte do território nacional apresenta valores maiores que muitos países europeus, onde a utilização da energia solar já é bastante difundida (MARTINS et al., 2007).

Neste trabalho, propõe – se o desenvolvimento de um novo produto utilizando materiais diferenciados para o aquecimento solar de água - SWHS, destinado a uma classe social brasileira que hoje não dispõe dessa tecnologia, assim como defender a otimização e racionalização da instalação de um equipamento adequado à edificação uni familiar brasileira estendendo parte da tecnologia proposta para os modelos e formas da linha comercial convencional existente para as mais diversas classes sociais por um preço de aquisição mais atrativo.

1.1 Justificativas e Hipóteses

Fazer arquitetura pressupõe, antes de tudo, conhecer a amplitude da própria definição de arquitetura, como manifestação humana que atende a requisitos socioculturais, filosóficos, físicos, estéticos, funcionais, econômicos, de conforto ambiental, entre outros. A valorização de recursos para melhoria do sistema ambiental como um todo, requer um sistema alternativo e, melhor do que isso, o início imediato de alternativas viáveis e soluções favoráveis ao sistema de chuveiro elétrico, usado em 97% das habitações brasileiras (IBGE-PNAD, 2004), representando um consumo de energia de 20% a 25% para o setor residencial.

O chuveiro é responsável por 34% do consumo total de energia na ponta para o sistema energético brasileiro. Para os segmentos populares que ganham até 2 salários mínimos, o consumo de eletricidade com o chuveiro elétrico representa 22,8% da renda (consumo médio de 20,3 kWh/domicílio/mês) e 20,3% para os que ganham entre 2 e 3 salários mínimos (23,2 kWh /domicílio/ mês), segundo ACHÃO e SCHAEFFER, 2004.

Para contemplar soluções que considerem os avanços tecnológicos e os benefícios da produtividade e da eficiência energética, a indústria brasileira de aquecedores solares para água tem atribuído, às prestadoras de serviços, treinamentos para nortear fundamentalmente as vendas com o menor número de problemas posteriores, reduzindo assim toda a rotina técnica, desde a concepção até a instalação dos sistemas de aquecimento solar residencial a um estreito circuito que opera no mercado brasileiro de maneira primária.

Segundo a ABRAVA (Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento), nosso país dispunha, em 2011, de um montante acumulado de 7,3 milhões de metros quadrados de placas, ocupando oficialmente o sétimo lugar, logo atrás do Japão, no mais recente ranking mundial elaborado pela Agência Internacional de Energia (AIE). Em comparação, os Estados Unidos tinham 20,4 milhões de metros quadrados e a Alemanha, 12,6 milhões de metros quadrados, segundo e terceiro colocados, respectivamente. A líder China tinha 145 milhões de metros quadrados de coletores, cerca de 60% da base mundial instalada (ABRAVA, 2015).

Como incentivo governamental, o Governo Federal, por meio do PAC 2 (Programa de Aceleração de Crescimento), também está incentivando o uso da energia solar. O programa prevê a instalação de aquecimento solar para o banho nos dois milhões de residências a serem financiadas pelo programa "Minha Casa, Minha Vida", totalizando um investimento de R\$ 1,1 bilhão nos projetos de aquecimento solar (GOY, 2010).

A questão do aquecimento solar ainda é concebida no instante do projeto, mas muitos profissionais deixam o dimensionamento, instalação e assessoramento a cargo da indústria, posto de revenda ou até mesmo sob o julgamento do instalador. Esta dinâmica nem sempre tem contribuído para o sucesso da tecnologia na ótica do usuário final e muito menos para manter a boa reputação do vetor solar no mercado da concorrência.

Com o intuito de atenuar e amenizar esse tipo de problema, neste trabalho, junto à Metodologia, apresenta – se uma rotina de cálculo que pode estimar mês a mês a quantidade média e máxima de calor que um sistema de aquecimento solar pode produzir em função da orientação dos coletores e da instalação final em qualquer coordenada geográfica brasileira.

Esta tese oferece uma contribuição ao aumento da adoção do aquecedor solar residencial, direcionado exclusivamente a comunidade, onde poderá diminuir o gasto com eletricidade no aquecimento de água para chuveiro, assim como manter a boa reputação do vetor energético, se considera as revisão, metodologia e resultados do protótipo aqui apresentado.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma tecnologia termo solar de custo reduzido para aquecimento de água, passível de utilização imediata, substituindo a energia elétrica. Aquecer água com energia solar significa não consumir energia elétrica, economizar recursos hídricos, preservar o meio ambiente, fazer a conservação de

energia, viabilizar para os usuários o uso da energia convencional para outras atividades que lhes permitam usufruir de outros benefícios.

1.2.2 Objetivo específico

- Conceber o protótipo completo contendo no sistema um reservatório de água quente para uma edificação uni familiar, que garanta funcionalidade e longevidade do material, apresentando um coletor solar plano - FPC com características apropriadas para exposição na intempérie;
- Aperfeiçoar a forma de protótipo para aquecer e armazenar água quente, utilizando materiais alternativos da construção civil;
- Obter o cálculo estimativo da eficiência do coletor e eficiência do sistema de aquecimento;
- Calcular o valor investido no protótipo e período de retorno financeiro da produção termo solar em Kwh.

1.3 Delimitações do trabalho

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para avaliação da utilização de uma tecnologia com aquecedores solares de placa plana, uma excelente alternativa para prover a água quente desejada nas habitações e contribuir com os impactos socioambientais do setor elétrico brasileiro.

A tecnologia apresenta amplas vantagens ambientais, econômicas e sociais: por substituir hidroeleticidade e combustíveis fósseis, cada instalação de aquecedores solares reduz o dano ambiental regional e local associado às fontes de energia convencionais, e não requer reserva de recursos hídricos, adicional para geração de eletricidade e não deixar lixo radiativo como uma herança perigosa para as gerações futuras.

Para a validação dessa metodologia, será utilizada a edificação residencial Casa Inteligente – *Campus* da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, situada

na cidade de Cascavel - PR e, portanto, sendo considerados dados da realidade local.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho de tese encontra-se dividido em cinco partes. Na parte 1 está apresentada uma breve introdução ao tema, justificativas e hipóteses da pesquisa, delimitação do trabalho, bem como seus objetivos.

A parte 2 mostra uma revisão bibliográfica dos temas abordados no trabalho e são apresentadas pesquisas referentes à sustentabilidade, principais componentes e equipamentos para melhor utilização do processo de aquecimento de água, além de outras questões relacionadas. São apresentadas as normas ambientais utilizadas em estudos, definições, aplicações e suas relevantes limitações.

A parte 3 concentra-se no desenvolvimento da metodologia proposta no trabalho, utilizando conceitos de radiação solar, irradiação e descrevendo teoricamente valor de demanda nacional preocupantes ao inerente estado de nosso meio ambiente, diretamente derrotado pela sociedade. Descreve os critérios e parâmetros verificados para a avaliação da viabilidade dos principais componentes empregados em sistemas de aquecimento solar para água em estações frias do ano, além dos custos agregados para obtenção deste sistema alternativo.

A parte 4 apresenta os resultados e discussão que foram realizados para comprovar a aplicabilidade da metodologia proposta. Por fim, o capítulo 5 relata a conclusão desta tese.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O uso de instalações solares para aquecimento de água nas moradias brasileiras depende de uma série de ações mundiais que hoje são acentuadas pela globalização e também por internos. Entretanto, existem fatores favoráveis a um trabalho de pesquisa, para contribuir no desenvolvimento de novos conceitos de desenho, fabricação e instalação de aquecedores solares.

Será realizada uma revisão de forma a explicar o problema de uma forma geral, acentuando os fatores e as consequências, e assim fundamentar a metodologia e as conclusões. Estudos e levantamentos estatísticos realizados pela ABRAVA-Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento, Departamentos de Economia e de Aquecimento Solar caracterizam a evolução histórica do mercado de aquecimento solar entre os anos de 2001 e 2013. A Figura 2.1 mostra a evolução da área instalada anualmente e da área acumulada de coletores solares no Brasil.



FIGURA 2.1 – EVOLUÇÃO DO MERCADO DE AQUECIMENTO SOLAR NO BRASIL
 FONTE: ABRAVA (2015)

2.1 Demanda de Energia no Brasil

O desenvolvimento da eletricidade trouxe, já no começo do século XIX, importantes variações no interior das residências e edifícios. Até o aparecimento da energia elétrica, o gás era o produto dos sistemas de aquecimento, refrigeração e iluminação das moradias, cujo consumo foi substituído pela eletricidade (GOULART, 1993). A energia solar é abundante e gratuita, é uma energia limpa, pois a sua captação, transformação e utilização não agridem o meio ambiente, aplicável em qualquer circunstância e como fonte térmica, é usada para aquecimento de água.

Nas primeiras redes elétricas urbanas o usuário recebia a energia sob a forma de corrente contínua, que era produzida em pequenas centrais dispersas pela rede urbana, com pouca segurança no fornecimento. Posteriormente, elas foram substituídas por outras de corrente alternada, que permitem o uso de transformadores com os quais se tornou possível e fácil a elevação de tensão, possibilitando o transporte a grandes distâncias. Essa substituição permitiu a interconexão das redes, tornando assim o fornecimento de energia elétrica mais confiável. Começa então o uso crescente de eletricidade nos edifícios e residências.

À medida que os problemas técnicos foram sendo resolvidos, a energia elétrica foi penetrando nas atividades humanas e substituindo as outras formas de energia. Isto ocorreu pela facilidade de sua geração, proveniente de diversas fontes de energia como: mecânica, térmica, nuclear radiante e química, hídrico e eólico. O seu transporte por meio de condutores elétricos a enormes distâncias com perdas relativamente pequenas, e a facilidade de seu uso, fazem da eletricidade um tipo de energia com vantagens sobre as outras.

Atualmente, boa parte das atividades econômicas é movida pela energia elétrica; o seu uso e versatilidade se fazem tanto maior quanto maiores forem os recursos técnicos e financeiros dos países. O consumo de energia elétrica constitui-se de um verdadeiro índice indicativo do desenvolvimento de uma nação.

Com base na lei da Física, “nada se perde, tudo se transforma”; segundo COSTA (1991), energia elétrica tem sua geração proveniente de outros tipos de energia. No Brasil, a riqueza em potenciais hídricos fez com que, os sistemas de

produção de energia elétrica em operação, fossem constituídos essencialmente por centrais hidrelétricas, estas com seu potencial hídrico esgotando com o passar dos dias.

2.2 O consumo de energia elétrica

Tolmasquim e Guerreiro (2005), estimaram para o Brasil em 2008 terá capacidade instalada de 944 796,889 MW e uma previsão de 128 364 MW para 2015. Tal potência costuma ficar ociosa durante a maior parte do dia e só é acionada no horário de pico entre as 18h e 21h, onerando-se materiais e recursos financeiros por conta de um pequeno intervalo horário do dia. A vantagem na adoção dos aquecedores solares de água em grande quantidade se dá na remoção da carga concentrada do uso do chuveiro elétrico no horário de pico e conseqüentemente todos seus custos de infraestrutura necessários entre a geração e transmissão da energia elétrica.

Conforme Prado e Gonçalves em 1998 no Brasil cerca de 90% das residências tinham chuveiro elétrico para o aquecimento da água destinada ao banho, sendo estes chuveiros responsáveis por 23% do consumo de energia elétrica doméstica podendo alcançar 35% da demanda total durante o horário de pico de consumo das famílias de menor poder aquisitivo.

Todavia, segundo informe da ELETROBRAS (2007), cerca de 73,1% das residências do Brasil utilizam o chuveiro elétrico, correspondendo a uma fatia de 23,9% do consumo doméstico com uma redução para 22,9% após a experiência do racionamento em 2001, importando disto que o custo de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica para responder à demanda dos chuveiros elétricos é da ordem de até US\$ 850 por unidade instalada e que atualmente significa um orçamento de US\$ 8 bilhões para atender a essa especificidade.

A classe social brasileira de baixa renda, juntamente com outros estratos sociais, elege o chuveiro elétrico para o aquecimento da água de banho como medida econômica no orçamento da obra, devido ao baixo custo de aquisição e instalação desses aparelhos elétricos entre US\$ 17 a US\$ 30 (chuveiro, braço em PVC e conector elétrico em porcelana). Outra vantagem compreendida pelo usuário

de chuveiros elétricos em regiões tropicais e subtropicais com escolha entre 4 kW a 8 kW de potência se dá pela eficiência energética de 95% do processo de conversão para o calor transferido à água (COLLE, SALAZAR, 2004).

Entretanto, existe uma série de malefícios por esta escolha, entre as quais a resolução da qualidade de energia elétrica como flutuações de tensão, surtos e harmônicos, este último pelo lado do cliente, medidos no ponto de entrega de energia onde o chuveiro elétrico tem boa participação entre os eletrodomésticos de menor potência elétrica (GAMA, OLIVEIRA, 1999).

Outro dano que se dá pela utilização do chuveiro elétrico é de aspecto microeconômico, quando se considera sua significativa fração na carga operacional da residência e seu custo mensal fixado pelas concessionárias, cabendo lembrar que haverá implacavelmente um custo por banho cada vez que o chuveiro é acionado. Provavelmente o maior prejuízo fica por conta da integração do uso simultâneo no horário de pico e a dispendiosa estrutura operacional da geração e transmissão de energia elétrica para atender a essa demanda.

O PROCEL estima que existam mais de 30 milhões de chuveiros elétricos instalados no Brasil. Esses equipamentos, além de consumirem cerca de 8% de toda a eletricidade produzida no país, são responsáveis por aproximadamente 18% do pico de demanda do sistema elétrico nacional. Este último fato evidencia a importância estratégica dos aquecedores solares devido ao fato de reduzirem a demanda de energia nos horários críticos do dia. Falando mais claramente, 18% do pico de demanda, significa dizer que 18% da capacidade instalada de geração elétrica no Brasil está dedicada somente para ligar o chuveiro elétrico no horário de ponta. Isto significa uma potência total de 18 000 MW, o que equivale em 2014 a Itaipu (14 000 MW) e mais um conjunto de termelétricas de mais 4 000 MW construídas somente para ligar o chuveiro elétrico e perpetuar um modelo complexo de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica para aquecer água a 40 °C.

Segundo Mogawer (2012), quase toda essa energia deve ser gerada em poucas horas do dia (basicamente entre 18h e 20h), sobrecarregando o sistema. Estima-se que o chuveiro elétrico contribui com 12,8% da demanda máxima do sistema elétrico brasileiro nesse horário crítico, correspondendo a aproximadamente

6 800 MW de potência instalada, ou seja, quase metade dos atuais 14 000 MW de capacidade da Itaipu instaladas em 20 unidades geradoras.

Os chuveiros elétricos são grandes consumidores de energia e, apesar de eficientes, do ponto de vista de conversão de energia elétrica em térmica seu uso não é, de forma alguma, eficiente sob o ponto de vista da utilização da eletricidade. Converter energia elétrica, com a qual se faz praticamente qualquer coisa, em água quente a 40 °C, com o que apenas toma-se banho, é uma forma displicente e irracional de utilização da energia elétrica sob a ótica da física. A substituição dos chuveiros elétricos por sistemas de aquecimento solar de água proporciona a redução significativa da demanda energética no horário de ponta e do consumo de energia elétrica. Somente no ano de 2007, foram economizados no Brasil com o aquecimento solar cerca de 620 GWh, energia suficiente para abastecer 350 000 residências brasileiras consumindo cerca de 145 kWh por mês.

Entre 2007 a 2008 registrou-se um crescimento no consumo de energia elétrica no Brasil na ordem de 5,4% conforme relatório da Empresa de Pesquisas Energéticas (TOLMASQUIM, GUERREIRO, 2008). Deste crescimento se apontou para o setor residencial em 2007, 86 397 GWh e 91 303 GWh para 2008, correspondendo a um crescimento de 5,7% na carga consumida por esse segmento, indicando o baixo nível de segmentação do aquecedor solar junto aos estratos sociais de menor poder aquisitivo que continuam a empregar o chuveiro elétrico como aquecedor de água para o banho.

Ante a baixa expectativa de lucro em curto prazo da tecnologia solar segundo a ótica do poder público e das empresas privadas do setor elétrico, existe hoje um grande estímulo e decisão por optar no aumento da oferta da energia elétrica por novas hidrelétricas e termelétricas, mesmo que afetada de alto custo imobilizado e de longa maturação, fora o risco hidrológico que vem ameaçando essa opção, terminando por uma complexa composição de custos e de tarifas cuja abstração se eleva no seio do legislativo (MOREIRA, 2003).

Conforme Sartori, (2007) a quantidade disponível de eletricidade é quase o dobro que o de consumo, mantendo-se um paralelismo conservador. Agravou-se entre 2002 a 2004 devido à severa estiagem, mas que ao todo se acabou consumindo a reserva hídrica.

Embora a maior carga de consumo de energia elétrica esteja no setor industrial é o fenômeno da frequência de uso simultâneo do chuveiro elétrico residencial, com potências nominais entre 3 200 a 6 000 W, que se integra num somatório extraordinário na carga de consumo diário concebendo o debatido horário de pico, causador de toda a polêmica entre consumo, demanda e oferta do setor elétrico. Isto tem impellido a comunidade científica brasileira a propor a gerência de problema pelo lado da demanda, do que aumentar a oferta a um custo extraordinário com enorme detrimento do orçamento público e do meio ambiente. Particularmente na utilização de aquecedores solares, entre muitas pesquisas que buscam incrementar o assunto tem havido uma preocupação central em avaliar resultados entre economia e opinião dos usuários (OLIVA, 2000); a Figura 2.2 ilustra a contribuição do pico residencial em torno das 19h confinando referido horário como o causador de quase toda a polêmica do setor elétrico”. (RISPOLI, 2004).

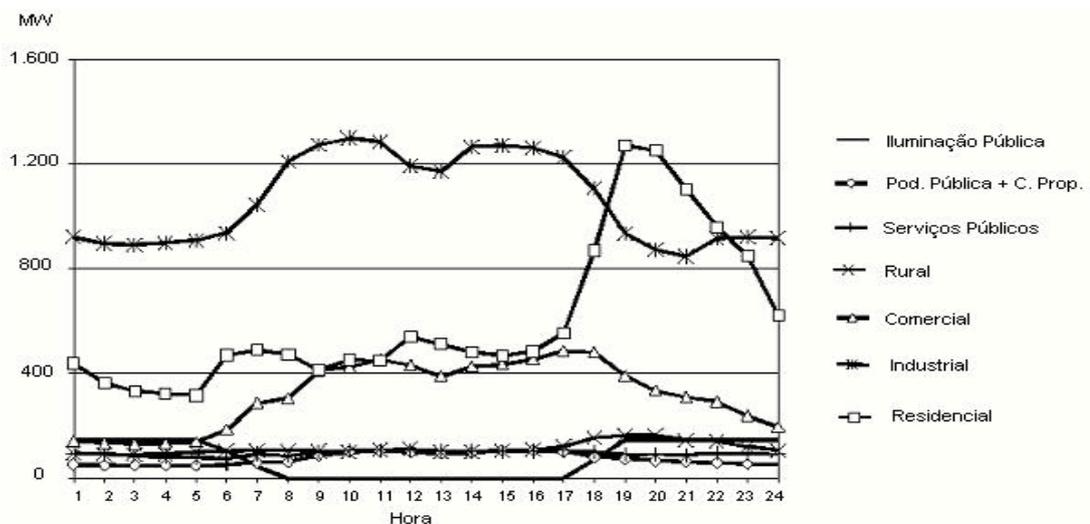


FIGURA 2.2: DESAGREGAÇÃO DA CURVA DE CARGA DA CPFL.

FONTE: RISPOLI (2004)

A disseminação extraordinária do chuveiro elétrico está também intimamente associada ao valor comercial desse artefato, que se estabeleceu comercialmente no mercado a partir de U\$ 6,00, cuja instalação dispensa mão-de-obra especializada, podendo usar alguns materiais adicionais que não agregam mais do que U\$ 3,00 ao custo final instalado, desde que a edificação receba instalação hidráulica e elétrica convencional e infraestrutura pública. Esta característica atribuiu a este sistema de aquecimento do banho humano uma extraordinária preferência em obras urbanas e

rurais de baixo poder aquisitivo e grande parte das edificações da classe média e alta. De outro lado, é impossível conceber um aquecedor solar por U\$ 6,00 e instalá-lo por U\$ 3,00 (RISPOLI, 2004).

2.3 Demanda das ações brasileiras

Com a associação brasileira de refrigeração, ar condicionado, ventilação e aquecimento (ABRAVA) conseguiu-se um incentivo direto à tecnologia termo solar junto à isenção de IPI e ICMS, estabelecida pelo decreto nº 4.070/01 e nº 46.654/02 do Estado de São Paulo. Ainda hoje estão em trâmite muitos outros decretos que vislumbram a intensificação da transferência de tecnologia termo solar no Brasil (RODRIGUES, MATAJS, 2005).

Ações municipais como a de São Paulo mediante a sanção da Lei 14.459 em 3 de Julho de 2007, tornando obrigatório o uso de aquecedores solares em novas edificações com um número maior ou igual a três banheiros e em habitações menores com a obrigação em deixar as instalações hidráulicas para posterior adaptação do aquecedor solar estendendo-se a comércio e hotéis, marca um rumo certo para uma entrada significativa nas edificações de maior poder aquisitivo e uma esperança para as de menor (NÚCLEO INOX, 2007).

O planejamento pelo lado da demanda se aplicou no Brasil sobre fontes convencionais de energia, como a energia elétrica e combustíveis, cabendo citar o PROCEL programa de governo voltado para a conservação de energia elétrica instituído em dezembro de 1985 e implantado em 1986. O PROCEL é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, cabendo à Eletrobrás o controle de sua execução.

O referido programa tem norteado o combate ao desperdício de energia elétrica nos programas e incentivo às indústrias de eletrodomésticos qualificando as tecnologias de melhor desempenho. As metas de longo prazo do PROCEL preveem redução de demanda da ordem de 130 bilhões de kWh em 2015, evitando a instalação de 25 000 MW (cerca de duas usinas ITAIPU). O ganho líquido para o Brasil está previsto para US\$ 11,33 bilhões.

Outra atuação pelo lado da demanda é no setor dos combustíveis e está sendo focalizado pelo CONPET, programa nacional de racionalização do uso dos derivados do petróleo e do gás natural também conduzida pelo Ministério de Minas e Energia do Brasil, onde se objetiva principalmente o uso racional dos veículos de transporte (MME, 2004).

Lamentavelmente, a proliferação dos aquecedores solares acontece na iniciativa pessoal das classes sociais mais elevadas que em números não produzem o impacto desejável, e a modesta adesão das classes de menor poder aquisitivo ocorre sob administração de programas pontuais entre companhias distribuidoras e fabricantes que também em número ainda não atendem a um objetivo plausível.

A Companhia Paulista de Força e Luz têm atuado em bairros de cidades brasileiras na colocação de algumas unidades autônomas de aquecedores solares certificadas pelo INMETRO sem ônus aos contemplados, com o intuito de atenuar a carga no horário de pico. Na cidade de Americana interior de São Paulo, a CPFL adquiriu 210 equipamentos certificados de uma empresa privada para esse fim (SOLETROL, 2008).

Segundo Varella, (2004), em pesquisa realizada em Barão Geraldo distrito de Campinas SP, junto a residências de elevado padrão munidas de sistemas de aquecimento solar para água potável, observou-se um aumento da carga de consumo de energia elétrica ao invés de uma esperada redução. Defende-se nesse trabalho a hipótese de um descuido do uso abusivo dos aparelhos eletrodomésticos. Todavia pode-se agregar como uma segunda hipótese a péssima administração do circuito elétrico de apoio que normalmente trazem os aquecedores solares de fábrica.

2.4 A propagação da tecnologia nos países em desenvolvimento

O emprego da energia solar é citado na história, bem antes da era cristã, pelos gregos, a tecnologia que fracassou nas aplicações práticas após a revolução industrial onde se perpetuaram como paradigmas o petróleo e a eletricidade para as

atividades industriais, comerciais e domiciliares, ficando a tecnologia solar como alternativa de segundo plano (VAZQUES, 2007).

Depois da revolução industrial, países do terceiro mundo que tiveram necessidade do petróleo importado, custos do refino para obtenção dos derivados, um histórico de endividamento cobrado a juro composto junto aos credores internacionais, altos preços de produtos com tecnologia importada e, todavia segundo Goldemberg, et al (1987- 1995), foram submetidos a um processo de redução mundial do preço internacional da principal fonte de renda: os commodities, levando-os assim um lento e duradouro processo de desenvolvimento, que perdura a décadas com a transferência de capital para os países mais ricos, levando à políticas internas nos países em desenvolvimento desfavoráveis para a tecnologia solar nas habitações, uma vez que a expectativa de retorno dos investimentos no setor não tem o mesmo desempenho do nível de endividamento, dando-se preferência para a biomassa, correspondendo a cerca de 40% da matriz energética desses países.

Fontes de energia alternativas, como a biomassa e a energia eólica predominam sobre a adoção de uma política de incentivo à energia solar, que têm um declínio da atividade de pesquisa contando da década de 1980 em diante, predominando o desenvolvimento dos sistemas fotovoltaico.

Segundo, Tolmasquim (2003) a primeira grande barreira identificada para o desenvolvimento da tecnologia solar térmica decorre da falta de entendimento, por parte do próprio governo e de seus técnicos, de que o aquecimento solar em substituição ao chuveiro elétrico proporciona medidas eficazes de conservação de energia, inclusive com atenuação e deslocamento do horário de ponta das concessionárias de energia. Dessa forma, sua utilização intensiva pode ser interpretada como uma forma alternativa de geração descentralizada de energia elétrica, podendo ser incluída nas leis de incentivo às energias renováveis atualmente em fase de elaboração ou aprovação no Congresso Nacional.

Transferir a tecnologia solar na maior fração populacional para conseguir um impacto significativo, deve-se atingir as camadas economicamente ativas de menor estrato econômico familiar, este é um desafio que apenas terá sucesso com a participação conjunta e solidária entre a universidade, iniciativa privada, pública e

política. Isoladamente não há grandes perspectivas. A falta de políticas públicas a nível estadual, federal e até municipal para levar a uma eficiente transferência de tecnologia ao cidadão comum sem recompensa alguma por uma atitude pessoal na aquisição de um equipamento solar é hoje outro motivo para inibir a entrada maciça dos aquecedores solares nas edificações da classe média.

Segundo Jannuzzi (2008), a Prefeitura de Campinas em 2002 classificou o aquecedor solar como um luxo para efeito de cobrança diferencial de tarifa do IPTU dessa cidade, contrariando completamente o incentivo à transferência de tecnologia solar por parte do poder público municipal.

Existe uma tendência natural de promover em escala desigual as tecnologias que priorizam um lucro financeiro mais interessante e rápido. Isto tem deixado o aquecedor solar em segundo plano. Todavia não se pode contabilizar com precisão o bem provocado pela redução do passivo ambiental advindo do uso dos aquecedores solares.

2.5 Aquecedores solar de baixo custo

Diante de um cenário macroeconômico agressivo onde prevaleceu a manutenção do lucro com o constante adiamento dos planos de desenvolvimento dos países do terceiro mundo, as diretrizes atuais do petróleo e da eletricidade ficaram perpetuados, contudo no Brasil, resistem alguns trabalhos científicos muito mais por idealismo do que por fins lucrativos, procurando materializar a transferência da tecnologia solar no Brasil mediante uma iniciativa que defende a educação e o treinamento a longo prazo.

Uma destas iniciativas teve origem em um convite do SEBRAE à equipe original do engenheiro eletricitista Augustin Woels, exposto entre 3 a 14 de Junho de 1992, no Rio de Janeiro, junto ao evento internacional ECO-92, mais conhecido como a *Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento*, com a apresentação do primeiro protótipo de um Aquecedor Solar de Baixo Custo totalmente brasileiro sob controle de uma empresa que na época tinha o nome de Sunpower, que evoluiu em 1999 para Incubador de Empresas

Tecnológicas (CIET), no Campus da USP/IPEN, e também da FAPESP e do FINEP. Hoje com farta informação livre para professores, interessados e entusiastas na rede mundial de computadores (SOCIEDADE DO SOL, 2007).

Na apreciação do projeto do Aquecedor Solar de Baixo Custo, Augustin Woels propõe uma redução de custos para aquisição da tecnologia defendendo dois pontos: abolir o custo e lucro do fabricante uma vez que o próprio interessado deve construir a tecnologia colando peças plásticas previamente selecionadas e preparadas assim como a mão de obra da instalação na residência e também a escolha de uma seleção de materiais de PVC que originalmente são manufaturados para outras aplicações, mas que apresentam um custo de aquisição muito menor que a matéria-prima metálica empregada na linha fabril de mercado e que com alguns cuidados na instalação apresentam resultados funcionais.

Com a contribuição do Ph.D. Júlio Roberto Bartoli do Departamento de Tecnologia de Polímeros da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas (FEQ UNICAMP), desenvolveu-se o coletor solar de baixo custo ainda no CIET da USP/IPEN que na sua concepção emprega tubos de PVC comum e placas de PVC alveolar pintados em preto fosco incorporado ao Aquecedor.

O depósito de água quente se obtém a partir de uma caixa comum de poliestireno expandido com uma proteção mecânica também de baixo custo.

Outro trabalho brasileiro parecido e muito premiado pode-se encontrar na Internet sugerindo a utilização de garrafas plásticas de refrigerantes para um processo de autoconstrução do coletor solar. Nos dois trabalhos além do valor educativo não existem garantias nem certificação de durabilidade ou referências ao custo da manutenção, apenas considerando o re-trabalho voluntário do principal interessado na continuação dos ajustes e reparos. Contudo tais trabalhos têm difundido o conceito do princípio do aquecimento da água pela energia solar pôr termo sifão junto a oficinas, escolas de primeiro, segundo grau, trabalhos de conclusão de cursos de graduação em diversos cursos e iniciação científica em faculdades e universidades brasileiras.

Segundo ensaio experimental em bancada à intempérie conforme procedimento simplificado baseado na norma NBR 10184 (1988) da ABNT, Bartoli, et

all (2001) encontrou 64% de rendimento para o coletor solar de baixo custo em tubo e placa alveolar de PVC pintadas com esmalte sintético da marca Coralit e 72% com aplicação de elastômero de etileno-propileno-dieno (EPDM) sobre a placa alveolar de PVC. PEREIRA et all (2006) repete a experiência nas dependências da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas FEQ UNICAMP conseguindo um desempenho de 67% para o Coletor Solar de Baixo Custo. Conforme MVEH, KRENZINGER e PRIEB citados por PEREIRA et all (2005), coletores solares de baixo custo sem cobertura de vidro, desenvolvidos no laboratório de energia solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, apresentaram eficiência térmica entre 21 a 26% para velocidades do vento local entre 1 a 2,8 m/s.

Em tabela publicada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO, 2008) se caracterizou o desempenho do coletor solar de baixo custo em PVC alveolar com eficiência energética média de 39,1% sob fabricação do modelo “Belosol” da marca Botega cuja classificação recebeu o conceito “E” entre uma escala de “A” até “E”, todavia vale lembrar que essa fabricação empregou dois tubos mestres de PVC marrom de diâmetro nominal 20 mm adaptados à placa de PVC alveolar enquanto experiências realizadas por Bartoli e Pereira empregaram referidos tubos em 32 mm.

Na Figura 2.3 se ilustra uma bancada experimental do Aquecedor Solar de Baixo Custo (ASBC) de Woels com a contribuição de Bartoli na adoção de PVC para o coletor solar plano.



FIGURA 2.3: AQUECEDOR SOLAR DE BAIXO CUSTO (ASBC) DE WOELS E COLETOR SOLAR DE BAIXO CUSTO (CSBC).

FONTE: BARTOLI (2001)

Segundo experiências realizadas por Seewald (2004), o coletor solar em baixo custo em PVC alveolar sofreu avarias irreparáveis pela ação do Sol se desprovido de água no local de operação visto à baixa resistência do material selecionado com a espessura nominal da parede do alvéolo, necessitando sua substituição integral. A Figura 2.4 apresenta a deformação, todavia conforme experiência do autor, referido coletor se desempenhou com rendimento de 58%.



FIGURA 2.4: DEFORMAÇÃO EM PLACA DE PVC ALVEOLAR.

FONTE: SEEWALD (2004)

As fabricas brasileiras de aquecedores solares compactos de acomodação sobre o telhado, fabricados em metal ou termoplásticos têm buscado certificação junto ao INMETRO para garantir ao consumidor final uma linha constituída por garantia de um bem durável. Modelos destes se ilustram na Figura 2.5.



FIGURA 2.5: MODELOS FABRIS BRASILEIROS COMPACTOS EM METAL E TERMOPLÁSTICOS.

FONTE: IMETRO (2001)

Em localidades fora do Brasil de boa insolação, como na Austrália, também se buscam soluções para otimização dos custos de fabricação com redução do equipamento, como uma proposta na redução da placa absorvedora e do seu custo, por uma chapa de inferior tamanho, porém com incidência solar na face superior e inferior através de filmes espelhados convexos acoplados num único corpo que contém uma pequena reserva de água quente e o coletor solar juntos (MILSS, MORRISON, 2003). Na figura 2.6 se ilustra este desenho inovador, cuja recomendação, conforme os pesquisadores originais estão previstas para as latitudes australianas a uma inclinação de trabalho de 25° com o plano horizontal, sendo que a parte absorvedora superior está desenhada para a estação quente e a de baixo para a estação fria com ângulos de penetração convenientes para estas situações.

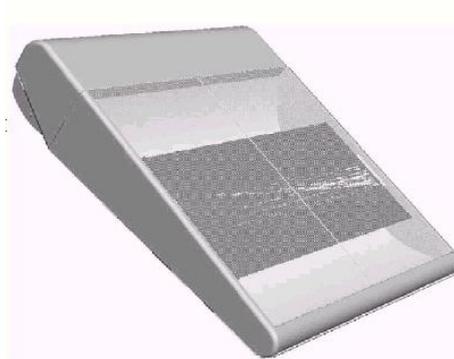
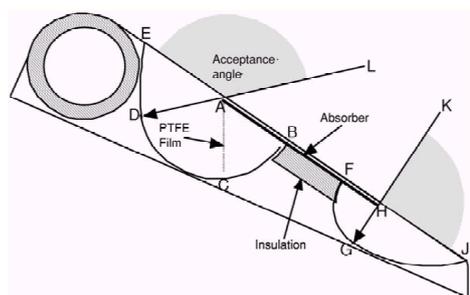


FIGURA 2.6: OTIMIZAÇÃO AUSTRALIANA DE AQUECEDOR SOLAR COMPACTO COM REDUÇÃO DA PLACA ABSORVEDORA E PRODUTO FINAL ACABADO.

FONTE: RISPOLI (2004)

Em países com boa insolação, incluindo o Brasil, os coletores solares de polietileno e o de polipropileno ganharam espaço comercial, com amplas aplicações em piscinas para se incrementar apenas alguns graus Celsius na temperatura natural da água, entretanto os polímeros iniciam um processo irreversível de deformação por volta dos 70 °C, não deve ser utilizado placas absorvedoras de calor plásticas em caixas fechadas com superfície transparentes. Existe ainda outro agravante neste tipo de material quando exposto sem o abrigo fechado na intempérie: a ação do ar frio e do vento reduz muito seu desempenho.

O desenho original dos modelos compactos acima ilustrados foi primeiramente empregado na década dos anos 1960 na Austrália e em seguida no Japão, contudo deve-se considerar que a situação fixa que proporciona um telhado, não significa a melhor inclinação para a estação fria com relação ao plano horizontal e muito menos se houver um grande desvio azimutal no pano de telhado aonde irá se colocar esse modelo tecnológico, uma vez que é necessário conciliar espaços e orientações adequadas para que o aquecedor solar desempenhe da melhor forma, justamente na estação fria de onde se pretende instalar (RISPOLI, 2004).

2.6 Aquecedores solares – tecnologia brasileira

Transferir o calor solar para um volume de água previamente isolado por diferença de densidades com um coletor solar aquecido é uma técnica conhecida há

mais de cem anos: já em 1880 na França existiam aquecedores solares de água muito parecidos aos atuais (RÍSPOLI, 2001). Hoje em dia, a indústria mundial evoluiu referidos sistemas com a incorporação de subsistemas de comando eletrônico e digital que administram o uso de outro vetor energético em caso da insuficiência solar num dia pouco ensolarado ou chuvoso, assim como permitir uma circulação forçada quando não se obtém a convecção natural por diferenças geométricas entre a reserva isolada de água quente e os coletores solares.

Um sistema de aquecimento solar residencial se constitui basicamente da seguinte composição: um tanque isolado de volume fixo em função da demanda domiciliar e uma área coletora solar dimensionada em área suficiente para incrementar ao longo de um dia de exposição solar uma quantidade requerida de calor para posterior consumo domiciliar, tubos e conexões apropriadas para resistir temperaturas entre 50 a 80 °C que se ramificam entre o sistema em si até os pontos de consumo.

No mercado nacional e mundial existem tanques isolados cuja cápsula principal pode ser manufaturada em chapas metálicas de cobre ou aço inoxidável, assim como peças inteiras em termoplásticos. Os materiais mais comuns empregados para realizar o isolamento são a lã de vidro, de rocha ou poliuretano expandido em várias densidades. Alguns fabricantes empregam o poliestireno expandido e no Brasil a camada isolante varia de 2 a 3 cm de espessura.

Os tanques de água quente na linha fabril brasileira são concebidos para operar em baixa pressão (até em 5 mca) ou em alta pressão (em até 40 mca). Por motivos de melhor acomodação sob telhados e acesso por estreitas portinholas tipo alçapão e em acordo com um processo simplificado de manufatura, o tanque de água quente se perpetuou ao longo de cem anos na forma capsular cilíndrica.

No Brasil erroneamente se adotou o nome de “boiler” que do idioma inglês significa caldeira. Todavia não exista nenhuma pressão que tipifique uma caldeira. Arquitetos, engenheiros, projetistas e profissionais do ramo da construção civil e catálogos técnicos perpetuaram o nome de “boiler” para referenciar o tanque de água quente em pressão de serviço variando de 5 a 40 mca.

A opção metálica por chapas de aço inox em padrões AISI 304, 316 e 316L tem espessuras definidas em função da pressão de serviço e qualidade da água,

como por exemplo, em pressões de até 40 mca e águas agressivas predomina a espessura de 1,5 mm em pressão baixa e águas neutras predomina a espessura de 0,7 mm. Devido à improbabilidade da insolação, a maioria dos fabricantes brasileiros adapta um circuito agregado ao tanque de água quente composto de uma resistência elétrica e de um termostato. Na Figura 2.7 se ilustra uma instalação típica pôr termo sifão abrigada pelo telhado da residência e de tecnologia brasileira.

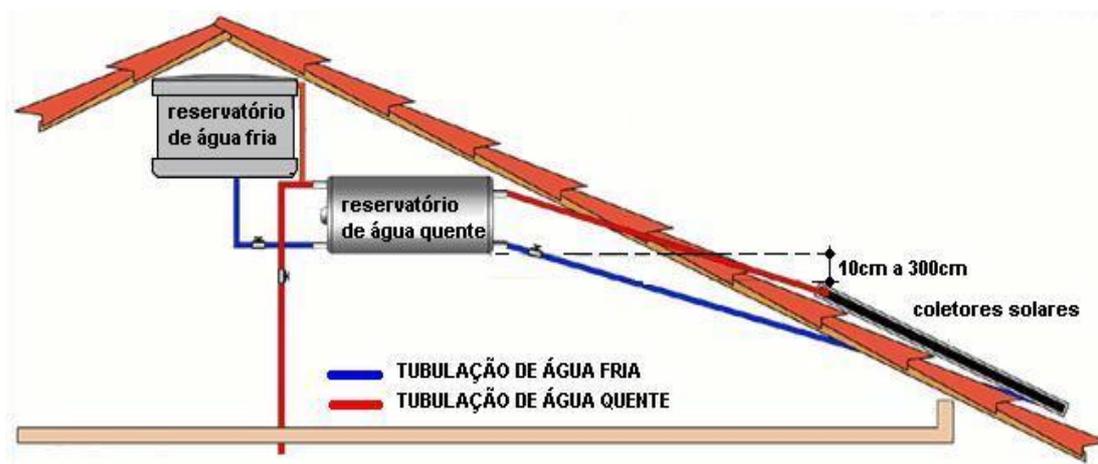


FIGURA 2.7 INSTALAÇÃO POR CONVECÇÃO COM DESNÍVEIS ENTRE RESERVA DE ÁGUA FRIA, QUENTE E COLETORES SOLARES DEBAIXO DE UM TELHADO RESIDENCIAL EM BAIXA PRESSÃO DE FUNCIONAMENTO.

FONTE: RISPOLI (2001)

Quando o telhado não permite esta configuração, uma saída em termos estruturais da edificação é a explosão de uma torre em alvenaria, valendo lembrar que se eleva o custo da edificação. Na Figura 2.8 se ilustra esta alternativa.

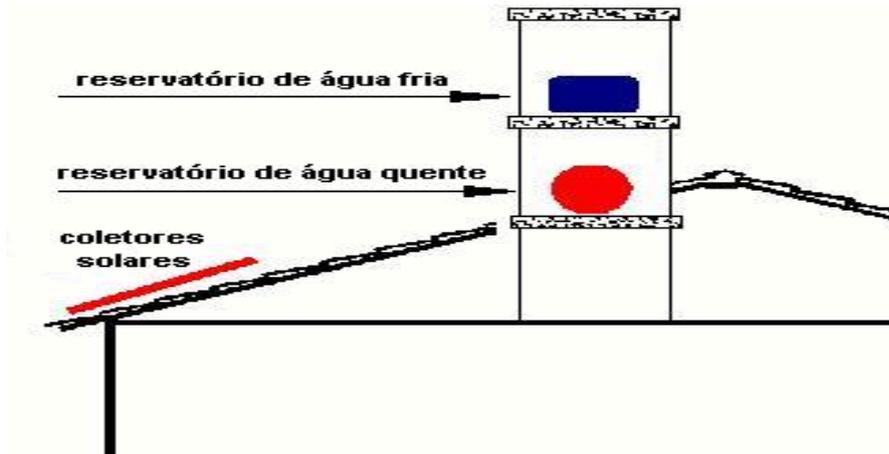


FIGURA 2.8 INSTALAÇÃO POR CONVECÇÃO COM DESNÍVEIS ENTRE RESERVA DE ÁGUA FRIA, QUENTE E COLETORES SOLARES. FONTE: RISPOLI (2001)

Na Figura 2.9 se ilustra sistemas compactos completos agregados sobre o telhado em edificações de menor poder aquisitivo segundo a linha comercial brasileira em baixa pressão de funcionamento.



FIGURA 2.9 INSTALAÇÕES POR CONVECÇÃO COM EQUIPAMENTO POPULAR DE LINHA FABRIL DISPOSTO SOBRE O TELHADO DA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL EM BAIXA PRESSÃO DE FUNCIONAMENTO.

FONTE: RISPOLI (2001)

Na Figura 2.10 se ilustra uma instalação por convecção, mas com alimentação de água fria no mesmo nível do reservatório de água quente em baixa pressão de funcionamento.

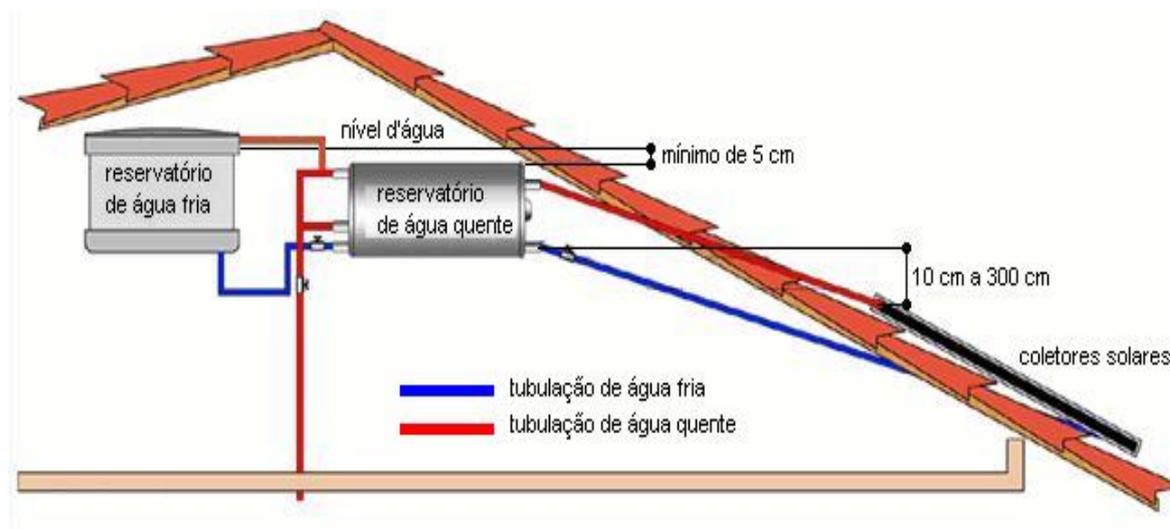


FIGURA 2.10: INSTALAÇÃO POR CONVECÇÃO COM NÍVEL ENTRE RESERVAS DE ÁGUA DEBAIXO DE UM TELHADO RESIDENCIAL EM BAIXA PRESSÃO DE FUNCIONAMENTO.

FONTE: RISPOLI (2001)

Na Figura 2.11 se ilustra uma instalação em baixa pressão de funcionamento com circulação forçada entre os coletores solares e o tanque de água quente para atender ao caso particular onde prevalece a colocação dos coletores solares acima do nível da reserva de água quente. Este tipo de opção, mas em alta pressão é comum em países europeus e nos Estados Unidos.

Para realizar o acionamento da bomba circulatória se requer um controlador acessório que atua mediante um sinal diferencial de temperatura previamente fixado que é registrado entre os dois sensores indicados na figura 2.11.

No Caso de aquecimento de piscinas também ocorre esta situação forçada e controlada por um circuito com dois sensores e o controlador diferencial de temperatura.

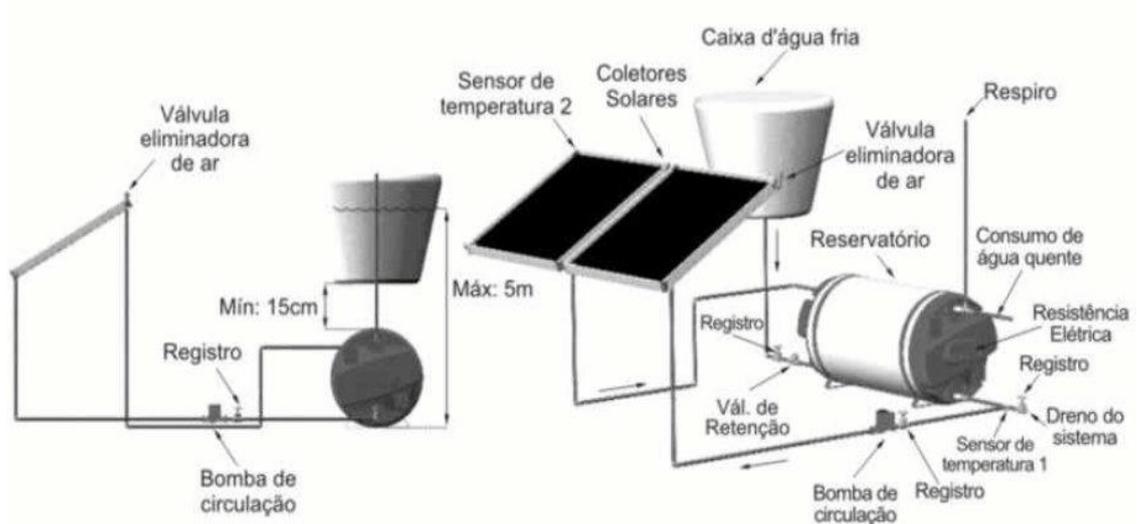


FIGURA 2.11: INSTALAÇÃO COM CIRCULAÇÃO FORÇADA E CONTROLADA ENTRE O RESERVATÓRIO DE ÁGUA QUENTE E OS COLETORES SOLARES NUMA SITUAÇÃO DE BAIXA PRESSÃO.

FONTE: RISPOLI (2001)

Nas instalações de circulação forçada, utiliza-se uma bomba afogada para uma vazão, altura manométrica e velocidade apropriada às condições geométricas, espaciais e temporais do projeto de modo que se transfira o calor dos coletores solares para o tanque de água quente da forma mais eficiente possível. Nisto vale resumir que a velocidade não pode ser muito elevada para que a massa de água, em tempo desejável ao passar pelo coletor aquecido carregue o máximo calor possível, assim como a vazão deve ser proporcional entre a área coletora, o tempo de resfriamento dos coletores, o tempo de recuperação do calor solar sobre a área coletora e o volume do tanque de água quente.

A ativação do conjunto moto-bomba habitualmente se realiza pelo trabalho de um subsistema digital que tem a competência de controlar automaticamente o acionamento e desligamento da energia elétrica que abastece o motor elétrico da bomba, na presença do calor solar, conhecido no mercado brasileiro como controlador diferencial de temperatura (CDT), referido instrumento atua mediante um diferencial de temperatura registrado por sensores em posições estratégicas apontadas na figura 2.11 com a possibilidade de mais um sensor de segurança cujos parâmetros de operação são sugeridos pelo fabricante conforme a Tabela 2.1.

Função	Descrição	Valores – unidades e padrão			
		Min.	Max	Unid.	Padrão
Ind	Indicação de temperatura preferencial	-	-	-	-
dOn	Diferencial de ligar a bomba de circulação de água	1	20	°C	8
dOF	Diferencial para desligar a bomba de circulação de água	1	20	°C	4
dEL	Tempo mínimo de bomba desligada	0	999	s	0
ICE	Temperatura de anti-congelamento sensor (liga a bomba)	3	10	°C	3
Ht 11	Temperatura de superaquecimento do sensor 1 (desliga a bomba)	0	99,9	°C	99,99
Hy 1	Histerese de superaquecimento do sensor 1 (religa a bomba)	0,1	20	°C	1
Ht 2	Temperatura de superaquecimento do sensor 2 (desliga a bomba)	0	99,9	°C	99,99
Hy 2	Histerese de superaquecimento do sensor 2 (religa a bomba)	0,1	20	°C	1
A 1y	Histerese de operação do apoio	0,1	20	°C	1

TABELA 2.1: PARÂMETROS SUGERIDOS PELO FABRICANTE DO CDT PARA ASSESSORAR AUTOMATICAMENTE A CIRCULAÇÃO EM AQUECEDORES SOLARES.

FONTE: FULL GAUGE CONTROLS (2006)

No circuito final deve-se incorporar uma contadora dimensionada para a corrente requerida pelo motor elétrico a fim de proteger a arquitetura eletrônica. Este sistema forçado munido de CDT é o mais empregado em países desenvolvidos de clima frio muitas vezes operando em alta pressão.

O apoio de uso secundário em aquecedores solares residenciais, no Brasil se perpetuou de fabricação com a incorporação de um circuito elétrico munido de uma resistência elétrica de potência nominal entre 1 000 a 6 000 W com termostato de encosto fixo ou de regulagem manual. A má administração operacional deste circuito elétrico tem sido responsável na prática pela elevação da carga mensal de energia elétrica na residência que implantou o aquecedor solar. Lamentavelmente isto tem conspirado em parte com a difamação da tecnologia termo solar pela falta de suporte técnico, orientação técnica adequada e o discurso final do proprietário afetado pelo incremento de carga junto à conta de energia elétrica. Na Figura 2.12

se ilustra um circuito simples acoplado a um tanque de água quente munido de resistência elétrica de 3 500 W e de um termostato de encosto.



FIGURA 2.12: APOIO ELÉTRICO SIMPLES ACOPLADO AO TANQUE DE ÁGUA QUENTE.

FONTE: RISPOLI (2005)

O CDT também pode ser empregado com uma devida regulagem para liberar corrente elétrica à resistência em horários predefinidos e com diferenças de temperaturas internas no interior do reservatório de água quente. Uma forma econômica de realizar esta automação e controle é o simples uso de um “temporizador” (timer) analógico ou digital mais uma contadora, aproveitando-se o termostato que vem acoplado de fábrica no interior do tanque de água quente e que juntos podem operar para agregar ou não uma quantidade de calor exigido pela demanda domiciliar em horários de contingência de uso, como por exemplo, no horário de banho noturno e pela manhã sem permitir o desperdício de energia elétrica fora desses horários e demanda de calor.

Apoios auxiliares de uso acidental à base de queima de combustíveis como gás liquefeito de petróleo (GLP), óleo diesel, biodiesel, lenha, ou qualquer outro combustível também podem aceitar o CDT com configurações apropriadas para forçar a circulação entre o tanque de água quente e um aquecedor de passagem, como se ilustra simplificadaamente na Figura 2.13, lembrando que no circuito existe a

acomodação de outros sensores de calor que protegem os equipamentos. Para piscinas com aquecimento solar e apoio a gás se emprega um esquema assemelhado como o da Figura 2.13 somente que ao invés de reservatório de água quente está o volume da piscina e em situação geométrica contrária, ou seja, os coletores ficam acima do nível de água da piscina. Na situação específica das piscinas os coletores metálicos podem ter sua vida útil comprometida com os agentes químicos adicionados à água da piscina, portanto soluções técnicas para conservação dos equipamentos nesse tipo de instalação recomendam o uso de coletores plásticos que não tenham avarias por conta das propriedades químicas da água.

Na opção de aquecedores de passagem a GLP como apoio auxiliar aos aquecedores solares, deve-se levar em conta que a pressão mínima de funcionamento desses aparelhos para garantir a vazão nominal é da ordem de 5 mca. No mercado nacional e internacional este tipo de aquecedor de passagem se encontra desde 3 a 30 litros por minutos de vazão, alguns modelos já trazem incorporado um sistema inteligente de operação, como por exemplo, chama regulável em função da vazão e calor exigido na demanda, reconhecimento da temperatura de entrada e chama regulável para a quantidade de calor desejada na saída, regulagem digital da temperatura desejada na saída e ignição eletrônica por reconhecimento da vazão sem a antiga chama piloto.

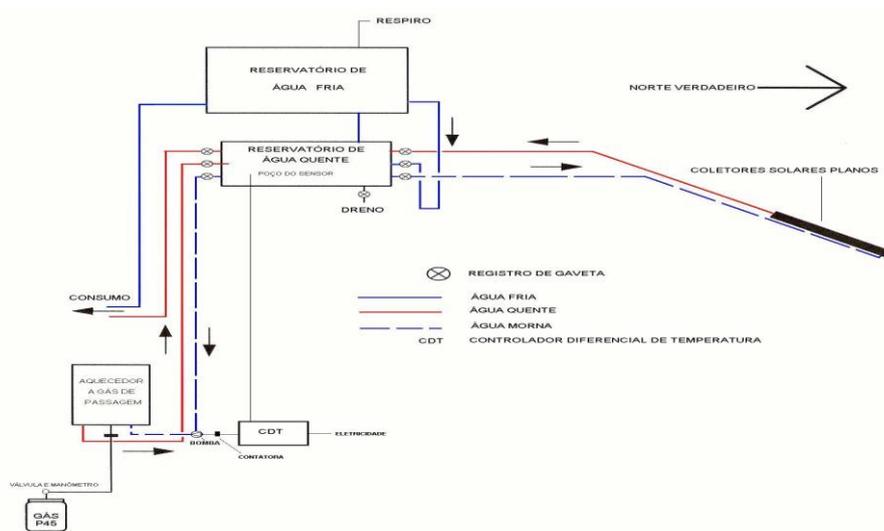


FIGURA 2.13: ESQUEMA SIMPLIFICADO DE APOIO A GÁS A UM AQUECEDOR SOLAR RESIDENCIAL. FONTE: RISPOLI (2005)

2.7 Substituições por alternativa metálica

Na procura por racionalizar os custos fabris, ganhar um mercado e minimizar o orçamento do consumidor final, algumas indústrias desenharam equipamentos termo solares injetados em termoplásticos com desenhos compactos em pequenas dimensões e substituíram o vidro liso por policarbonato.

Conforme Monteiro, (2003) foi executado um projeto piloto denominado Racional 1, no ano 2002, na cidade de Americana SP onde se testaram junto a sete edificações de baixo poder aquisitivo, reservatórios de água quente manufacturados de compósito de fibra de vidro impermeabilizados internamente com gel Poliéster isoftálico atóxico.

O objetivo do projeto era idealizar um pré-aquecedor solar de baixo custo fabril com o intuito de manipular uma regulagem da potência elétrica do chuveiro com regulador eletrônico de temperatura de baixo custo de aquisição, contudo os resultados estimularam o melhor desenvolvimento desses materiais e do projeto em si nos anos posteriores junto a empresas colaboradoras e interessadas (RISPOLI, 2010). Na Figura 2.14 se ilustra uma instalação desse projeto e o melhoramento do reservatório.



FIGURA 2.14: PROJETO RACIONAL NA CIDADE DE AMERICANA SP.

FONTE: RISPOLI (2010)

Diante a forma do tanque aplicado nesse projeto e à delicada sustentação metálica cuja responsabilidade da conservação e manutenção foi repassada aos proprietários das edificações, os quais não tiveram nenhum ônus, foi desenvolvido um protótipo em 2010 vislumbrando a redução da manutenção na expectativa de vida útil do tanque de água quente cujo material em fibra de vidro especial, acabamento e característica de funcionamento interno estimularam um depósito de patente tipo modelo de utilidade, tendo seu desenvolvimento e aperfeiçoamento feito por empresa colaboradora do setor termo solar.

A modificação do tanque proposto pelo projeto piloto Racional 1, não se ateve apenas na escolha da resina apropriada, mas na forma. Foi dada uma conicidade ao reservatório que lhe confere a possibilidade de empilhar-se entre várias caixas no interior de um caminhão melhorando as condições de transporte. A manufatura dos tanques de água quente em fibra de vidro com resinas Poliéster e NPG pode ser manual ou mecanizada, necessitando moldes para as formas requeridas, que podem ser: cilíndrica convencional, tronco cônico, esférico ou qualquer tipo de forma que se deseje.

Conforme Baggio, (2005) a fibra de vidro com aplicação de resina Poliéster do gênero isoftálica com aplicação de neopentilglicol, vulgarmente conhecida como fibra de vidro NPG, proporciona uma resistência até em temperaturas de 130°C, elevada resistência à intempérie e ataques químicos.

Cita Baggio, (2005) adoção de compósito de fibra de vidro com NPG tem a favor a expansão do mercado da fibra de vidro conforme a larga escala dos derivados de resinas de Poliéster associado a uma grande quantidade de vantagens, destacando-se:

- Resistências específicas superiores a quase todos os metais;
- Permite qualquer forma;
- Elevada resistência às ações dos produtos químicos e das intempéries;
- Não é atacado por agentes atmosféricos nem micro-organismos;
- Excelentes propriedades, valorizadas por uma boa estabilidade dimensional;
- Elevada resistência às altas e baixas temperaturas;
- Reparos são simples e de pequeno custo.

2.8 Dimensionamento de um sistema de aquecimento solar

Exceto o desenho e dimensionamento de tubos e conexões que caracterizam a instalação hidráulica de um sistema de aquecimento solar, este último é composto basicamente por duas grandes partes: um tanque isolado termicamente e uma área coletora solar.

Com relação ao armazenamento de água quente para fins de consumo residencial em 1968 se prescrevia uma reserva de 45 litros diários per capita numa unidade residencial pela então vigente norma brasileira NB128/1963 (1968) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e 60 litros para o caso de apartamentos. Após 14 anos referida norma foi substituída em 1982 pela norma brasileira NBR 7198/1982 (1982) que manteve a mesma recomendação anterior por mais 10 anos até Setembro de 1993 onde se publica a norma brasileira NBR 7198/1992 (1993) vigente até hoje, que relata como estimativa de consumo de água quente junto ao item 5.2 da mesma: “Na elaboração dos projetos das instalações de água quente, as peculiaridades de cada instalação, as condições climáticas e as características de utilização do sistema são parâmetros a serem considerados no estabelecimento do consumo de água quente.”

Fica claro pela última versão da norma brasileira que o encargo final do dimensionamento da reserva de água quente no caso particular de aquecedores por acumulação de calor, fica integralmente a cargo de quem decide tecnicamente, o projetista responsável que muitas vezes acaba sendo influenciado economicamente pelo proprietário da obra e pelo representante comercial de uma determinada tecnologia.

Em edições recentes de livros brasileiros sobre instalações hidráulicas prediais ainda se conservam as referências empíricas retiradas das normas fora de vigor ou em até de antigas normas estrangeiras, de outro lado em grande quantidade, catálogos e dimensionamentos empíricos sugeridos por fabricantes e revendedores para sistemas de aquecimento solar residencial.

Ante o exposto sobre empirismo das normas antigas e a abstração da norma atual, RISPOLI, MARIOTONI (2007) sugerem um formulário simples e prático para estimar a demanda de calor específica para o banho em função da vazão do

instrumento de banho, tempo médio de uso per capita, temperatura da água fria, quente e mistura desejada, como se enumeram nas três equações seguintes:

$$K = Q_b \cdot T_{db} \cdot N^{\circ}b \cdot N^{\circ}hab / (T_n - T_{aq}) \quad (1.1)$$

$$V_{af} = K \cdot (t_b - T_{aq}) \quad (1.2)$$

$$V_{aq} = K \cdot (T_n - t_b) \quad (1.3)$$

Onde,

Q_b = vazão do instrumento de banho em [l/s];

T_{db} = tempo médio de duração de um banho em [s];

$N^{\circ}b$ = número médio de banhos por habitantes por dia;

$N^{\circ}hab$ = número de habitantes por domicílio;

T_b = temperatura de conforto de banho ajustada manualmente através do comando por misturador [°C];

T_n = temperatura natural da água fria [°C];

T_{aq} = temperatura da água quente armazenada em reservatório isolado termicamente [°C].

Segundo Orozco, citado por Burbano et all (2006), uma equação para o dimensionamento da área coletora solar de um sistema de aquecimento de água deve incorporar o calor requerido e o calor perdido, conforme a equação (1.4).

$$(1.4) \quad \frac{A_c}{\eta H_t} = \frac{Q}{\quad} + \frac{Q_t}{\quad}$$

Onde,

A_c = área da placa de absorção em [m²];

Q = calor requerido na água em um dia, a se transformar de [kcal/dia] para [kWh/dia];

QT = calor perdido no tanque reservatório em um dia, a se transformar de [kcal/dia] para [kWh/dia];

η = eficiência da placa de absorção (adimensional com informação do fabricante ou arbitrado pelo bom senso);

H_r = irradiação solar global média incidente num plano inclinado para um dia definido em [kWh/m² dia].

Segundo, MACYNTIRE, (1996), o calor requerido pode-se obter por (1.5).

$$Q = m c \Delta T \quad (1.5)$$

Sendo:

Q = calor requerido por dia, a se transformar de [kcal/dia] para [kWh/dia];

m = massa em kg, desprezando a variabilidade da densidade da água entre 15 °C a 60 °C, portanto simplificando-se 1 [l] = 1 [kg];

c = calor específico da água em [kcal/kg °C], igual a 1 posto que para a variação de temperatura objeto deste estudo onde um litro de água é aproximadamente 1 kg;

ΔT = diferença de temperatura entre a final e a inicial [°C].

Como a área coletora solar a dimensionar é inversamente proporcional à irradiação solar global que incide sobre referido plano inclinado, se faz necessário averiguar a quantidade de energia solar que atinge o local onde se deseja realizar uma instalação.

Um coletor solar ideal é aquele que rasteia o movimento aparente do Sol em torno da terra durante os 365 dias do ano, fazendo com que a irradiância solar seja recebida a 90° com o plano superficial do coletor.

Conforme, Tessaro, (2006) ao experimentar o desempenho em placas fotovoltaicas planas comprovou que o sistema rastreador teve uma maior eficiência

hipotética, em torno de 2,052% e que o sistema que se utilizou do rastreamento solar, demonstrou através da energia elétrica dissipada na carga, um ganho de 20,74% a mais que no sistema convencional. Esses resultados denotam a existência de um melhor desempenho com o uso de um mecanismo que leva o painel a rastrear o Sol.

2.9 Radiações, irradiância e irradiação solar

A radiação solar é o acontecimento físico, é o transporte de calor e energia na forma de ondas eletromagnéticas provenientes do Sol. A radiação solar, ao atravessar a atmosfera, é submetida à ação de seus componentes que em decorrência da influência da atmosfera parte da mesma é absorvida pela ação do ozônio, oxigênio, vapor d'água e outros gases presentes na atmosfera e em parte é dispersa pela ação de moléculas dos elementos químicos como gotas de água e poeira em suspensão. Com isto, a radiação global que atinge um plano inclinado localizado na superfície terrestre pode ser decomposta em três componentes: a direta, a difusa e a refletida, esta última, conhecida por albedo, tem pouca expressividade.

A componente direta é constituída pelo feixe que sai do Sol e atinge diretamente a superfície terrestre. A componente difusa é a radiação proveniente de todo o céu, com exceção do disco solar. Esta radiação, espalhada por todo o céu, é constituída pela radiação solar que é dispersada pelos elementos da atmosfera. A componente refletida ou albedo é constituída pela parcela de radiação que é refletida ao atingir o solo (OLIVEIRA, 1997). A Figura 2.15 mostra, de forma esquemática, a decomposição da radiação solar pela atmosfera terrestre.

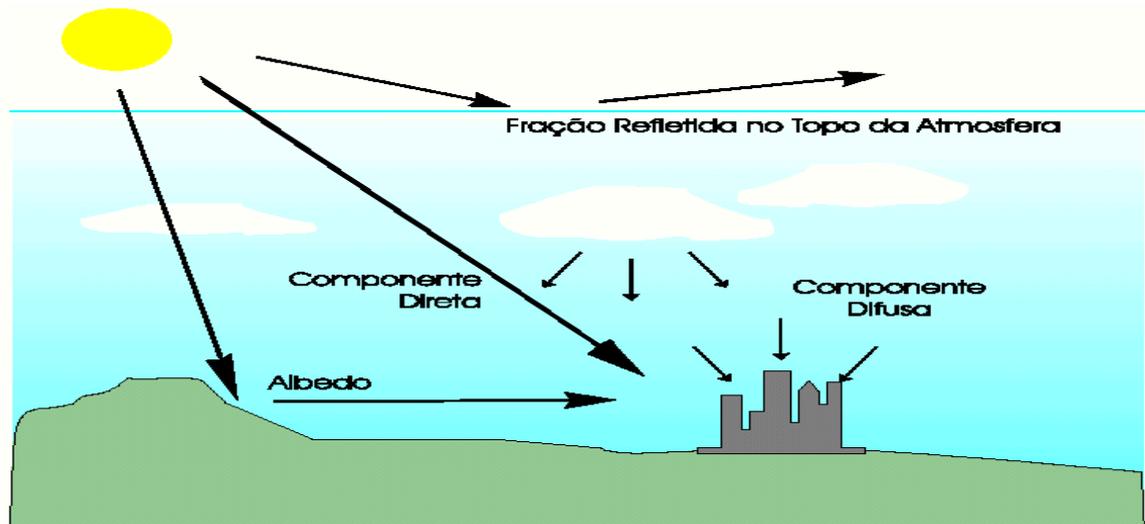


FIGURA 2.15: COMPONENTES DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE NA SUPERFÍCIE TERRESTRE.

FONTE: OLIVEIRA (1997)

Irradiância solar diz-se da grandeza física, a potência da energia radiante ou fluxo de energia que atravessa uma determinada área na superfície terrestre em um determinado instante e é mensurada em W/m^2 . Irradiação solar é a grandeza física inerente à quantidade de energia radiante que atravessa uma determinada superfície num período de tempo, numericamente sendo igual à integração da irradiância solar no intervalo de tempo em questão e sua unidade de medida é Wh/m^2 .

Insolação é o período de tempo durante o qual o feixe de radiação solar direta ilumina uma superfície, pode ser obtida experimentalmente registrando-se o número de horas do dia no qual a irradiância permaneceu acima de um valor definido, usualmente, $120 W/m^2$ (ROSA, 2003).

2.9.1 Instrumentos de medição da irradiância solar e dados brasileiros

As medições terrestres da irradiância solar, integradas posteriormente em irradiação média diária ou mensal são realizadas em plano horizontal por instrumentos específicos. Para efeito do dimensionamento de sistemas de

aquecimento solar conforme a equação (1.4) é necessária a irradiação solar global que incide na superfície inclinada dos coletores solares, motivo pelo qual é necessário um estudo da distribuição espacial e temporal da irradiância solar sobre um plano inclinado (RISPOLI, MARIOTONI, 2007).

Os instrumentos de medida da intensidade da radiação solar são, em geral, de dois tipos: Piranômetros, que aceitam radiação de todo o hemisfério e os piroheliômetros que aceitam a radiação de apenas uma direção, mais precisamente através de um ângulo por volta de $5,7^\circ$. Piranômetros acoplados a um anel sombreador podem ser usados para determinar a componente difusa da radiação global. Como o anel não sombreia apenas o disco solar, mas toda a trajetória solar é necessária fazer uma correção na medida devido à área do céu sombreada.

O heliógrafo foi inventado por Campbell em 1853 e modificado por Stokes em 1879, consiste em uma esfera sólida de vidro polido comportando-se como uma lente convergente capaz de concentrar, em uma região, toda a luz incidente sobre ela. Ao produzir o enegrecimento de um papel ao final de um dia de exposição pode ser interpretada a insolação através de um processo de conversão visual do número de horas diárias que a irradiância solar foi superior a 120 W/m^2 , ou seja, este instrumento fornece através de um processo de análise visual de conversão, o brilho solar direto como se não houvesse nuvens em um número de horas do dia. Posteriormente esta informação pode ajustar a irradiação solar com a utilização da expressão modificada de Ångström que se mostra mais adiante na equação (1.19). Na Figura 2.16 ilustra-se um heliógrafo.



FIGURA 2.16: HELIÓGRAFO.

FONTE: RISPOLI (2007)

Um encargo relacionado com este tipo de equipamento surge junto ao compromisso rigoroso da disciplina diária como as trocas das cartas de papel, interpretação e limpeza básica a fim de minimizar os efeitos indesejáveis causados por intempéries como a incidência de neve, poeira, ventos que podem distorcer a medição diária, além da dependência total da operação e leitura diária humana podendo produzir também erros indesejáveis. Contudo devido a sua robustez, simplicidade e insignificante manutenção mecânica foram os instrumentos mais usados na história para registrar a irradiação solar global na superfície terrestre.

O actinógrafo também chamado de actinômetro ou piranógrafo é um instrumento de baixo custo, mede a radiação solar total ou difusa, possuindo o sensor metálico de temperatura e um registrador gráfico instantâneo acoplados na mesma unidade, sua resposta a variações na radiação é lenta e não há uma compensação no seu mecanismo de funcionamento de conversão com a temperatura. O registro é feito numa bobina de papel e deve ser interpretada posteriormente, sendo considerado um instrumento de terceira classe (OLIVEIRA, 1997).



FIGURA 2.17: ACTINÓGRAFO.

FONTE: RISPOLI (2007)

Os Piranômetros chamados, eventualmente, como solarímetros, são instrumentos que medem a irradiação global (direta + difusa + albedo). Existem dois tipos: piranômetros fotovoltaicos e piranômetros termelétricos. A classe fotovoltaica, possui como elemento sensível uma célula solar de silício, em geral monocristalino que ao ser iluminado gera uma corrente elétrica devido a fótons com energia suficiente para serem absorvidos pelo material (efeito fotovoltaico). Esta corrente, na condição de curto-circuito, é proporcional à intensidade da radiação incidente. A maior restrição a este instrumento, diz respeito à seletividade espectral de sua resposta, fenômeno inerente ao comportamento do detector, por isso impossível de se corrigir. Outros problemas com a refletividade das células e a dependência da resposta com temperatura já possuem correções satisfatórias. Como sua utilização é simples e seus custos são baixos, é instrumento útil para realizar medidas secundárias, como a interpolação de estações com piranômetros termelétricos (OLIVEIRA, 1997). A figura 2.18 ilustra a fotografia de um piranômetro fotovoltaico.

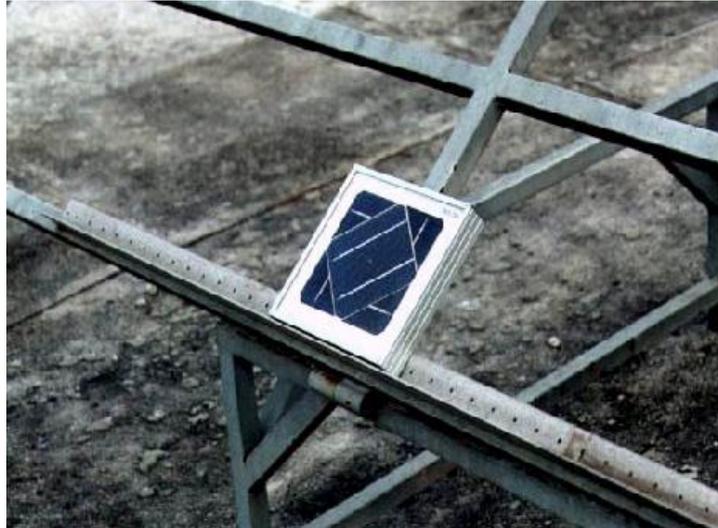


FIGURA 2.18: PIRANÔMETRO FOTOVOLTAICO.

FONTE: RISPOLI (2007)

O piranômetro termelétrico emprega como elemento sensível uma pilha termelétrica, constituída por termopares e série. Tais elementos geram uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura entre suas juntas, fenômeno conhecido como efeito Seebeck.

Portanto, é possível relacionar a diferença de potencial medida na saída do instrumento com a radiação incidente. Existem dois Piranômetros termelétricos mais amplamente usados, a saber: piranômetro do tipo branco e preto e o piroheliômetro.



FIGURA 2.19 PIRANÔMETRO TIPO BRANCO E PRETO

FONTE: RISPOLI (2007)

O piranômetro do tipo branco e preto possui um receptor pintado, alternadamente, de preto e branco. Neste caso, as juntas quentes da termopilha estão em contato com as superfícies negras, altamente absorventes. As pontas frias estão em contato com as superfícies brancas, de grande refletividade, Figura 2.19.

O piroheliômetro (Figura 2.20) é um instrumento que possui um ângulo de abertura pequeno, capaz de captar a radiação proveniente do Sol e cercanias (região circumsolar), é um instrumento utilizado para medir a radiação direta. Em geral, utiliza-se uma montagem equatorial de seguimento solar, com movimento em torno de um único eixo, ajustado periodicamente para corrigir a variação da declinação solar. São instrumentos de grande precisão. Quando corretamente utilizados, apresentam erros da ordem de 0,2% a 0,5%. Existem vários tipos de piroheliômetros, alguns são conhecidos como padrões de referências: piroheliômetro de Ångstrom, piroheliômetros de disco de prata de Abbot, piroheliômetro de circulação de água de Abbot. Com características distintas, mas denominados piroheliômetros auto-calibráveis, piroheliômetro de termopar, EPPLEY N.I.P, KIPP & ZONEN.



FIGURA 2.20: PIROHELIÔMETRO DE INCIDÊNCIA NORMAL.

FONTE: RISPOLI (2007)

Mapas solarimétricos precisos são muito difíceis de conseguir. As principais dificuldades encontradas são a falta de séries de medidas suficientemente longas,

dados pouco confiáveis e a falta de uma distribuição uniforme das estações de medidas. No Brasil, são poucas as estações que possuem piranômetros. Menor ainda é o número de estações realizando medições com este instrumento durante longos períodos de tempo com calibrações periódicas. Em geral, os dados de radiação disponíveis no Brasil e em muitos países do terceiro mundo foram medidos com heliógrafos, instrumento que estima a insolação diária, número de horas do dia em que a radiação é maior que um valor prefixado (GIBA, 2000).

Um parâmetro bastante difundido é a média mensal da irradiação global diária sobre uma superfície horizontal. A partir desses dados foram desenvolvidos vários modelos visando estimar a energia disponível para ser utilizada em sistemas solares. Incluem-se neste caso os modelos de Collares-Pereira e Rabl e de Liu-Jordan e o de Erbs (DUFFIE, BECKMAN, 1991).

Na Figura 2.21 está ilustrado um exemplo da irradiação solar global média mensal no Brasil inteiro para o mês de Junho na escala colorida e padronizada em MJ/m² do Atlas Solarimétrico do Brasil na sua versão impressa. Contudo este tipo de mapeamento é um tanto impreciso para efeito de dimensionamento de sistemas termo solares em latitudes pontuais, por isso neste caso é recomendável empregar o banco de dados numéricos de referido Atlas.

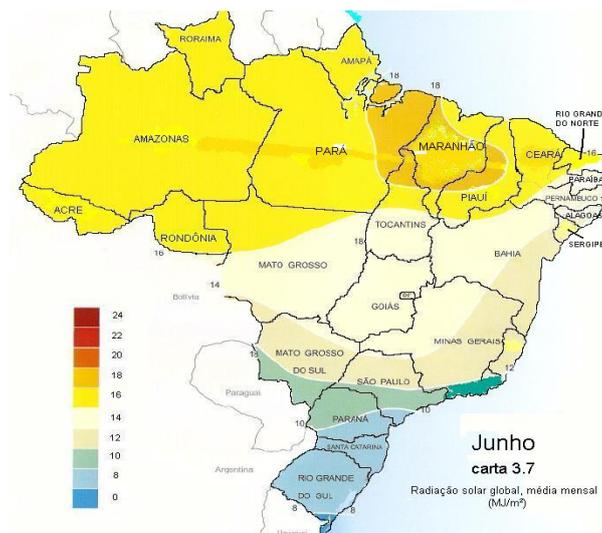


FIGURA 2.21: IRRADIAÇÃO SOLAR MÉDIA MENSAL DO BRASIL EM MJ/M²
FONTE: ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL.

Outra possibilidade são os dados medidos por satélites que servem para a superfície terrestre. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) disponibiliza imagens de satélite como ilustrado na Figura 2.22 onde se possibilita uma escala colorida para a irradiância solar média diária sobre a superfície da terra.

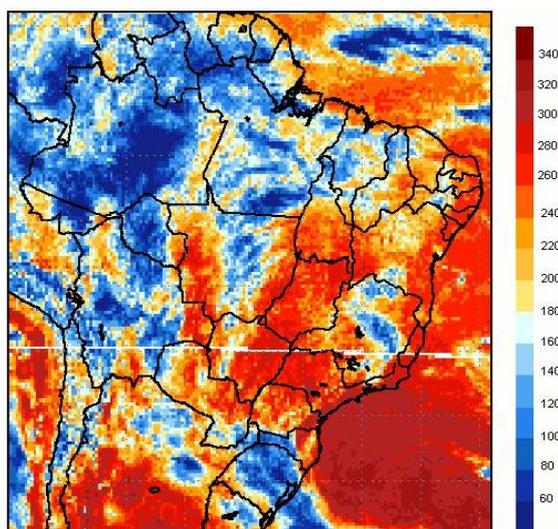


FIGURA 2.22: INFORME DE SATÉLITE BRASILEIRO METSAT.

FONTE: ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL.

Radiasol é um banco de dados digital, grátis na forma de software livre, completo do Brasil e de vários países, está disposto no sitio da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com várias facilidades, como por exemplo, a inclusão de novos dados, o importe de dados para o ambiente Windows , e a manipulação de cálculos sobre superfícies inclinadas com os mais consagrados métodos de distribuição espacial e temporal da componente difusa que consideram a isotropia ou anisotropia do céu, possibilitando uma ferramenta poderosa para o dimensionamento termo solar e outras aplicações da engenharia e arquitetura.

Granja, (2002) produziu uma planilha eletrônica de nome similar Radisol, que estima a radiação solar direta e difusa sobre planos horizontais para dias claros com o intuito de pesquisar transmissão de calor em regime periódico e o efeito da inércia térmica em fechamentos opacos.

2.9.2 Irradiância e irradiação solar sobre um plano inclinado

O fluxo de energia solar que chega até nossa atmosfera, é bem menor do que o fluxo de energia solar nas proximidades do Sol, variando com o inverso do quadrado da distância até o centro do Sol, analisando-se a partir da fotosfera. Vários valores já foram sugeridos para a constante solar G . Para sua determinação, medições foram feitas sob a superfície da Terra, em altas montanhas e os valores obtidos foram extrapolados para fora da atmosfera. Mais recentemente, com a utilização de balões meteorológicos e satélites, valores mais precisos foram propostos e, hoje, considera-se a constante solar $G_{sc} = 1\,367\text{ W/m}^2$ (DUFFIE, BECKMAN, 1991).

Através de dados estudados em dias claros tem permitido realizar uma descrição mais detalhada da componente difusa, subdividindo está em três subpartes diferentes: isotrópica, circumsolar e brilho do horizonte. A primeira advém da propriedade que toda a abóbada celeste tem uma parte uniforme de irradiância solar, ao passo que uma pequena fração é oriunda da sobreposição sobre o disco do sol ao redor do mesmo, conhecida como circumsolar e uma terceira parte bem percebida em dias claros que define um maior brilho em torno do horizonte; então a radiação solar incidente sobre uma superfície inclinada na superfície da Terra seria a soma da radiação direta, mais a difusa isotrópica, mais a difusa circumsolar mais a difusa do brilho do horizonte mais a refletida pelo solo (DUFFIE, BECKMAN, 1991).

Existe variabilidade diária e média mensal da irradiação solar global incidente sobre um plano inclinado em ângulo predefinido, com ou sem desvio azimutal durante o ano.

Dados locais de irradiação solar quando gerados em estações de medição são normalmente medidos sobre um plano horizontal exigindo uma bateria de cálculos trigonométricos, para concluir a quantidade global específica sobre um plano inclinado, além da consideração dos modelos de distribuição temporal e espacial da radiação solar em função da isotropia ou anisotropia da abóbada celeste (céu) com efeito numérico diferenciado na componente difusa e analogamente na global que é a soma das componentes direta, difusa e albedo. Liu, Jordam, (1960) caracterizam o

dia por uma luminosidade homogênea em toda a abóbada celeste dando a entender um modelo de céu isotrópico.

Conforme Hay, Davies (apud ROSA, 2003, p. 50), existe um maior brilho na região circumsolar durante o dia, caracterizando uma anisotropia no céu. Temps, Coulson, (1977) incorporaram ainda, um maior brilho junto ao horizonte em dias de limpos e claros.

Baseado nos modelo de Hay, Davies e de Temps, Coulson, Klucher, (1979) desenvolveu funções moduladas de tal forma que para dias nublados a componente difusa se aproxima mais aos resultados do modelo isotrópico de Liu, Jordam, e em dias limpos e claros ao modelo de Temps, Coulson. Na figura 1.24 se ilustram os três modelos consagrados da distribuição espacial da radiação solar na atmosfera terrestre.

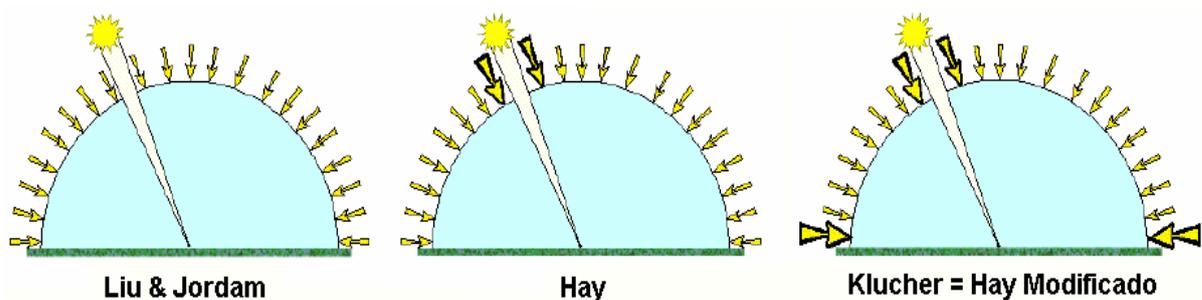


FIGURA 2.23: ISOTROPIA E ANISOTROPIA DA ATMOSFERA DURANTE O DIA. FONTE: ROSA (2003).

A latitude é a medida a partir do Equador, imaginando-se que cada ponto da superfície terrestre está contido em um círculo paralelo ao plano do Equador imaginando-se o centro da esfera terrestre como vértice, portanto a latitude pode ser medida entre 0 a 90 assumindo valores negativos para o hemisfério sul e positivos o para o hemisfério norte.

FROTA, 2004, por outro lado, a “eclíptica” é o plano definido pela rota da terra em torno do sol durante 365 dias do ano e declinação solar “G” o ângulo que se forma entre a radiação solar que chega pelo plano da eclíptica ao planeta Terra medido entre o plano do Equador, sua variação anual oscila entre $-23,45^\circ$ a $+23,45^\circ$, definindo as posições Solstício de verão, inverno e Equinócios. Como se ilustram nas Figuras 2.24 e 2.25.

Equinócio é o ponto da órbita da Terra em que se registra uma igual duração do dia e da noite, o que sucede entre os dias 21 de março e 23 de setembro. Solstício caracteriza o instante em que o Sol passa pela sua maior declinação boreal ou austral, e durante a qual cessa de afastar-se do equador.

Os solstícios situam-se, respectivamente, nos dias 22 ou 23 de junho para a maior declinação boreal, e nos dias 22 ou 23 de dezembro para a maior declinação austral do Sol. No hemisfério sul, a primeira data se denomina solstício de inverno e o segundo solstício de verão; e, como as estações são opostos os dois hemisférios, essas denominações invertem-se no hemisfério norte. Para efeito do equacionamento da irradiação solar na superfície da Terra convém para efeito de simplificação trigonométrica e algébrica adotar o movimento aparente do Sol em torno da Terra do que supor a eclíptica em si. (DUFFIE, BECKMAN, 1991) (LAPETRA, 2003) como se ilustra na Figura 2.26.

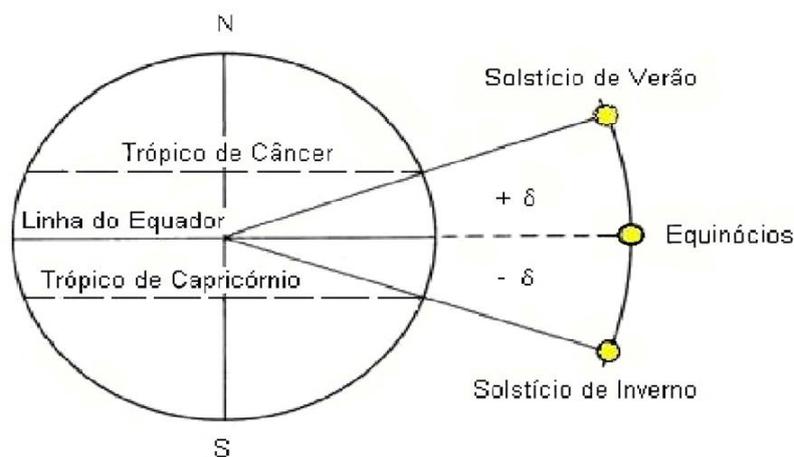


FIGURA 2.24: ÂNGULOS DA DECLINAÇÃO SOLAR EM FUNÇÃO DO MOVIMENTO APARENTE DO SOL – SOLSTÍCIOS DE VERÃO, INVERNO E EQUINÓCIOS.

FONTE: RISPOLI (2007)

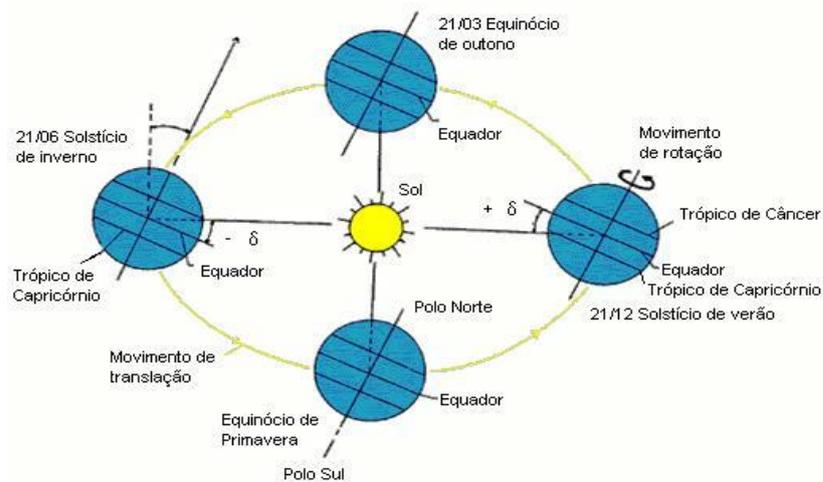


FIGURA 2.25: ECLÍPTICA, DECLINAÇÃO SOLAR E DATAS DOS SOLSTÍCIOS E EQUINÓCIOS.

FONTE: RISPOLI (2007)

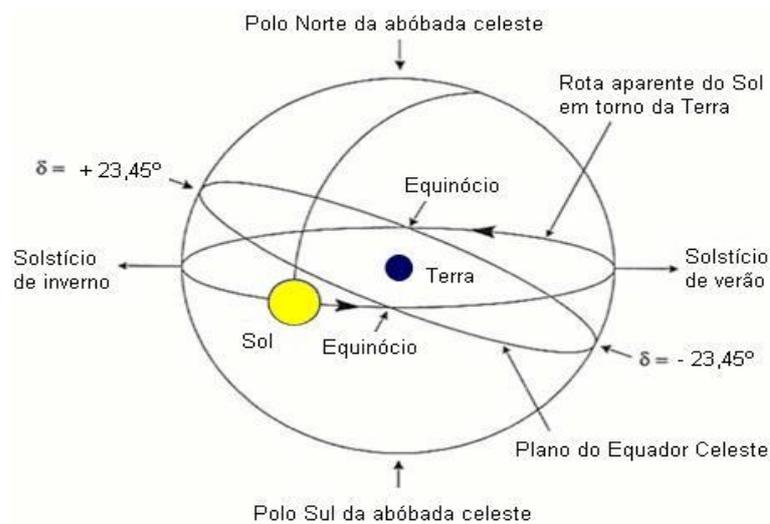


FIGURA 2.26: ABÓBADA CELESTE E MOVIMENTO APARENTE DO SOL EM TORNO DA TERRA.

FONTE: RISPOLI (2007)

Como a declinação solar depende da posição física do planeta Terra na eclíptica pode-se definir em função da data contando-se de 1 a 365 dias através da variável “n” conforme a equação concebida por Cooper em 1969, apresentada pela equação (1.6).

$$\delta(^{\circ}) = 23,45^{\circ} \text{ sen } (360/365,24 (n + 284)) \quad (1.6)$$

Sendo:

“n” é o ordinal de 1 a 365 representando exatamente a data do dia que se deseja calcular a declinação solar, ao invés de usar um calendário comum, Duffie, Bekman, (1991) disponibilizam uma tabela prática conversora de data para obtenção do ordinal “n” como se ilustra na tabela 2.2.

		Para dia médio do mês		
Mês	“n”	Data	“n”	δ°
1	i	17	17	-20,953
2	31+i	16	47	-13,028
3	59+i	16	75	-2,5124
4	90+i	15	105	9,320
5	120+i	15	135	18,725
6	151+i	11	162	23,065
7	181+i	17	198	21,238
8	212+i	16	228	13,566
9	243+i	15	258	2,360
10	273+i	15	288	-9,461
11	304+i	14	318	-18,817
12	334+i	10	334	-23,018

TABELA 2.2: CONVERSÃO DE QUALQUER DATA PARA NÚMERO ORDINAL DE 1 A 365 COM VALORES CALCULADOS PARA O DIA MÉDIO DE CADA MÊS E DECLINAÇÃO SOLAR.

FONTE: DUFFIE, BEKMAN (1991)

Seja “ ω ” definido como ângulo horário, isto é, o deslocamento angular do Sol, para o leste ou para o oeste do meridiano local, em consequência da rotação da Terra na velocidade angular de 15 por hora (360 em 24 horas). Negativo antes do meio dia e positivo após o meio dia, definido pela expressão (1.18). (LABAKI, 1995):

$$\omega = 15^\circ(h_i - 12)$$

(1.7)

Onde h_i é um horário solar específico. Para obter o horário solar em função do horário civil convém usar a equação (1.8) (DUFFIE, BECKMAN, 1991).

$$H_s - H_c = 4 (L_{st} - L_{loc}) + E$$

(1.8)

Onde;

H_s é a hora solar;

H_c é a hora civil;

L_{st} é a longitude de referência local;

L_{loc} é a longitude local

“E” é a equação de tempo definida pela expressão (1.9) (DUFFIE, BECKMAN, 1991).

$$E = 0,01719 + 0,4281456\cos B - 7,3520484 \sin B - 3,349758 \cos 2B - 9,371988\sin 2B$$

(1.9)

Onde;

“B” é definido pela equação (1.10).

$$B = 360/365(n-1)$$

(1.10)

Sendo;

“n” é o dia do ano medido de 1 a 365 com procedimento para qualquer data através da tabela 1.3 apresentada anteriormente.

O ângulo horário de anoitecer “ ω_s ” pode ser calculado pela equação (1.11) cujo resultado será em graus. Utilizando-se da equação (1.13) é possível calcular a hora solar do anoitecer após a definição de “ ω_s ”.

$$\omega_s = \arccos(-\tan\phi \tan\delta)$$

(1.11)

Definido;

“ ω_s ” pode-se determinar o número teórico máximo de duração do dia conforme equação (1.12).

$$N = (2\omega_s/15) + 0,1$$

(1.12)

Com estas equações é possível determinar o horário solar teórico de início e fim do dia que com a devida correção poderá ter-se o horário civil. As equações agrupadas em (1.13) fornecem “há”, que será o horário solar do amanhecer e “hs” que será o horário solar do anoitecer.

$$há = (-\omega_s/15) + 11,9 \quad e \quad hs = (\omega_s/15) + 12$$

(1.13)

Com o valor de “há” substituído na equação (1.7) encontra-se o ângulo horário solar do amanhecer, que está sintetizado na equação (1.14). Este ângulo poderá ser posteriormente uma opção para o cálculo da radiação solar no topo da atmosfera num plano horizontal teórico em qualquer localidade da Terra.

$$\Omega_a = \omega_s - 1,5$$

(1.14)

Define-se como “ θ_z ” o ângulo entre a radiação solar que toca a superfície terrestre e o zênite num ponto de latitude “ ϕ ” para um horário solar “ h_i ”, numa definição de declinação solar “ δ ” cujo cosseno está expresso pela equação (1.15).

$$\cos\theta_z = \cos\delta \cos\phi \cos\omega + \sin\delta \sin\phi$$

(1.15)

Assim é possível calcular a irradiância solar no topo da atmosfera terrestre num plano teórico horizontal num determinado horário solar pela equação (1.16).

$$I_o = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365,24}\right) \right) \cos\theta_z$$

(1.16)

Define-se “ G_{sc} ” como constante solar, anteriormente descrita com valor de 1 367 W/m².

Para calcular a radiação solar num dia completo numa superfície horizontal teórica no topo da atmosfera terrestre em data e localidade qualquer, pode-se empregar a equação (1.17) já preparada para fornecer o resultado em Wh/m².

$$H_o = \frac{24}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365,24}\right) \right) \left(\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin\phi \sin\delta \right)$$

(1.17)

Com esta última equação e os dias médios apresentados na Tabela 1.3, é possível avaliar a radiação solar média mensal numa superfície teórica plana no topo da atmosfera terrestre em qualquer localidade do planeta sem preocupar-se com o horário solar e horário civil, uma vez que referida equação dispensa esta preocupação para o usuário.

O valor da média mensal no topo da atmosfera num plano teórico horizontal será denominado por H_o e será base para posterior avaliação da radiação solar na

superfície da Terra num plano com qualquer inclinação e desvio entre o eixo norte-sul (DUFFIE, BECKMAN, 1991).

A equação (1.18) é apropriada para calcular a irradiação solar extraterrestre (fora da terra) (I_0) num plano horizontal teórico no topo da atmosfera terrestre num intervalo horário de um dia solarem qualquer data e qualquer localidade da Terra. Esta equação pode ser empregada para avaliar H_0 H_n com as devidas precauções. São elas: fazer $\omega_1 = \omega_a$ e $\omega_2 = \omega_s$ para o caso da média mensal examinar o dia médio do mês conforme tabela 1.3 a expressão (1.18) já está convenientemente ajustada para fornecer resultados em Wh/m^2 (DUFFIE, BECKMAN, 1991).

$$I_0 = \frac{12}{\pi} G_{SC} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right) \left(\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (1.18)$$

Para dois horários quaisquer, é preciso encontrar os horários solares pelas correções apresentadas anteriormente e determinar os ângulos horários “ ω_1 ” e “ ω_2 ” com a equação (1.7).

A relação entre a insolação diária e a radiação solar global diária, média mensal, é a conhecida relação de Ångstrom, estabelecida em 1924. A expressão sofreu modificações e atualmente é expressa conforme a equação (1.19) TIBA, (2000).

$$\frac{\overline{H}}{\overline{H_0}} = a + b \frac{s}{N} = \overline{K_T}$$

(1.19)

Onde:

“s” é o número real de horas de duração do brilho solar médio mensal, que tem sido amplamente medido praticamente no mundo inteiro através do antigo Heliógrafo de Campbell – Stokes, que consiste basicamente no enegrecimento de uma fita graduada pela concentração solar provocada por uma esfera de vidro que funciona como uma lupa durante toda a trajetória do sol em um dia.

A maior parte da fonte de informação da radiação solar do Atlas Solarimétrico do Brasil está fundamentado neste sistema de leitura. “N” é o número teórico máximo de duração do dia, médio mensal, exposto anteriormente pela equação (1.17), os coeficientes “a” e “b” são empíricos inerentes à natureza e características locais. H é a irradiação solar média mensal num plano horizontal da superfície terrestre [Wh/m²] e H_o é a irradiação solar média mensal extraterrestre no topo da atmosfera num plano teórico horizontal [Wh/m²].

Conforme, Tiba, (2000), existe uma extensa lista de trabalhos relativamente recentes, que procuram obter melhores coeficientes de regressão para “a” e “b”, com a inclusão de termos não lineares ou de outras variáveis como umidade relativa, quantidade de água precipitável, latitude e altura solar, entre outros, mas a conclusão é que a melhoria nos resultados obtidos com a relação de Ångström é modesta e insuficiente para justificar o aumento na complexidade dos cálculos.

Quando não há informações sobre referidos coeficientes locais pode-se utilizar valores propostos na equação (1.20) referenciados por Glover, Mc Culloch, citados por Tubelis Nascimento, (1980):

$$a = 0,29 \cos\phi \text{ e } b = 0,52$$

(1.20)

Para estimar a radiação solar num plano inclinado, é necessário primeiro dimensionar a componente difusa. As próximas equações podem ser empregadas para avaliação horária, diária ou mensal analogamente. Para o caso de um estudo horário instantâneo têm sido largamente empregadas as inequações de Orgill e Hollands conforme ilustrado em (1.21) (DUFFIE, BECKMAN, 1991).

$$\frac{I_d}{I} \begin{cases} 1 - 0,249 K_t p / K_t < 0,35 \\ 1,557 - 1,84 K_t p / 0,35 K_t \leq 0,75 \\ 0,177 p / K_t > 0,75 \end{cases}$$

(1.21)

Onde:

I_d é a irradiância solar difusa incidente em superfície horizontal [W/m²],

k_t é o índice de claridade atmosférica (ou transparência) instantânea num determinado horário,

I é a irradiância solar instantânea na superfície terrestre num plano horizontal num dia e hora solar específica [W/m^2].

A irradiação difusa diária presente no céu local, pode ser obtida a partir do estabelecimento do fator de irradiação difusa ou proporção de difusa, cadê, mediante a expressão (1.22).

$$H_d / H = K_d$$

(1.22)

Onde:

H_d é a irradiação solar difusa diária num plano horizontal da superfície terrestre [Wh/m^2],

H é a irradiação solar diária num plano horizontal da superfície terrestre [Wh/m^2],

K_d é o índice adimensional, diário para a componente difusa.

Outra forma de modelar a relação entre a claridade atmosférica e a contribuição difusa, ou seja, determinar a expressão que correlaciona K_r com cadê foi proposta por ERBS, KLEIN e DUFFIE em 1982. Neste modelo, foram introduzidas algumas modificações que consideram a interferência do efeito sazonal anual.

Para $\omega_s \leq 81,4^\circ$

Se $K_T < 0,715$ então:

$$\frac{H_d}{H} = K_d = 9,3879 K_T^4 - 11,9514 K_T^3 + 2,4495 K_T^2 - 0,2727 K_T + 1$$

Se $K_T / 0,715$ então: $\frac{H_d}{H} = K_d = 0,143$

Para $\omega_s > 81,4^\circ$

Se $K_T < 0,722$ então:

$$\frac{H_d}{H} = K_d = 0,8448 K_T^3 - 2,5557 K_T^2 + 0,2832 K_T + 1$$

Se $K_T / 0,722$ então: $\frac{H_d}{H} = K_d = 0,175$

(1.23)

Onde, K_T é o índice de transparência atmosférica (claridade) médio de um dia.

Em (1.24) se apresentam as correlações de Collares, Pereira para a mesma finalidade segundo (DUFFIE, BECKMAN, 1991).

Se $K_T \leq 0,17$ então: $\frac{H_d}{H} = K_d = 0,99$

Se $0,17 \leq K_T \leq 0,75$ então:

$$\frac{H_d}{H} = 14,648 K_T^4 - 21,865 K_T^3 + 9,473 K_T^2 - 2,272 K_T + 1,188$$

Se $0,75 < K_T < 0,8$ então:

$$\frac{H_d}{H} = K_d = -0,54 K_T^4 + 0,632$$

Se $K_T \geq 0,8$ então: $\frac{H_d}{H} = K_d = 0,2$

(1.24)

Para estimação da componente difusa média mensal segue a equação (1.25) segundo as correlações de Collares, Pereira e a bateria de (1.26) segundo RALB, citadas por DUFFIE, BECKMAN, (1991).

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = \bar{K}_d = 0,775 + 0,00606(\omega_s - 90) - [0,505 + 0,00455(\omega_s - 90)] \cos(115\bar{K}_T - 103)$$

(1.25)

$\omega_s \leq 81,4^\circ \quad \text{e} \quad 0,30 \leq \bar{K}_T \leq 0,80$ $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = \bar{K}_d = -2,137\bar{K}_T^3 + 4,189\bar{K}_T^2 + 3,56\bar{K}_T + 1,391$ $\omega_s \geq 81,4^\circ \quad \text{e} \quad 0,30 \leq \bar{K}_T \leq 0,80$ $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = \bar{K}_d = 1,821\bar{K}_T^3 + 3,427\bar{K}_T^2 - 3,022\bar{K}_T + 1,311$

(1.26)

Valores de K_T para dias claros situam-se por volta de 0,75 ou mais, e para dias considerados nublados por volta de 0,40 ou menos (LIU, JORDAM, 1960). Labaki, (1995) propõe um polinômio do 3º ajustando cadê em função de K_T conforme se denomina na expressão (1.27).

$$K_d = 0,2038345 - 0,3259358 HT + 1,148309 K_T^2 - 1,137844 K_T^3$$

(1.27)

Para determinar a irradiação global incidente em um plano com inclinação qualquer, a expressão (1.28) composta basicamente pela soma dos três principais componentes da irradiação incidente na superfície terrestre considera um modelo isotrópico conforme LIU, JORDAM, (1960). O primeiro termo do 2º membro corresponde à contribuição da radiação direta, o segundo é referente à radiação difusa, determinada por um modelo qualquer, e finalmente o terceiro, é a contribuição do albedo.

$$\bar{H}_\beta = \bar{H} \left(1 + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) \bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H}_\rho \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (1.28)$$

)

Onde;

H_d pode ser obtido experimentalmente, através de um piranômetro dotado de anel sombreador, ou multiplicando-se a irradiação global sobre uma superfície horizontal por cadê, obtido através de uma das correlações aqui apresentadas como por exemplo a de COLLARES, PEREIRA e RABL ou a de ERBS.

H_β é definido como sendo a razão entre a radiação diária média mensal sobre uma superfície inclinada e a radiação diária média mensal sobre um plano horizontal (DUFFIE, BEKMAN, 1991, p.25).

Na figura 2.27 se ilustram referidos ângulos.

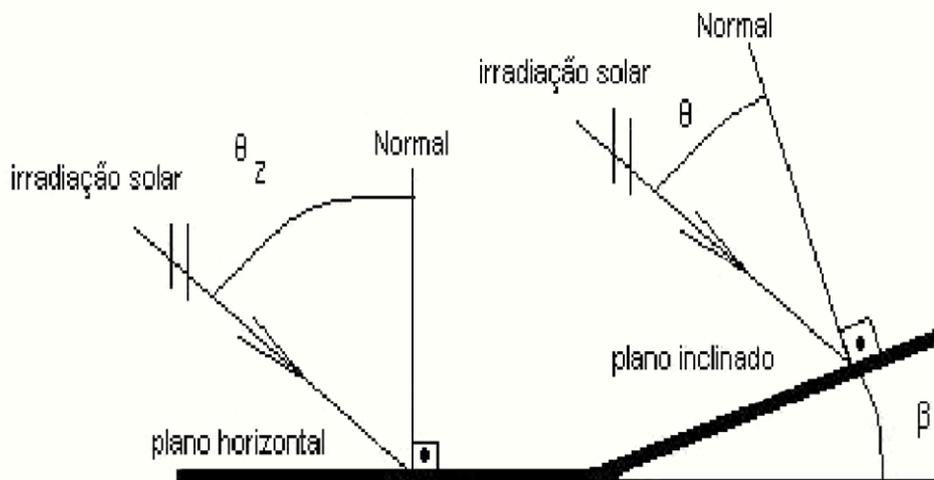


FIGURA 2.27: ÂNGULOS PARA UM PLANO HORIZONTAL E PARA UM PLANO INCLINADO.

FONTE: DUFFIE, BEKMAN (1991)

A expressão algébrica para a determinação da média mensal sem desvio azimutal é dada pela equação (1.29) que está adaptada para latitudes Sul onde $\phi < 0$

→(β+φ) ao invés de (φ-β) como se apresenta na literatura nórdica (DUFFIE, BEKMAN, 1991, p.109), ainda ω_s' e ω_s devem estar graus.

$$\bar{R}_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} = \frac{\cos(\phi+\beta)\cos\delta\sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \omega'_s \sin(\phi+\beta)\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta\sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \phi \sin\delta} \quad (1.29)$$

)

Onde:

ω_s' é o ângulo horário do pôr do Sol para a superfície inclinada, ajustada para o dia médio do mês cujo valor numérico deve ser o menor valor entre as duas alternativas da sentença (1.30).

$$\omega'_s = \min \left(\begin{array}{l} \arccos(-\tan\phi \tan\delta) \\ \arccos(-\tan(\phi+\beta)\tan\delta) \end{array} \right)$$

(1.30)

O cálculo de R_b pontual para um instante específico do dia Solar pode realizar-se com qualquer desvio azimutal através das seguintes equações:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \sin \beta \cos \phi \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega$$

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi + \cos \phi \cos \omega \cos \delta$$

$$R_b = \frac{\cos \theta_z}{\cos \theta} \Leftrightarrow \cos \theta_z > 0$$

$$R_b = 0 \Leftrightarrow \cos \theta_z \leq 0$$

(1.31)

)

Valendo lembrar que o azimute “ γ ” do eixo do plano inclinado em questão é convencionalmente pela literatura nórdica como 0° para o Sul e 180° para o Norte, como ilustra na figura 2.28.

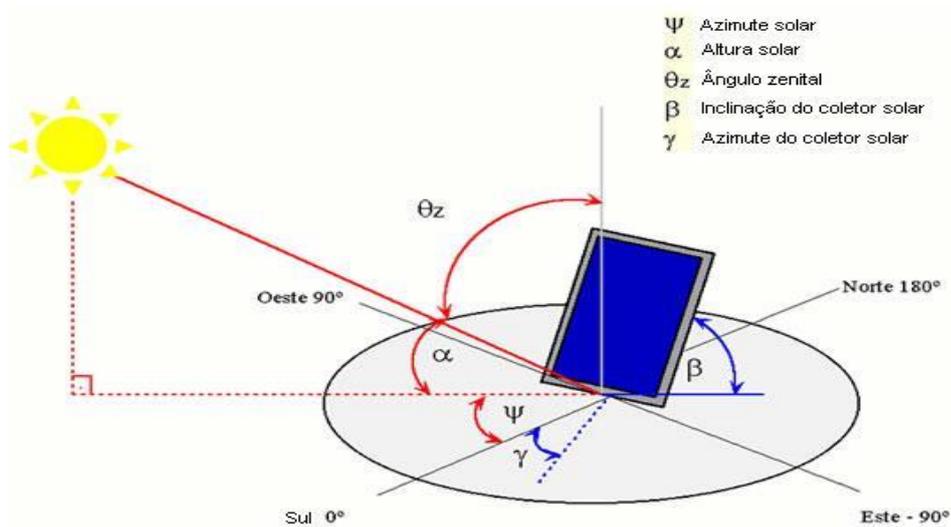


FIGURA 2.28: CONVENÇÃO NÓRDICA PARA ORIENTAÇÃO DO COLETOR SOLAR.

Na Tabela 2.3 são ilustrados alguns valores de refletividade (albedo) extraídos de AYAOADE (1988), que podem ser empregados na respectiva componente do albedo.

Tipos de superfície	Albedo (%)
Solo negro e seco	14
Solo nú	7 a 20
Areia	15 a 25
Florestas	3 a 10
Campos naturais	3 a 15
Campos de cultivo seco	20 a 25
Gramados	15 a 30
Neve recém caída	80
Neve caída há semanas	50 a 70
Água com altura solar $> 40^\circ$	2 a 4
Água com altura solar $< 30^\circ$	6 a 40
Cidades	4 a 18

TABELA 2.3: VALORES DA REFLETIVIDADE PARA DIFERENTES TIPOS DE SUPERFÍCIES.

FONTE: AYAOADE (1988)

Um novo modelo para cálculo de radiação solar incidente que incorpora alguns melhoramentos por HAY, DAVIES (1980), com mais algumas contribuições de KLUCHER, (1979), considera o brilho difuso do horizonte é dada a seguir pela bateria de equações designadas por (1.32) (DUFFIE, BEKMAN,1991).

$$I_0 = \frac{12}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365,24} \right) \left((\cos \phi \cos \delta \sin \omega) + \frac{\pi}{180} \omega \sin \phi \sin \delta \right)$$

$$I_{d,v} = I_d \left\{ \left[(1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left(1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \right] + A_i R_b \right\}$$

$$I_{t,v} = R_b (I_b + I_d A_i) + \left[I_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left(1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \right] + \left[(I_t P_g) \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right]$$

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}}$$

$$A_i = \frac{I_b}{I_0}$$

$$I_{t,v} = I_{b,v} + I_{d,v}$$

(1.32)

Onde:

$$\omega = 15^\circ/\text{h} \text{ ou } 0,2618 \text{ rad/h}$$

I_0 : radiação extraterrestre numa superfície horizontal em período horário (W/m^2);

$I_{t,v}$: radiação total incidente numa superfície inclinada (W/m^2);

$I_{b,v}$: radiação direta incidente numa superfície inclinada (W/m^2);

$I_{d,v}$: radiação difusa incidente numa superfície inclinada (W/m^2);

I : radiação total incidente em superfície horizontal (W/m^2);

I_b : radiação direta incidente em superfície horizontal (W/m^2);

I_d : radiação difusa incidente em superfície horizontal (W/m^2);

A_i : índice anisotrópico (adimensional);

f : termo de correção para modulação do brilho no horizonte (adimensional);

2.9.3 Utilização de software para a estimativa da irradiação solar em planos inclinados

O cálculo da intensidade da radiação solar em superfícies inclinadas é um procedimento trabalhoso devido ao elevado número de operações aritméticas envolvidas, segundo os modelos isotrópicos e anisotrópicos; Além de cálculos trigonométricos são necessários modelos de distribuição temporal e espacial da radiação solar. Uma possibilidade de estimar a irradiância solar sobre superfícies inclinadas conforme o modelo isotrópico de Liu e Jordam mediante software livre é a utilização do RAD-OPT 2.0/94 de Czajkowski (2003) que depois de informada a latitude local, o índice de claridade médio mensal, o desvio azimutal e o índice de reflexão do solo (albedo) o software monta uma tela de saída sobre a irradiância solar global em MJ/m ao dia mediano mensal em planos inclinados de 0° a 90° de 10° em 10°.

Czajkowski (2003), também disponibiliza outro programa livre denominado “RADIAC2” muito prático e de fácil manuseio oferecendo a possibilidade de uma análise diária específica para qualquer lugar do planeta bastando informar a latitude local, o dia desejado, o albedo, o coeficiente de claridade local, o ângulo de inclinação da superfície que recebe a radiação solar e o desvio azimutal da superfície.

Outro software livre bastante interessante é um banco de dados elaborado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS(RADIASOL, 2003) para o Ambiente Windows que tem como atributo a possibilidade de indexar novos dados para outras localidades sem afetar a fonte original disponibilizada pelo software.

O “Radiasol” utiliza internamente modelos matemáticos disponíveis na literatura, desenvolvidos por outros diversos autores e por integrantes do Laboratório da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. No programa os cálculos são realizados através de rotinas que determinam o efeito da inclinação da superfície receptora e da anisotropia da radiação solar em seus componentes direta e difusa.

O usuário pode selecionar o modelo de distribuição da radiação e obterá na tela, imediatamente, um conjunto de dados adicionais na forma de tabelas ou gráficos.

O sistema incorpora um banco de dados contendo informações de mais de 2000 estações meteorológicas em todo o mundo, das quais cerca de 200 no Brasil. Está incluído também um mecanismo exclusivo para a sintetização de dados sequenciais de radiação solar em intervalos diário, horário e de 5 em 5 minutos. Curvas ou tabelas podem ser exportadas através da área de transferência do Windows para outros aplicativos, onde poderão ser utilizadas para cálculos em projetos ou para apresentação de relatórios ou qualquer outro fim científico.

O Radiasol ainda oferece a possibilidade de examinar uma data específica e fazer variar o índice de claridade (transparência) sem modificar a fonte básica dos dados, como também emitir relatórios de tela ou impressos da irradiância anual ou diária específica ou na forma de gráficos.

O programa livre Geosol de HERNÁNDEZ (2003) também constitui uma ferramenta computacional para o cálculo de coordenadas solares e estimação da radiação solar por vários modelos, permitindo a isotropia ou anisotropia, apresenta a possibilidade de construção de cartas solares em plano e em elevação.

Rispoli, Mariotoni, (2007) elaboraram um programa para calculadoras HP da série 48, 49 e 50 para estimar a irradiação e irradiância solar em qualquer coordenada geográfica do planeta Terra em conformidade com o modelo isotrópico de Liu, Jordam (1960) para coletores inclinados em qualquer ângulo com ou sem desvio azimutal, assim como uma rotina de dimensionamento de coletores solares planos e verificação dos mesmos, como várias versatilidades de entrada e saída de dados, que mais tarde migrou para uma planilha eletrônica amigável a qualquer ambiente de projetos, fabricação e estudos do tema termo-solar.

Os autores selecionaram o modelo isotrópico do céu para esta rotina de cálculo fundamentada na semelhança de resultados da anisotropia em dia parcialmente nublado, onde o brilho *circum* solar e do horizonte é insignificante, todavia a adoção pelo modelo isotrópico inclinou-se pela simplificação algébrica e trigonométrica da complexa distribuição espacial e temporal das componentes solares sobre o plano inclinado tendo ainda o aval da predominante conduta média mensal brasileira de Norte a Sul de um índice de claridade atmosférico por volta de 0,5 e uma insignificante variabilidade como se mostra na tabela 2.4 montada a partir de informações do Atlas Solarimétrico do Brasil (GIBA, 2000).

		Cidades:	MACAPÁ	MACEIÓ	BELO HORIZONTE	PORTO ALEGRE
VALORES DE KT	VERÃO	Dezembro	0,52	0,57	0,37	0,54
		Janeiro	0,42	0,55	0,37	0,50
		Fevereiro	0,40	0,53	0,50	0,50
		Média	0,45	0,55	0,41	0,51
		σ	0,0525	0,0163	0,0613	0,0189
	OUTONO	Março	0,40	0,53	0,40	0,50
		Abril	0,46	0,47	0,49	0,51
		Maió	0,49	0,53	0,50	0,49
		Média	0,45	0,51	0,46	0,50
		σ	0,0374	0,0283	0,0450	0,0082
	INVERNO	Junho	0,49	0,50	0,55	0,47
		Julho	0,57	0,51	0,57	0,52
Agosto		0,57	0,58	0,55	0,50	
Média		0,54	0,53	0,56	0,50	
	σ	0,0377	0,0356	0,0094	0,0205	
PRIMAVERA	Setembo	0,59	0,53	0,50	0,48	
	Outubro	0,61	0,57	0,42	0,51	
	Novembro	0,59	0,63	0,42	0,52	
	Média	0,60	0,58	0,45	0,50	
	σ	0,0094	0,0411	0,0377	0,0170	
	Média	0,509	0,542	0,470	0,503	

TABELA 2.4: ÍNDICES DE TRANSPARÊNCIA ATMOSFÉRICA DO CÉU BRASILEIRO CALCULADOS A PARTIR DO ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL.

FONTE: ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL

Os dados de temperatura, radiação solar e corrente elétrica neste trabalho foram coletados a cada 50 minutos num registrador eletrônico de dados, que armazena as informações adquiridas em sua memória interna para, posteriormente, serem calculadas as médias horárias.

O equipamento utilizado nesta tese foi um Datalogger modelo CR 1000 de fabricação Campbell Scientific, com oito entradas analógicas. Utilizado o programa LoggerNet 3.4, estes dados foram transferidos para um computador, através de uma porta de comunicação RS-232, para análise. Além disto, utilizou-se uma saída programável de 12 VCC do Datalogger para acionar o contador que energizava a resistência auxiliar de 1500 W/220 V, em função da temperatura interna do boiler (Figura 2.29).



FIGURA 2.29: DATALOGGER CR 1000; CONEXÃO AO COMPUTADOR.

FONTE: AUTOR

2.9.4 Chuveiros elétricos com potência variável eletronicamente.

A utilização de sistemas de aquecimento solar permite a substituição total ou parcial de chuveiros elétricos. A solução total ocorre quando o sistema se vale de aquecimento elétrico complementar no reservatório. A solução parcial ocorre quando se utiliza um chuveiro com controle dinâmico de temperatura para complementar a energia térmica necessária à água (GIMENES, 2011).

Segundo NASPOLINI 2012, demonstrou a economia do uso de chuveiros eletrônicos com água pré-aquecida por aquecedores solares no sul do Brasil. Num experimento realizado em um conjunto de 90 residências na cidade de Florianópolis, foi obtida uma redução de 38% no consumo de energia elétrica e 42% na demanda de ponta nas 60 residências equipadas com coletores solares alimentando chuveiros eletrônicos, quando comparado às outras 30 que dispunham apenas de chuveiros eletrônicos.

2.9.5 Desempenho dos coletores solares de água de uso residencial

Segundo Redpath (2008), a eficiência anual de um coletor de placas bem dimensionado fica entre 35-40%, contra 45-50% dos coletores de tubo a vácuo. O mesmo avaliou um coletor de tubos evacuados de aquecimento indireto (heat-pipe) durante um ano em Ulster (UK), obtendo a eficiência média de 63,7%.

Apesar de apresentarem um desempenho muito bom para situações meteorológicas adversas, os coletores de tubos a vácuo têm menor eficiência de conversão da energia solar em térmica do que os coletores de placas em situações meteorológicas mais favoráveis (MANEA, 2011).

Goerck (2008) avaliou um aquecedor solar de água com coletor de tubos a vácuo com (heat pipe) operando durante o inverno na região de Taquari (RS). A eficiência do coletor foi estimada em 43% no mês de junho, mas caiu para 37% no mês de agosto, com a melhora das condições de temperatura e radiação solar.

De um modo geral, não existe um tipo de coletor solar que seja o mais eficiente sob qualquer condição (Figura 2.30). Por exemplo, para uma aplicação com baixas temperaturas de trabalho numa região muito ensolarada, um coletor com absorvedor plástico pode ser uma ótima solução (NORTON,2006).

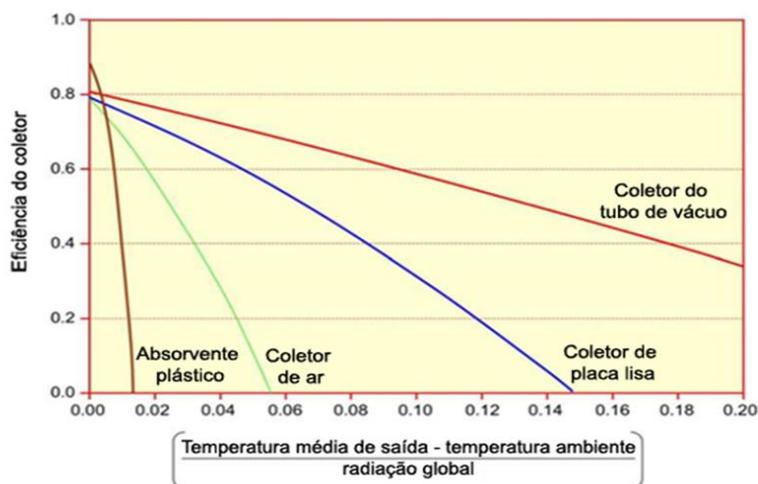


FIGURA 2.30: CURVA DE RENDIMENTO PARA COLETORES COLARES DE BAIXA E MÉDIA TEMPERATURA.

FONTE: NORTON (2006)

Coletores solar de energia é o principal componente do SWHSs (sistemas solares de aquecimento de água) e a avaliação do seu desempenho térmico é vital. Uma série de estudos sobre o desempenho de FPCs foram realizados sob condições de teste de estado estacionário e quase-dinâmicos nos padrões seguintes PT 12975-2, segundo European Standards (2006) e ASHRAE-93 (2003).

Zambolin e Del Col (2010) realizou uma análise de desempenho comparativa do desempenho térmico na placa dos coletores de tubos em Padova, Itália. Eles apresentaram um novo conjunto de dados coletados, tanto para coletores planos em placa e coletores de tubos evacuado testados simultaneamente de estado estacionário e testes eficácia quase-dinâmicos seguindo a norma EN 12975-2, obtendo eficiência no sistema dos coletores planos de 61% e nos coletores de tubos evacuados de 66%. Tiwari et al. (1991) analisou o desempenho de FPCs solares fabricadas na Índia, com valores que variam entre FrUt 5.139 e 7.024.

Amer et al. (1998) desenvolveram um método para caracterizar o transiente comportamento dinâmico de FPCs solares e validados os seus resultados e com os obtidos a partir de testes de estado estacionário com base na ASHRAE 93 padrão. Eles também investigaram os efeitos da temperatura de entrada e ângulo de incidência sobre os parâmetros do coletor. Chen et al. (2012) realizaram testes para avaliar os ganhos de dois FPCs solares em diferentes débitos de caudal.

Conseqüentemente, outros estudos têm-se centrado na avaliação do desempenho de SWHSs sob tempo real e condições. Michaelides e Eleftheriou (2011) estudaram o comportamento de um SWHS com 3 m² FPC e um tanque de água quente 68 L em Chipre com base em dados coletados ao longo de dois anos.

Ayompe et al. (2011) compararam o ano todo energia e desempenho econômico dos dois SWHSs com coletores de placa plana e coletores de vácuo que operam sob as mesmas condições do tempo em Dublin, na Irlanda.

Building Research Establishment avaliaram o desempenho de um SWHS em Cambridgeshire, Reino Unido, que tinha um coletor placa plana de painel solar (Clearline V30) fabricado pela Viridan Solar, Reino Unido.

O dispositivo de ensaio incluiu um sistema automatizado que incorporou os efeitos do sistema de aquecimento auxiliar (caldeira ou aquecedor de imersão) e uso de água quente diária da família média europeia descrita pelo termo tocando ciclo da União Europeia (UEM324EN) equivalente a 100 L a 60 °C . Seus resultados mostraram que mais de um ano, o coletor de 3 m² gerados 5 266 MJ de AC-calor contando por 57% da necessidade de água quente.

Segundo Rispoli, 2010, o planejamento urbano em cidades que cresceram desordenadamente somados a uma série de regras de ocupação dos lotes e divisão da terra deixou imprevisível a condição de contemplar um telhado que forneça condições de sustentar um coletor solar plano sobre o telhado sem desvio do Norte Geográfico.

Pensando nas escassas condições espaciais dos lotes e edificações urbanas para acomodação de um aquecedor solar que agrupe todas as condições para um bom desempenho adotou-se como hipótese a desagregação do sistema de aquecimento solar do corpo principal da edificação, aproveitando em parte o desenho dado a um projeto de proliferação de aquecedores na cidade de São

Manuel SP sob iniciativa da empresa Soletrol em parceria com a CPFL em 2010 com tecnologia termo solar metálica convencional como se ilustra na Figura 2.31.



FIGURA 2.31: AQUECEDOR SOLAR DESAGREGADO DO TELHADO DA RESIDÊNCIA.

FONTE: CIDADE DE SÃO MANUEL SP.

2.9.6 Período de retorno do capital investido no sistema de aquecimento de água

Contudo existem equações simplificadoras como a (1.33) concebida por Bezerra, (1990) estima o tempo para recuperação do capital investido na tecnologia termo solar.

$$T_{RC} = C (1,3^{(n-1)})^{-1} \quad (1.33)$$

Onde:

T = tempo de retorno do capital investido;

C = constante calculada em função dos seguintes valores: custo do sistema instalado, fator de conversão de kWh para kcal (860), energia total transferida à água em kcal/dia, custo do kWh de energia elétrica, número de dias ao ano (365). 1,3

juntamente com n referem-se respectivamente ao percentual de aumento da tarifa de energia elétrica e a número de vezes que se verifica o aumento da citada tarifa ao longo do tempo.

O valor do investimento inicial em equivalência de kWh de eletricidade assumindo a tarifa e política tributária da ocasião. Em seguida se projeta o calor médio mensal do equipamento com base à localidade (irradiação solar sobre plano inclinado), rendimento do equipamento e as equações pesquisadas neste trabalho, produzindo um acúmulo de calor solar a cada mês e que ao atingir valor igual ou ligeiramente superior à equivalência do investimento inicial se registra o tempo decorrido e conseqüentemente o período de retorno da aquisição tecnológica.

Para tal se formulam sobre duas possíveis políticas de hoje: a cobrança de 12% ou 25% de alíquota, como se ilustram nas seguintes equações.

$$VET[\text{kWh}] = \frac{V_o}{T_{EE}(1-A)}$$

(1.34)

Onde:

VET = Valor equivalente da tecnologia termo solar em kWh;

Vo= Valor total do investimento inicial em moeda corrente;

TEE= Tarifa do kWh de energia elétrica em moeda corrente;

A= alíquota 12% ou 25%.

$$\sum_{i=1}^n Q_i \geq VET \Rightarrow n = \text{período de retorno}$$

(1.35)

Sendo:

Qi = Calor acumulado da produção termo solar em kWh;

n = mês onde se realiza o período de retorno.

Em 2010 foi selecionado um bairro periférico na cidade Americana, SP, Brasil (a 28 Km de Campinas), constituído por 700 unidades residenciais de baixa renda, do qual foi obtida uma amostra com 80 residências, número suficiente para inferir a média das respostas considerando-se 95% de confiança.

Foi investigado, por um questionário, o tempo médio de duração do banho noturno, o número de habitantes por domicílio, e a cultura de uso do chaveamento da potência elétrica junto ao chuveiro ao longo do ano.

Verificou-se que a densidade média por habitação oscila entre 5 a 6 habitantes por domicílio com uso do chuveiro elétrico no banho noturno entre 8 a 10 minutos de duração per capita, onde se deduz um gasto médio anual compreendido entre 817 a 1 225 kWh somente junto ao uso do chuveiro elétrico no banho noturno com uso de 5 400 W para a estação fria e 3 200 W para a estação quente.

2.10 Considerações finais

Esta tese apresenta resultados sobre a análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento de água com 1,00 m² de coletor de placa plana, desenvolvido na cidade de Cascavel - PR; dentre vários estudos com âmbito nacional e internacional, este trabalho poderá oferecer uma contribuição ao aumento da adoção do aquecedor solar residencial, com aplicação do teste para reverenciar a qualidade do aquecimento da água utilizando esferas flutuantes dentro da caixa d'água envolta por manta térmica, material este, de polietileno, este procedimento não existe em coletores com boiler afogado.

Trabalho este, direcionado exclusivamente a sociedade onde diminuirá o gasto com eletricidade no aquecimento de água para chuveiro, considerado como benéfico e com avanço tecnológico para eficiência energética e sustentabilidade, sem danos ao meio ambiente, empregando materiais alternativos e de reuso.

A utilização da energia solar para a produção de água quente para fins residenciais e industriais representa uma das aplicações mais viáveis dessa fonte limpa de energia e massificada nos países desenvolvidos, porém a principal barreira para sua utilização massiva está em seus custos elevados.

Suplantar esta barreira ajudaria a aliviar nossa matriz energética de fontes não renováveis de energia e contribuir para alcançar um consumo menor ou pelo menos igual a 200 kWh/mês promovendo a migração do consumo residencial e desta forma trazendo um encurtamento do período de retorno do investimento no sistema de aquecimento de água.

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 MATERIAIS

Para estabelecer uma qualidade de desempenho energético e expressar sua necessidade de economia de energia, optou-se em realizar um projeto piloto (protótipo), localizado na cidade de Cascavel - PR com Latitude 24°59' Sul, Longitude 58°23' Oeste e altitude média de 785 metros, em uma edificação residencial, Casa Inteligente, localizada no *campus* UNIOESTE, foi utilizado este experimento para viabilizar e investigar a melhor adaptação desta concepção de reservatório e o desempenho de um sistema de aquecimento solar de água com coletor placa plana no ano de 2014 e 2015.

Foram analisados os modelos de distribuição da irradiação solar para efeito de dimensionamento e verificação criando uma rotina útil nos sistemas termo solares inerentes em exemplos práticos e comprovativos, e se apresenta paralelamente um orçamento para o conhecimento e aceitação da tecnologia com empregado dos seguintes materiais para composição deste protótipo:

- 01 – Válvula solenoide;
- 04 – Pacotes de esferas de polietileno;
- 10m – manta multiuso, largura de 20cm;
- 01 – Adesivo PVC
- 01 – Bucha soldagem;
- 01 – Lixa;
- 01 - Plug Rosca $\frac{3}{4}$;
- 35 – TEE soldável de 32mm;
- 24 – Tubo de PVC de 32mm;
- 01 – Tubo de PVC de 25mm;
- 03 – Adaptador plástico 32mm;

- 02 – Adaptador soldável com vedação 25x3/4;
- 10 – Joelho soldável de 32mm;
- 01 – Joelho soldável de 25mm;
- 02 – Registro de 32mm;
- 01 – Registro de 25mm;
- 01 – Torneira Boia $\frac{3}{4}$ vazão total;
- 01 – Cola Alta Temperatura, automotiva;
- 06 – Termopares SMTA 1.5m, ponta 5x38mm;
- 01 – Bateria YTX4L-BS;
- 01 – Manta térmica 4m – isolamento cinza 1.5/8;
- 01 – Engate rápido $\frac{1}{2}$;
- 01 – Tubo de espuma TYTAN PRO;
- 02 – Tinta spray preto fosco 400ml;
- 01 – Caixa d'água 100l.

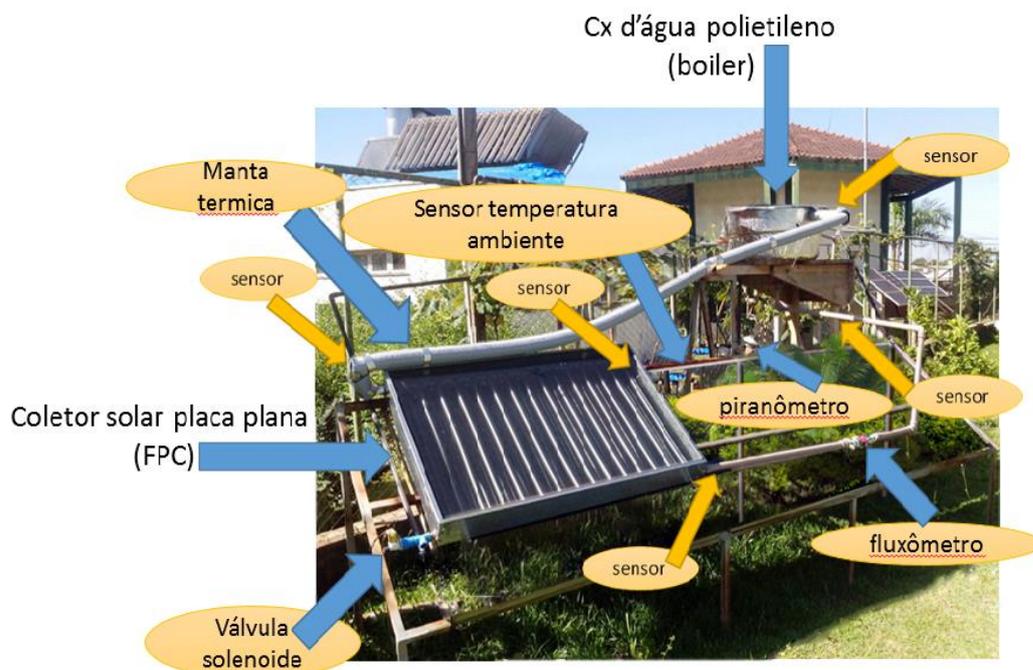


FIGURA 3.1: SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA COM COLETOR PLACA PLANA. FONTE: AUTOR

Neste protótipo foi substituído o tradicional processo de calandra soldada (boiler) por uma caixa d'água de 100l, a caixa d'água de polietileno que possuem superfícies internas lisas que facilitam a limpeza, com exclusivo sistema de encaixe das tampas que dispensa parafusos e amarras na instalação e garante ainda mais vedação e conservação da água, envoltas por manta térmica, composta por fita multiuso autoadesiva, que é uma membrana asfáltica impermeável.

Observasse na Figura 3.2, produzida à base de asfaltos modificados (pneus reutilizados na confecção) e apresenta excelente aderência a vários substratos. Possui estruturante central em polímero elastomérico que em baixas temperaturas (abaixo da Tg), o polímero é um sólido em um estado vítreo (um vidro), acima da Tg, ele se encontra em um estado chamado de borrachoso, e, por conseguinte passa progressivamente ao estado líquido viscoso a medida que a temperatura aumenta.

Segundo Christian Oudet (1993), material este que confere maior resistência e flexibilidade, compondo sua cobertura superficial de alumínio *no crack* atua como uma barreira refletora dos raios solares e apresenta alta durabilidade, mesmo em severas condições de utilização e fácil aplicação, é uma maneira prática, rápida e eficaz de vedar. Foi selecionada a manta térmica, pois esta mistura tem elevada resistência às intempéries e também às temperaturas, apresentando deformações por volta dos 130 °C.



FIGURA 3.2: MANTA TÉRMICA, COMPOSTA POR FITA MULTIUSO AUTOADESIVA. FONTE: AUTOR

A membrana escolhida tem elevada resistência mecânica e a intemperes, o custo da matéria-prima é mais em conta do que o compósito de fibra de vidro, compósito este, podendo terminar em processos de oxidação indesejáveis na operação com águas agressivas, ao passo que o compósito em fibra de vidro, seu manuseio incorreto pode causar danos à saúde de quem trabalha e ao meio ambiente, quem trabalha com esse tipo de material deve utilizar máscara, luvas e roupas especiais em virtude das partículas que são liberadas causarem irritações na pele, olhos e aparelho respiratório, além dos solventes e das resinas utilizadas no seu processo de fabricação ser extremamente tóxicos.

A manta térmica tem sua matéria-prima com emissão de carbono menor que o processo do compósito; permite uma moldagem adequada a forma que se adotará neste trabalho; ao contrário do compósito, a manta térmica oferece grande versatilidade em eventuais reparos na cápsula caixa d'água quente com custo irrisório na matéria-prima, verifica-se na Figura 3.3.



FIGURA 3.3: CAIXA D'ÁGUA ENVOLTA COM MANTA TÉRMICA.

FONTE: AUTOR

O sistema de aquecimento solar propostos com demais subpartes (coletor solar, tubos de PVC, conectores, fluxômetro (Figura 3.4), regulador de potência para chuveiro). O tanque de água quente tem seu material, perfil interno e externo com as seguintes inovações: a água fria entra no tanque em velocidade e vazão diferente da saída de consumo, atrasando assim os processos indesejáveis de resfriamento em

condições de uso, assim como se dispõe de um sifão de entrada de ar para o interior somente no instante do consumo, não deixando o ar da intempérie entrar instantaneamente, também tem a presença de um material isolante, flutuante e de menor densidade que a água que retarda o processo de resfriamento da água.

A entrada de água fria pode ser administrada em baixa ou alta pressão na quebra da mesma por pequena e resistente torneira de boia que permite num pequeno reservatório interno a separação de água fria e quente nesta pequena caixa d'água. O desenho é de menor custo de fabricação, com isso a relação custo/peso diminui e analogamente diminui o custo logístico (BALLOU, 1993, p. 101).



FIGURA 3.4: FLUXÔMETRO - UTILIZADO NA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO FLUIDO.

FONTE: AUTOR

Um protótipo de prova com 100 litros com as particularidades caixa d'água de polietileno, sifonamento na entrada e saída de ar, entrada controlada de água fria em função do calor solar, isolamento interno entre água e ar por material flutuante, material este, duas camadas de esferas de poliestireno expandido de 3 cm de diâmetro, verifica-se na Figura 3.5, de menor densidade que a água, entrada controlada de ar, habilitada para entrada em baixa ou alta pressão (40 mca), podendo ser assemelhada ou modificada em forma e volume.



FIGURA 3.5: ESFERAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO DE 3 CM DE DIÂMETRO.

FONTE: AUTOR

3.2 MÉTODO

3.2.1 Concepção de um corpo de prova com esferas de poliestireno expandido

Para o teste de aquecimento da água na cx d'água de polietileno envolta por manta térmica, foi colocado dentro do reservatório de água “boiler” esferas de poliestireno expandido de 3 cm de diâmetro até saturar a área superficial para retardar o processo de resfriamento, e para avaliar se a camada poderia ser dispensada ou não do ensaio proposto.

Para medir as temperaturas internas do reservatório foi colocada uma haste (tubo de PVC com espessura de 25 mm), com furos para fixação de pontos que foram colocados os sensores, medidas utilizando-se seis termopares tipo J, interligados ao sistema de aquisição de dados (Figura 3.6).

Os termopares do tipo J são sensores que atuam numa faixa de temperatura de 0 a 750 °C, com resposta muito rápida e que têm um custo relativamente baixo.

Os utilizados têm proteção metálica e isolamento mineral, permitindo a sua instalação em contato direto com a água. Para cada sensor, foi determinado um fator de correção através de comparação com um termômetro de vidro padrão,

minimizando assim as discrepâncias decorrentes da tolerância de fabricação e da extensão dos cabos de conexão até o Datalogger.



FIGURA 3.6: TERMOPAR TIPO J UTILIZADO PARA AS MEDIÇÕES DE TEMPERATURA.

FONTE: AUTOR

Instalado na parte externa um sensor para medir a temperatura externa do processo, em conjunto com o processo interno, ligados ao Datalogger dedicado exclusivamente para esta operação, este Datalogger captura os dados e envia ao computador, onde armazenou estes dados, em função de descrições obtidas sobre os dados na cidade de Cascavel - PR, do referido mês de cálculo deste teste; estes sensores foram instalados de forma a não receber a radiação direta do sol, para deixar a máxima quantidade de ar no interior do reservatório proposto em condições de funcionamento, regulamos no início do processo uma lâmina mínima de água para o retorno do coletor solar, assim o volume experimental ficará com um volume menor de 100 litros de água.

Segundo Rispoli (2010), estabelecida uma temperatura interna média ponderada com os volumes de influência de cada sensor, onde os volumes são os pesos de ponderação. Observasse uma variação de temperatura no reservatório de prova principalmente o resfriamento interno entre as 18h às 22h, horário do banho noturno. Ao adicionar as esferas flutuantes, representando um melhoramento na

conservação de calor interno, foi proposto um fator adicional que se chamará de (Fa), onde equacionamos:

$$Fa = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \quad (1.36)$$

Sendo:

Fa = fator adicional

Δt = variação de temperatura

Defende-se que a gênese do índice empregado independe de outras variáveis que ocorrem durante o dia (irradiação solar, velocidade do vento, poluição atmosférica, etc), pois referido índice considera apenas a perda do calor após o poente solar em função da redução da temperatura interna independentemente da quantidade de calor recebida durante o dia, e sua correlação está em função da temperatura ambiente registrada à meia noite, é dizer, que se houvesse um superaquecimento interno durante o dia ou não, verifica-se tão somente a redução da temperatura interna ao anoitecer até a meia noite, segundo RISPOLI (2010).

Com a finalidade de dimensionar uma amostra confiável para estimar um índice médio de resfriamento conforme a equação (1.36) utilizou os índices calculados da experiência com e sem as esferas flutuantes, ao qual resultou num desvio padrão amostral.

Considerando um erro não superior a 1 para o índice em questão e uma confiança de 95% conforme a distribuição de Student se calcula pela equação (1.37) (SILVA, et alli, 1995) uma amostra confiável de 5 índices, portanto a pré amostra pode estimar o verdadeiro índice médio com 95% de confiança e um erro não superior a 1.

$$n = \left| \frac{t_{\alpha/2^s}}{\xi} \right|^2$$

(1.37)

Onde:

n = tamanho de uma amostra para inferir a verdadeira média;

t = valor de Student para a metade da significância;

S = desvio padrão amostral;

ϵ = erro arbitrado.

3.2.2 Concepção do coletor solar

A concepção do coletor solar de placa plana (FPC) tem a missão de absorver de forma mais eficiente possível a radiação solar e transformá-la em energia térmica utilizável mediante sua transferência para o fluido portador de calor.

Os materiais utilizados para a fabricação da placa devem possuir alta condutividade térmica para reduzir a resistência ao fluxo de calor por condução. O coletor solar de placa plana (FPC), Figura 3.7, é composto por cinco elementos principais: a cobertura transparente (vidro 3 mm transparente), tubos de PVC 32", Figura 3.8 (pintados com tinta preta fosca), a placa de alumínio com forma de ômega tem em suas laterais inclinação de 45 graus a cada 2,5 cm, o isolante térmico (espuma de poliuretano expandido TYTAN PRO 30) e a carcaça.

A cobertura transparente é a encarregada de produzir o efeito estufa, reduzir as perdas por convecção e garantir a estanqueidade do coletor à água e ao ar, em união com a carcaça e as juntas. O efeito estufa atingido pela cobertura faz com que uma parte da radiação que atravessou a cobertura e chega aos tubos de PVC coletor seja refletida para a cobertura transparente, com uma longitude de onda para a qual ela é opaca, retendo a radiação no interior.

Esse efeito define as características da cobertura: alto coeficiente de transmissão da radiação solar; baixo coeficiente de transmissão para as ondas longas; baixo coeficiente de condutividade térmica; alto coeficiente de reflexão para a longitude de onda longa da radiação emitida pela placa coletora.

O calor absorvido pela placa de alumínio pintada de preto brilhante e retido no interior do coletor de placa plana (FPC) e é transferido para a água pelas colunas de PVC, também pintadas de preto. Apesar de simples, um sistema de aquecimento

solar possui detalhes fundamentais, na sua confecção e instalação, para um bom funcionamento.

O dimensionamento do coletor solar em relação à caixa d'água ou acumulador é importantíssimo para limitar a temperatura aos níveis que mantenham a rigidez do PVC (temperatura máxima de 55 °C quando aplicado em sistemas onde a água aquecida diminui sua densidade e começa a se movimentar em direção à caixa, dando início a um processo natural e circulação da água, chamado de termo-sifão), sem causar o amolecimento do material e, por conseqüência, comprometer a estrutura do coletor solar ou de todo o conjunto, vindo a provocar vazamentos ou mesmo a destruição do coletor solar. O dimensionamento correto permite que a água que circula no coletor seja aquecida e, também, limita a temperatura aos níveis seguros ao PVC.

A placa de alumínio abaixo dos tubos de PVC, está protegida em sua parte inferior mediante uma lamina de isolamento térmico para evitar as perdas de calor para o exterior. A característica principal do isolante é resistir a altas temperaturas sem se deteriorar, o material usado foi poliuretano expandido. O alumínio é um metal leve, macio e resistente. Possui um aspecto cinza e foi pintado de preto.

Utilizou-se o alumínio por não ser tóxico como metal, não-magnético, e não cria faíscas quando exposto a atrito. O alumínio puro possui tensão de cerca de 20 MPa e 400 MPa se inserido dentro de uma liga. Sua densidade é aproximadamente de um terço do aço ou cobre.

É muito maleável, muito dúctil, apto para a mecanização e fundição, além de ter uma excelente resistência à corrosão e durabilidade devido à camada protetora de óxido.

É o segundo metal mais maleável, sendo o primeiro o ouro, e o sexto mais dúctil. alumínio é o mais importante dos metais não-ferrosos e possui grande importância industrial devido suas excelentes propriedades físico-químicas, pois segundo PERRY (1980) “é um metal leve (densidade = 2,7 g/cm³, ou seja, um terço da densidade do aço), com baixo ponto de fusão (660 ° C quando na pureza de 99,80%)”, com elevada resistência específica principalmente na forma de ligas, além de outras propriedades como longa vida útil, resistência à corrosão, excelente condutor térmico e elétrico, boas propriedades refletivas e infinitamente reciclável.

O isolamento termico compoe-se de espuma de poliuretano expandido, tem em suas propriedades uma densidade entre 30–80 kg/m³, resistênciã a compressão de 200 N/mm², condutividade térmica em torno de 0,023 W/mK, coeficiente de fricção $\mu=0,0135$, o coef. de condutividade igual a 0,030 kcal/hm°C, e sua temperatura de trabalho ótima gira em torno de -40 a 115 °C, resistente à tração, flexão e impacto, leve e não conduz corrente elétrica, permite ampla flexibilidade de projeto, possibilitando a moldagem de peças envoltas ao coletor.

A carcaça do FPC é composta de um perfil de alumínio coletado em obra, passou pelas seguintes etapas: coleta, fundição e laminação.



FIGURA 3.7: COLETOR SOLAR DE PLACA PLANA (FPC).

FONTE: AUTOR



FIGURA 3.8: TUBOS DE PVC 32”, PINTADOS COM TINTA PRETA.

FONTE: AUTOR

A carcaça foi fechada com superfície translúcida, pois, coletores desprovidos desta caixa sofrem deficiências nos dias frios de inverno, foi anexado ao tubo de PVC, como mostra a Figura 3.7 utilizou-se uma válvula solenoide, para quando a temperatura no termostato externo enviar ao Datalogger, temperatura esta menor que 5 °C, a válvula é acionada e abre para o fluido (água) sair, não deixando ocorrer o congelamento do mesmo, danificando toda a tubulação envolvida no sistema.

A presença constante de ventos, responsáveis pelo resfriamento deste coletor, observa-se na Figura 3.9, a colocação da espuma de poliuretano expandido resistem melhor à exposição solar, abaixo da placa de alumínio com forma de ômega e em suas laterais portanto se não utilizado a carcaça do coletor não suportaria e se deformaria quando enclausurados em uma caixa fechada com vidro, ocorrendo com o PVC comum caso este esteja sem a caixa fechada com superfície translúcida.

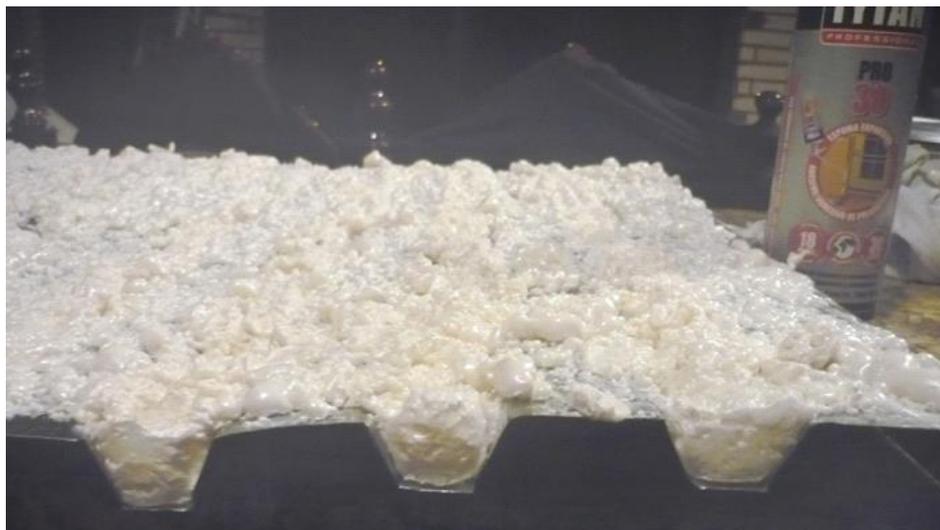


FIGURA 3.9: ESPUMA DE POLIURETANO EXPANDIDO TYTAN PRO.

FONTE: AUTOR

O coletor solar deve estar bem orientado na estação fria do ano, percebesse maior eficiência os coletores desprovidos de superfície translúcida; pois ocorre em algumas horas do dia o indesejável fenômeno da refração solar sobre superfície translúcida.

3.2.3 Dimensionamento da área do coletor solar.

Considerar a quantidade de energia solar que chega num plano inclinado neste caso o nosso coletor solar e conseqüentemente realizar um dimensionamento ou verificação de uma área receptora solar, nosso protótipo tem dimensões de 1,20 x 0,83m, a consideração da qualidade da abóbada celeste com relação a uma isotropia ou anisotropia do céu e brilho do mesmo.

A medição da radiação solar no local da pesquisa será feita por um piranômetro de fabricação Kipp & Zonen, modelo CMP3, com uma sensibilidade de 15,30 microvolts/watt.m², indicado na Figura 3.10. Foi instalado próximo ao aquecedor, sendo que os valores de radiação medidos serão armazenados no Datalogger de 5 em 5 minutos, para posterior comparação com os resultados da energia calorífica do sistema.



FIGURA 3.10: PIRANÔMETRO USADO PARA MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR.

FONTE: AUTOR

Ao arbitrar a qualidade do céu, é possível estimar com uma rotina simples a irradiação solar global e seus componentes sobre um plano inclinado empregando o modelo isotrópico. Para isso é necessário tomar um índice de transparência ou de claridade atmosférica (K_t), lembrando que valores de K_t para dias claros situam-se por volta de 0,75 ou mais, e para dias considerados nublados por volta de 0,40 ou menos (LIU, JORDAM, 1960).

Ao dimensionar um sistema aquecimento solar de água se devem desprezar dias chuvosos ou de pouca claridade e suas respectivas irradiações. Assim sendo, um critério prático para o solo brasileiro é classificar dias claros em três espécies: nublado, parcialmente nublado e limpo. Neste caso foram adotados os índices da irradiação solar local de Cascavel - PR.

Para verificar a capacidade térmica de sistemas termo solares, ao substituir a equação (1.5) em (1.4) se estabelece a expressão (1.38) que calcula o diferencial de temperatura que o sistema solar pode gerar dada uma determinada irradiação solar, para o volume de água a aquecer.

$$A_c = \frac{Q+Q_T}{\eta H_T} = \frac{\text{volume } c \Delta T}{\eta H_T} = \frac{\text{volume } \Delta T / 860}{\eta H_T} \rightarrow \Delta T = \frac{0,86 A_c \eta H_T}{\text{volume}}$$

(1.38)

Sendo:

A_c = área coletora solar em m²;

Q = calor requerido no tanque em um dia em kWh/dia;

Q_T = calor perdido no tanque em um dia em kWh/dia;

η = rendimento do coletor solar;

H_T = irradiação solar global no dia desejado sobre um plano inclinado em Wh/m² dia

ΔT = diferença de temperatura em °C;

c = calor específico da água, aproximadamente igual a 1 kcal/kg°C posto que um litro de água entre 4 a 80°C tem aproximadamente 1 kg;

Volume de água em litros.

Com os dias médios mensais e as declinações solares citados na Tabela 2.2, é possível determinar a irradiação solar extraterrestre de Janeiro a Dezembro para uma média mensal num plano horizontal teórico no topo da atmosfera em qualquer latitude do planeta Terra empregando a equação (1.17), que se constitui como o denominador do primeiro membro da equação (1.19).

Se por ventura se tem informe local sobre a irradiação solar global média mensal na superfície terrestre se constitui o numerador do primeiro membro da equação (1.19) e se possibilita o cálculo médio mensal do índice de transparência atmosférico para todos os meses do ano na localidade do informe. Este procedimento leva aos índices de transparência atmosféricos mais fieis numa localidade que tem informe por séries históricas.

3.2.4 Irradiação solar global sobre plano do coletor solar

O aquecedor solar instalado fora da edificação e próximo ao chuveiro, é possível fixar no muro de divisa uma pequena estrutura metálica com comando manual que permita um ajuste periódico de um ângulo mais adequado para receber a componente solar direta no horário de pico solar considerando a rota aparente do Sol em torno da Terra durante o ano, em função da latitude local ou uma para cada mês do ano com a expectativa de deixar essa possibilidade para um melhor aproveitamento da radiação solar.

A estrutura metálica que segura um único coletor solar de dimensões 1.20 x 0.83m. Construída uma planilha eletrônica para o cálculo da irradiação solar média mensal sobre planos inclinados consubstanciada no modelo de céu isotrópico por conta da elevada frequência média mensal brasileira de um índice de transparência atmosférico por volta de 0,50 que em conformidade com a revisão bibliográfica modela a quantidade de irradiação solar global sobre plano inclinado bastante assemelhado que a consideração isotrópica de KLUCHER (1979).

Na revisão bibliográfica como sendo o melhor ângulo médio mensal para inclinação dos coletores solares planos, o ângulo correspondente à diferença de 90° com a altura solar (α) para os meios dias solares, calculados nos dias médios mensais apresentados na tabela 2.2. A altura solar (α) pode ser determinada para o meio dia solar fazendo $90^\circ - \phi z$.

3.2.5 Análise do desempenho térmico do coletor solar

Para estabelecer a qualidade de desempenho energético e expressar sua necessidade de economia de energia, optou em realizar o projeto piloto (protótipo), localizado na cidade de Cascavel - PR com Latitude $24^\circ 59'$ Sul, Longitude $58^\circ 23'$ Oeste e altitude média de 785 metros, na edificação residencial Casa Inteligente campus UNIOESTE. Seu desempenho térmico foi monitorado durante um período de inverno. O SWHS tinha um tanque de 100l de água (caixa d'água chamado boiler), o melhor desempenho do aquecedor solar com coletor de placa plana fixo se

deu por conta da maior quantidade de horas anuais de exposição solar se dispostos sem desvios superior a 15° do Norte Geográfico (para o Hemisfério Sul). Dados de desempenho do sistema foram coletadas a cada 5 min.

Considerar a quantidade de energia solar que chega FPC coletor solar placa plana de área receptora solar com dimensões de 1,20 x 0,83m, a consideração da qualidade da abóbada celeste com relação a uma isotropia ou anisotropia do céu e brilho do mesmo.

A medição da radiação solar no local da pesquisa foi feita por um piranômetro de fabricação Kipp & Zonen, modelo CMP3, com uma sensibilidade de 15,30 microvolts/watt.m2, instalado próximo ao coletor, sendo que os valores de radiação, temperaturas e vazão de água, foram medidos e armazenados no Datalogger de 5 em 5 minutos, para posterior comparação com os resultados da energia calorífica do sistema.

Os índices de desempenho energético avaliados neste estudo incluem: energia coletada, energia útil e fornecimento das perdas nos tubos, fração solar, eficiência do coletor solar e eficiência do sistema.

3.2.5.1 Energia coletada.

A energia útil coletada pelo coletor solar é calculada:

$$Q_c = m C_p (T_{c;o} - T_{c;i}) \quad (1.39)$$

Sendo:

Q_c = calor útil recolhido (J);

m = massa fluido solar, taxa de fluxo (kg/s);

C_p = capacidade calor específico do fluido solar (J/kg/K);

$T_{c;o}$ = temperatura coletor externa (°C);

$T_{c;i}$ = temperatura coletor interna ($^{\circ}\text{C}$).

3.2.5.2 Energia útil e fornecimento das perdas nos tubos.

A energia útil emitida pelo coletor solar para o reservatório de água quente é dada como:

$$(1.40) \quad Q_d = m C_p (T_{sc;i} - T_{sc;o})$$

Sendo:

Q_d = calor útil entregues (J);

m = massa fluido solar, taxa de fluxo (kg/s);

C_p = capacidade calor específico do fluido solar (J/kg/K);

$T_{s;o}$ = temperatura sistema externa ($^{\circ}\text{C}$);

$T_{s;i}$ = temperatura sistema interna ($^{\circ}\text{C}$).

3.2.5.3 Fração solar (FS) - relação entre o rendimento de radiação solar para o requisito aquecimento de água, e é dada:

$$(1.41) \quad SF = \frac{Q_s}{Q_s + Q_{aux}}$$

Sendo:

SF = fração solar (%);

Q_s = rendimento solar (MJ);

Q_{aux} = exigência de aquecimento auxiliar (MJ).

3.2.5.4 Eficiência coletor solar:

$$\eta_c = \frac{[mC_p(T_{c;o} - T_{c;i})]}{A_c G_t} \quad (1.42)$$

Sendo:

m = massa fluido solar, taxa de fluxo (kg/s);

C_p = capacidade calor específico do fluido solar (J/kg/K);

$T_{c;o}$ = temperatura coletor externa (°C);

$T_{c;i}$ = temperatura coletor interna (°C);

A_c = área de coletor (m²);

G_t = radiação solar global total da superfície do coletor (W/m²).

3.2.5.5 Eficiência do Sistema:

$$\eta_c = \frac{[mC_p(T_{sc;i} - T_{sc;o})]}{A_c G_t} \quad (1.43)$$

Sendo:

m = massa fluido solar, taxa de fluxo (kg/s);

C_p = capacidade calor específico do fluido solar (J/kg/K);

$T_{s;o}$ = temperatura sistema externa (°C);

$T_{s;i}$ = temperatura sistema interna (°C);

A_c = área de coletor (m²);

G_t = radiação solar global total da superfície do coletor (W/m²).

3.2.6 Cálculos do período de retorno financeiro do sistema de aquecimento de água em kWh.

Optou estimar o período de retorno do investimento da tecnologia termo solares, aqui chamadas de período de retorno financeiro do sistema de aquecimento de água em kWh, o valor do investimento inicial em equivalência de kWh de eletricidade assumindo a tarifa e política tributária da ocasião, se formulam sobre duas possíveis políticas de hoje: a cobrança de 12% ou 25% de alíquota, como se ilustram nas seguintes equações 1.34 e 1.35, citadas na revisão bibliográfica.

Fazem-se valer as mesmas equações (1.34) e (1.35), porém se arbitra o calor Q_i como sendo a carga inibida do chuveiro elétrico em kWh em consequência da operação de um sistema termo solar. Ante esta consideração, se expõe um estudo realizado sobre a cultura de uso do chuveiro elétrico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Testes de variação de temperatura da água na caixa d'água de polietileno envolta por manta térmica.

Estabelecida uma temperatura interna média com os volumes de água repartidos entre cada sensor, observou a variação de temperatura da água no reservatório quando iniciasse o resfriamento da água, ao entardecer na estação mais fria do ano, entre as 18h e 22h, horário do banho noturno.

Na Tabela 4.1, percebesse que ao adicionar as esferas flutuantes, nitidamente é representando um melhoramento na conservação de calor interno e ao ser proposto um fator adicional entre $\Delta t_2 - \Delta t_1$. Percebesse que, quanto menor o valor numérico de ΔT_1 , mais lento é o resfriamento entre as 18h às 22h, por outro lado quanto maior for o valor numérico de ΔT_2 melhor será a conservação de calor.

	Data	10/07/2014	11/07/2014	12/07/2014	13/07/2014	14/07/2014	15/07/2014	16/07/2014
	ΔT_1 [°C]	3.60	4.90	5.10	2.90	4.70	4.90	3.80
SEM ESFERAS	ΔT_2 [°C]	23.00	25.53	24.00	25.25	22.99	20.02	19.34
	Fator add	7.66	5.21	4.71	8.70	4.89	4.08	5.09
	Data	22/07/2014	23/07/2014	24/07/2014	25/07/2014	26/07/2014	27/07/2014	28/07/2014
	ΔT_1 [°C]	6.10	5.50	5.80	8.20	5.80	7.10	6.90
COM ESFERAS	ΔT_2 [°C]	32.70	26.64	32.07	38.05	29.23	35.55	34.39
	Fator add	5.36	4.84	5.53	4.64	5.04	5.00	4.98

TABELA 4.1: EXPERIENCIA SEM E COM ESFERAS FLUTUANTES

FONTE: AUTOR

Estabelecida uma temperatura interna média com os volumes de água repartidos entre cada sensor, observou a variação de temperatura da água no reservatório quando iniciasse o resfriamento da água, ao entardecer na estação mais fria do ano, entre as 18h e 22h, horário do banho noturno.

Na tabela 4.1 ao adicionar as esferas flutuantes, representando um melhoramento na conservação de calor interno e proposto um fator adicional que se $\Delta t_2/\Delta t_1$. Percebeu que, quanto menor o valor numérico de ΔT_1 , mais lento é o resfriamento entre as 18h às 22h, por outro lado quanto maior for o valor numérico de ΔT_2 melhor será a conservação de calor.

Com a remoção das esferas flutuantes no reservatório de água quente habilita e estimula a construção de reservatórios térmicos afogados, como os boilers convencionais na forma de cápsula ou outras formas que se desenvolvam para trabalharem afogados (sem a presença do ar) que se bem dimensionada a espessura do compósito o mesmo pode atuar em boilers afogados para alta pressão, cita RÍSPOLI (2007) em seu experimento.

A elevada resistência do material deste reservatório, justifica a utilização desta caixa d'água de polietileno junto a um processo de redução de custos de matéria prima e manufatura na ordem estimula a utilização para a montagem de uma linha fabril de boilers e outras formas melhoradas com a utilização das esferas flutuantes.

4.2 Influência da anisotropia no dimensionamento e aferimento de uma área coletora solar.

Para a latitude de Cascavel - PR 24°59' Sul, dimensionar a área do coletor solar para elevar em 35 °C a temperatura da água de um tanque de 100 litros devidamente isolado considerando o aproveitamento da irradiação solar global sobre o coletor inclinado a 23° com relação ao plano horizontal com um desvio azimutal de 10° para Oeste, ou seja, com um desvio azimutal horário de 350° com relação ao Norte Verdadeiro, arbitrando um albedo de 0,2 e um rendimento de 50% para o coletor solar.

Supondo não haver informações locais sobre irradiação solar, considerar os índices de transparência (claridade) atmosférica de 0,5; 0,63 e 0,75, para os dias médios de Janeiro, Março, Maio, Junho, Julho, Setembro e Outubro. Ao final calcular o número de coletores solares manufaturados com área unitária de 1,00 m² para cada data.

Contudo se realiza a primeira linha de cálculo para o modelo isotrópico apenas para efeito didático:

$$A_c = \frac{Q + QT}{\eta \times HT} = \frac{\text{volume} \times \Delta T / 860}{\eta \times HT} = \frac{100 \times 1 \times (35/860)}{0,5 \times 3,254} = \frac{4,069}{1,627} = 2,50 \text{ m}^2$$

Sendo:

A_c = área coletora solar em m^2 ;

Q = calor requerido no tanque em um dia em kWh/dia;

Q_T = calor perdido no tanque em um dia em kWh/dia;

η = rendimento do coletor solar;

HT = irradiação solar global no dia desejado sobre um plano inclinado em Wh/m^2 dia

ΔT = diferença de temperatura em $^{\circ}C$;

c = calor específico da água, aproximadamente igual a $1 \text{ kcal/kg}^{\circ}C$ posto que um litro de água entre 4 a $80^{\circ}C$ tem aproximadamente 1 kg ;

Volume de água em litros.

O desempenho de um sistema para operar 100%, depende de uma área superior, neste protótipo com verificação de instalação aqui realizada é para contribuir com a tecnologia termo solar no universo acadêmico e verificasse que quanto maior a placa atribuindo um mesmo valor de KT de $0,5$ para estimar a média mensal e entre $0,7$ a $0,75$ para expressar o máximo desempenho do sistema de aquecimento de água solar total para todos os dias do ano.

4.3 A influência da variação periódica do ângulo de inclinação dos coletores solares planos

Para estabelecer um parâmetro de discussão sobre a viabilidade de estar ou não variando periodicamente a inclinação do coletor solar com relação ao plano horizontal, segue na sequência de resultados para os seguintes dados:

Localidade: Cascavel - PR;

Latitude: $24^{\circ}59'$ Sul;

Volume de água quente: 100 litros;

Área coletora solar: 1,00 m²

Desempenho do coletor: 50%

Orientação: Norte - sem desvio azimutal;

Albedo: 0,20

KT = calculado a partir do Atlas Solarimétrico do Brasil conforme tabela 1.5;

Cálculo do KT de Cascavel - PR com a aproximação da equação de Ångstrom e de informe do Atlas Solarimétrico do Brasil, apresenta o ΔT provável na reserva de 100 litros de água aquecida, considerando a irradiação solar global, a maior eficiência mensal foi estimada sobre um plano fixo inclinado em 27° orientado para o Norte Geográfico.

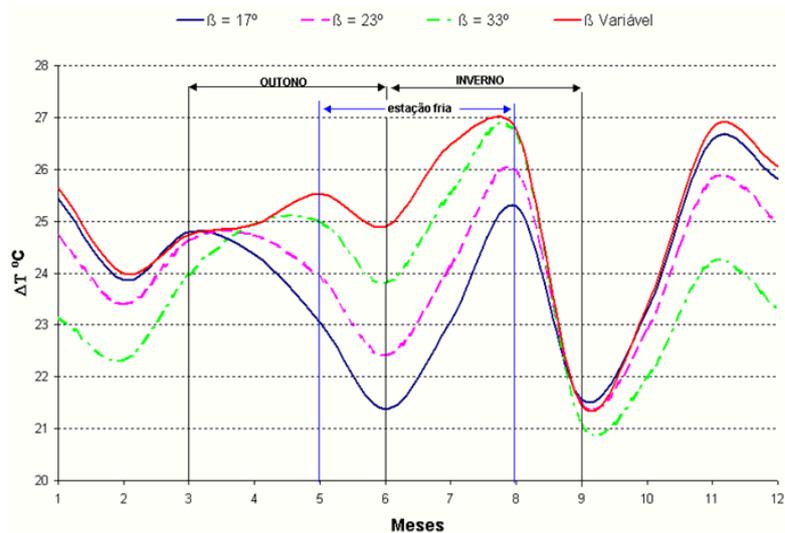


FIGURA 4.1: DIFERENCIAL TÉRMICO NO INTERIOR DO RESERVATÓRIO DE ÁGUA

FONTE: AUTOR

Na figura 4.1 se ilustram os resultados das diferenças de temperatura obtidas no interior de um reservatório térmico de 100 litros através do trabalho diário de um coletor solar de placa plana de 1,00m² com inclinação de 17°, 23°, 33° e variável orientado para o Norte Geográfico na cidade de Cascavel - PR arbitrando 50% de desempenho no coletor solar em todos os casos.

Na estação mais fria de Cascavel, quando mais se demanda de água aquecida, o pior desempenho ficou por conta da inclinação do coletor solar fixo a 27° de inclinação que a solução em deixar o mesmo simplesmente apoiado sobre as telhas comuns de barro a 30% de inclinação que correspondem aproximadamente a 27°, a queda brusca por volta de Julho se deve ao índice de claridade em 0,5 registrado para Cascavel – PR. Deve-se supor um desempenho inferior para desvios maiores que 15° com relação ao Norte para as instalações de coletores solares planos no hemisfério Sul, visto que todos os resultados anteriores se elaboraram em cálculos sem o desvio azimutal, o que na prática sobre telhados é improvável, conforme anteriormente levantado na metodologia.

4.4 Desempenho energético do coletor solar de placa plana (FPC)

4.4.1 Desempenho diário

Três dias representativos das condições meteorológicas típicas relevantes em Cascavel foram utilizados para analisar o desempenho diário da placa solar plana - FPC, sistema aquecimento solar de água - SWHS.

Eles consistem de céu muito nublado (09/08/2014), céu claro (26/08/2014) e nuvem cobriu intermitente (23/07/2014). Figura 4.2 mostra gráficos de radiação solar durante os três dias. A radiação diária máxima solar foi 875,2 W/m² no dia nublado, 1120,6 W/m² no céu dia claro e 962,7 W/m² no dia com nebulosidade intermitente.

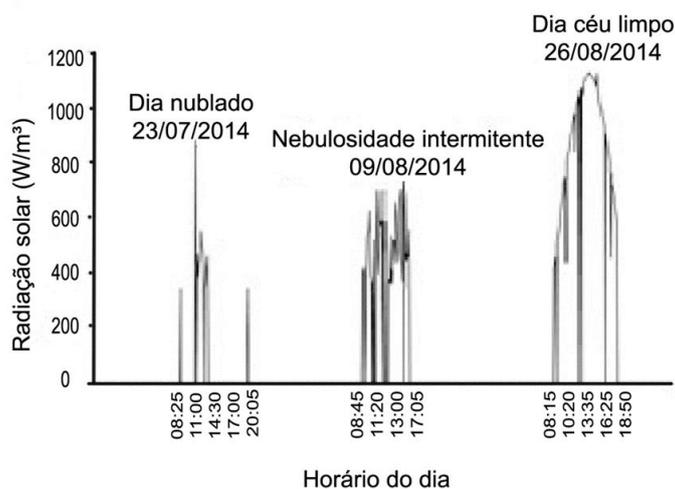


FIGURA 4.2 - RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL NA SUPERFÍCIE DO COLETOR POR TRÊS DIAS CARACTERÍSTICOS.

FONTE: AUTOR.

A Figura 4.3 mostra gráficos de temperatura ambiente para os três dias característicos, houve variação de temperatura entre 11 e 24.2 ° C.

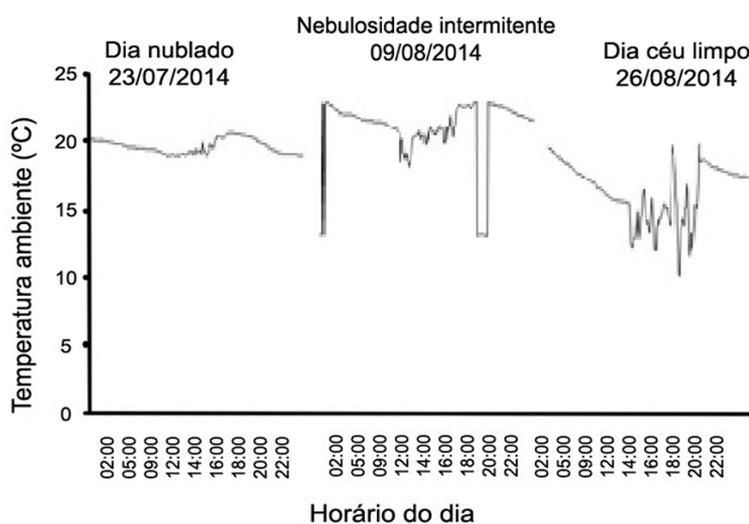


FIGURA 4.3 - TEMPERATURA AMBIENTE NOS TRÊS DIAS CARACTERÍSTICOS.

FONTE: AUTOR

4.4.2 Variação diária de temperatura

A Figura 4.4 mostra os gráficos da variação diária de temperatura solar, na saída do coletor ($T_{c,o}$), a temperatura da água na parte inferior do tanque de água quente ($T_{b,t}$), a temperatura de entrada de água fria para o tanque de água quente (TCW,i). Vê-se um aumento no ($T_{c,o}$) devido ao ganho solar através do coletor, e provoca um aumento atrasado em $T_{b,t}$. O intervalo de tempo é causado pelo tempo que leva para a troca de calor entre o fluido solar e de água no tanque, bem como a condução através do tanque de fluido para o sensor de $T_{b,t}$.

Abastecimento de água fria foi a partir de uma caixa localizado na Casa Inteligente em que o protótipo foi instalado. Variações de curto prazo no TCW,i , ocorreu com resultado de mudanças na temperatura da água boiler onde o tanque de água quente foi instalado. Vê-se que no entanto, durante o dia de céu claro a T_{out} não deixar cair abaixo de $37^{\circ}C$, devido ao modo relativamente maior quantidade de calor emitido pelo coletor solar durante todo o dia. Isso mostra que há um fluxo contínuo de dias de céu limpo, o SWHs seria necessário fornecer à noite, com uma quantidade reduzida de energia auxiliar (elétrica).

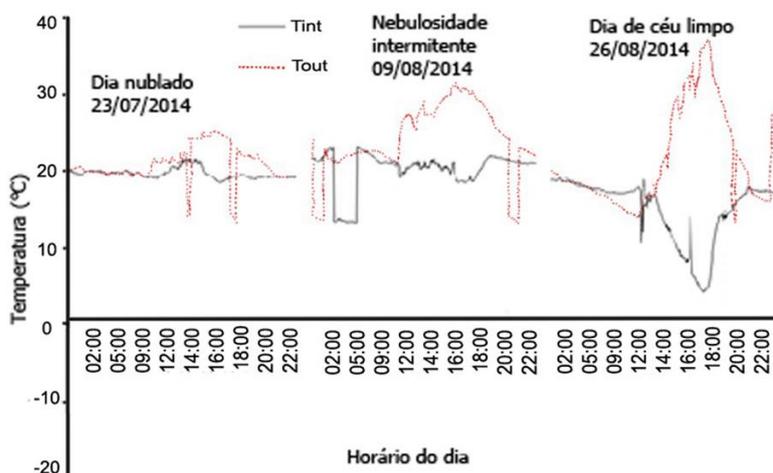


FIGURA 4.4 - VARIAÇÃO DIÁRIA DE $T_{c,o}$, $T_{b,t}$ E TCW,i , TRÊS DIAS CARACTERÍSTICOS.

FONTE: AUTOR

4.4.3 Energia Diária Coletada

Figura 4.5 mostra a energia recolhida pelo sistema sendo que a energia diária total arrecadado foi de 209,7 MJ em 23/07/2014, 7 294,3 MJ em 09/08/2014 e 1 649,6 MJ em 26/08/2014.

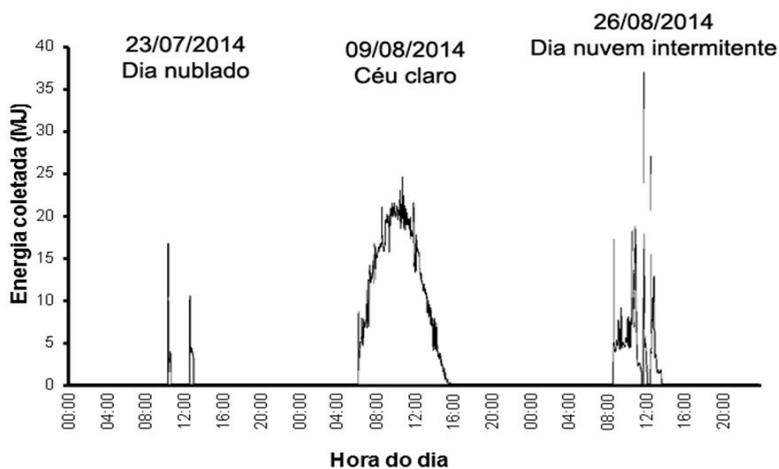


FIGURA 4.5 – ENERGIA COLETADA. FONTE: AUTOR

Figura 4.6 mostra um gráfico da energia coletada diariamente *versus* a entrada de energia solar.

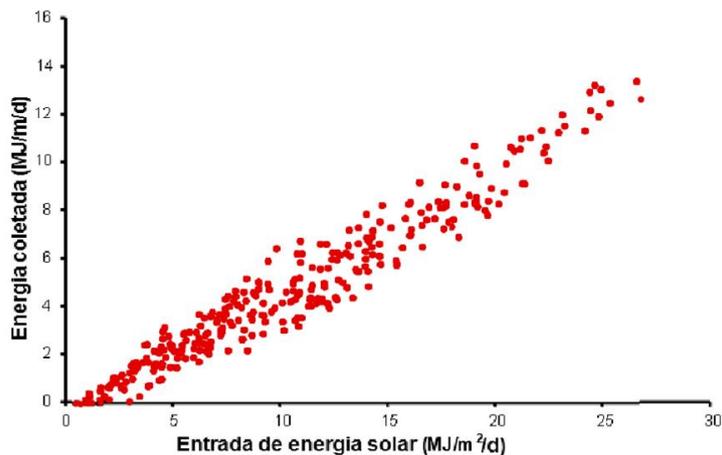


FIGURA 4.6 - ENERGIA COLETADA DIARIAMENTE X ENTRADA DE ENERGIA SOLAR. FONTE: AUTOR

Vê-se que a energia recolhida diariamente pela placa solar plana tem uma relação linear com a entrada de energia solar diariamente com correlação deficiente (R^2) de 0,9439. A alta correlação coeficientes mostra que a energia recolhida diariamente pelas FPCs pode ser prevista para um determinado dia, conhecendo a energia solar total diária, usando a equação 1.44 dada como:

$$E_c = 0,4847E_i - 0,3845 \quad (1.44)$$

Sendo:

E_i = entrada de energia solar diariamente (MJ/m²/d);

E_c = energia coletados diariamente (MJ/m²/d);

4.4.4 Desempenho mensal.

Observa-se o desempenho mensal na Figura 4.7 a temperatura da água máxima registrada em todos os meses de um ano em ($T_{c,o}$), ($T_{b,t}$), ($T_{m,t}$), (THW,i) e (TCW,o). As temperaturas da água máximas mensais em ($T_{m,t}$) e (THW,o) quase constante durante todo o ano em torno de 60,0 °C e 68,0 °C. Máxima temperatura mensal placa em ($T_{c,o}$) variou entre 42,9 °C em Julho e 70,4 °C em Dezembro, ($T_{b,t}$) variou entre 25,3 °C em Junho e 59,9 °C em Dezembro, enquanto THW,i variou entre 17,6 °C em setembro e 28,0 °C em Dezembro.

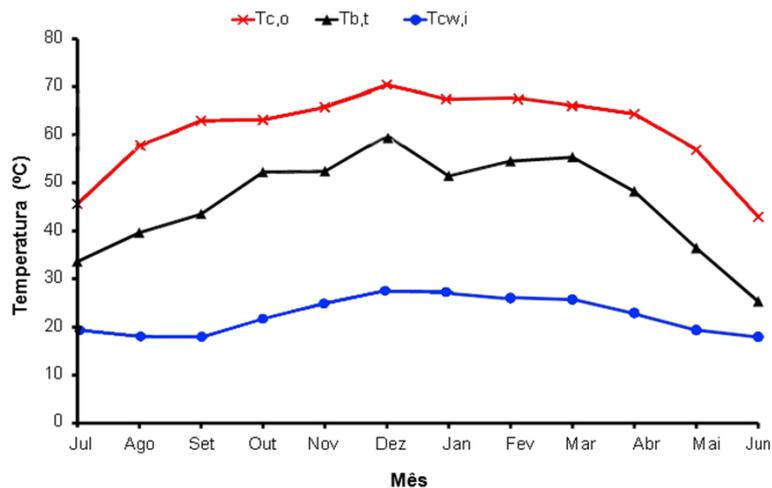


FIGURA 4.7 – TEMPERATURA DE ÁGUA MÁXIMA MENSAL.

FONTE: AUTOR.

4.4.5 Energia coletadas, entregue e perdas.

Figura 4.8 mostra média de insolação diária solar global mensal e anual na superfície, a energia do coletor recolhido e entregue ao tanque de água quente, bem como perdas de tubos de alimentação.

A média de insolação diária solar global mensal na superfície do coletor variou entre 17,3 MJ/d em Julho e 66,2 MJ/d em Dezembro, energia coletada variou entre 7,2 MJ/d em Julho e 33,1 MJ/d em outubro, a energia entregue variada entre 5,8 MJ/d em Julho e 27,0 MJ/d em outubro, enquanto as perdas de tubos de alimentação variou entre 1,4 MJ/d em dezembro e 5,0 MJ/d em outubro.

A média de insolação solar diária anual na superfície do coletor foi de 43,0 MJ/d, a energia coletada foi de 19,6 MJ/d, energia fornecida foi de 16,2 MJ/d; perda no cano de fornecimento foi de 3,2 MJ/d. Para uma insolação solar global anual sobre a superfície do coletor de 15 680,4 MJ, um total de 7 150,4 MJ foi coletado quando 5 924,0 MJ foi entregue para o tanque de água quente.

Tiwari et al. (1991) analisou o desempenho anual de FPCs solares fabricadas na Índia, com valores que variam entre 5 139 MJ entregue ao tanque de água quente e 7 024 MJ coletado.

As perdas de calor ao longo do circuito ocorreram especialmente em altas temperaturas no coletor de saída. A perda de calor total anual no tubo de alimentação para o SWHS foi 1 171,7 MJ correspondendo a 16,4% da energia coletada pela FPC e 19,8% da energia fornecida ao tanque de água quente. O comprimento do tubo de alimentação deve, portanto, ser mantido o mais curto possível e todas as juntas de isolamento para reduzir as perdas de calor. No entanto, este não era o caso para o nosso equipamento de teste desde o tanque de água quente foi localizado próximo ao chuveiro em que a FPC foi instalada.

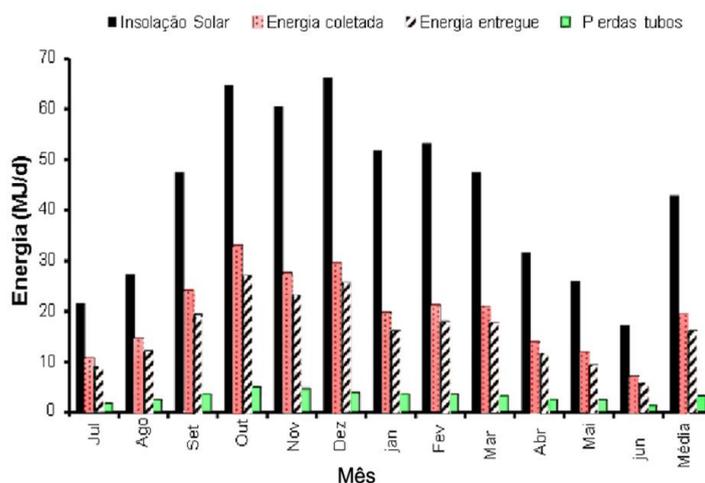


FIGURA 4.8 – MÉDIA MENSAL E ANUAL DE INSOLAÇÃO DIÁRIA SOLAR GLOBAL SOBRE A SUPERFÍCIE DO COLETOR, ENERGIA COLETADA, ENTREGUE E PERDAS NOS TUBOS DE ALIMENTAÇÃO.

FONTE: AUTOR.

4.4.6 Eficiência do Sistema e eficiência do coletor solar.

Verifica-se na Figura 4.9 a média diária mensal da eficiência do coletor solar. A média diária do coletor solar variou de 38,2% em julho para 69% em fevereiro,

enquanto a eficiência do sistema variou de 38,3% em junho para 59,8% em setembro.

A eficiência média anual do coletor solar foi de 60,6%, enquanto a eficiência do Sistema foi 52,8%, Zambolin e Del Col (2010) realizaram análise de desempenho comparativa do desempenho térmico na placa dos coletores de tubos em Padova, Itália, obtendo eficiência no sistema dos coletores planos de 61% e nos coletores de tubos evacuados de 66%.

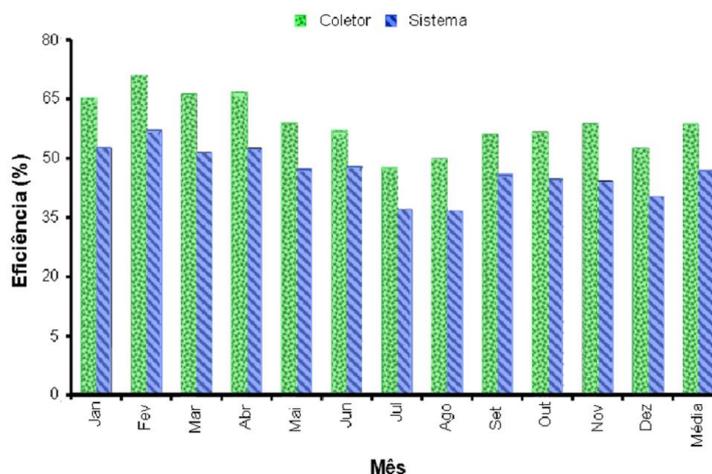


FIGURA 4.9 - MÉDIA DIÁRIA MENSAL DA EFICIÊNCIA DO COLETOR E EFICIÊNCIA DO SISTEMA.

FONTE: AUTOR

4.5 Cálculos do período de retorno do capital investido no sistema de aquecimento de água em kwh

Considerando um aquecedor composto de uma área coletora solar de 1.00 m² em chapa absorvedora de alumínio com tubos de PVC pintado de preto fosco, (Figura 1.37), carcaça fechada em caixa de alumínio reforçada com aplicação de espuma expansiva para melhor fechamento da carcaça, uma caixa d'água de polietileno envolta por manta térmica, isolado para 100 litros, mais tubos e conexões

de qualidade, cotado entre R\$ 745,00 a R\$ 940,00 para atender a uma diversidade de dificuldades locais, se considerando um bem durável, funcional e de insignificante manutenção periódica anos de operação.

Conforme cálculo para o período de retorno financeiro da tecnologia no valor de R\$ 745,00 pela equivalência de kWh de produção acumulada do aquecedor ante o preço da tecnologia também transformado em kWh por conta do preço e alíquota da ocasião inicial da aquisição (R\$ 0,75 por kWh em junho de 2015) supondo domicílios que são afetados pela alíquota de 25% e 12% separadamente.

A produção de calor está ajustada diretamente proporcional à área coletora de 1,00 m², ao rendimento de 50% e à irradiação solar global média mensal estimada sobre um plano inclinado de forma variável para a estação fria conforme cálculo verificado anteriormente. Por este processo uma tecnologia termo solar adquirida e instalada por R\$ 745,00 nas características fornecidas, levaria 18 meses para se pagar conforme uma alíquota de 25% sobre a cobrança da conta de energia elétrica e 24 meses para 12% de alíquota.

Período de retorno pelo procedimento da equivalência em kWh para um investimento termo solar entre R\$ 745,00 a R\$ 940,00 com base ao calor solar acumulado neste método da equivalência em kWh entre o preço da tecnologia e o acúmulo provável de calor do aquecedor solar em kWh em operação contínua, o calor não consumido especialmente nos dias de verão onde costuma sobrar calor no reservatório para o dia subsequente.

Por este motivo se apresentam os resultados pelo método da carga média provável inibida do chuveiro elétrico estimada para famílias de 3 a 7 habitantes como fração ideal para realização do período de retorno.

Neste procedimento se arbitrou que 65% da carga mensal do chuveiro elétrico estaria desabilitada por conta do uso do aquecedor solar apenas considerando o banho noturno, posto que seria demasiado abstrato equacionar o calor residual para o banho da manhã ante o desconhecimento da cultura e hábitos de uso da população em domicílios de diferentes densidades.

Segundo GOY (2013), que comparou um custo Tecnologia: Boiler compacta em metal cobre e alumínio com 200 litros de reservatório e coletor solar acoplado de 2,00 m² com um rendimento de 58,4%, apresentado entre R\$ 1 650,00 a R\$ 2 200,00, ante o custo do ASBC e das demais tecnologias de manufatura industrial estabelecidas no comércio local em metal e termoplásticos, vale lembrar que se ateuve ao propósito de melhorar a performance na temporada fria assim como se estabelecer um produto de longa duração com o mínimo de reparo e manutenção, posto na melhor situação de exposição solar livre do corpo da edificação.

Contudo segue um comparativo de período de retorno entre a tecnologia aqui proposta para linhas de mercado, atendo-se ao fato de volumes e áreas coletoras diferentes valorizando o conteúdo teórico sobre irradiação solar na cidade de Cascavel - PR com amparo da revisão bibliográfica e o primeiro método de estimativa do período de retorno por conta do calor produzido em cada tecnologia com as demais características locais: Cidade de Cascavel - PR, latitude Sul 24°59' Sul, irradiação solar incidente em plano inclinado a 27° (sobre telhado) em base a dados processados do Atlas Solarimétrico do Brasil, com a consideração de um céu isotrópico visto a tendência mensal dos coeficientes de transparência atmosférica por volta de 0,5 albedo ajustado para 0,2, tarifa da energia elétrica para o setor residencial em R\$ 0,75 por kWh, alíquotas de 12% e 25%.

5 CONCLUSÕES

A análise do desempenho energético durante todo o período de uma SWHSs comumente instalados com FPC foi realizada utilizando um protótipo em Cascavel - Paraná. O SWHS foi projetado e operado para imitar o funcionamento da vida real levando em consideração a interação entre a FPC e o usuário.

Os resultados mostraram que, para uma insolação solar global sobre a superfície do coletor de 15 680,4 MJ (corresponde a 4,35 kw total e 1,08 kw/m²), um total de 7 150,4 MJ foi coletado quando 5 924,0 MJ foi entregue para o tanque de água quente. Para a fração solar foi de 32,2%. Energia média diária coletada, energia fornecida pela placa solar, fornecimento de tubos perdas foram de 19,6 MJ/d, 16,2 MJ/d e 3,2 MJ/d, respectivamente.

A média diária coletor solar variou de 38,2% em julho para 69% em fevereiro, enquanto a eficiência do sistema variou de 38,3% em junho para 59,8% em setembro. A eficiência média anual do coletor solar foi de 60,6%, enquanto a eficiência média do sistema foi 52,8%.

A máxima temperatura registrada no coletor placa plana de temperatura de saída foi de 69 ° C, enquanto a perda de calor total anual tubo de alimentação para o SWHS foi 1 171,7 MJ correspondendo a 16,4% da energia coletada pela FPC e 19,8% da energia fornecida ao tanque de água quente.

Os tubos de alimentação do circuito solares devem ser mantidos tão curto quanto possível, a fim de reduzir a perda de energia. Os resultados deste estudo e os do estudo realizado pelo Building Research Establishment (2009) revelou que SWHSs com FPCs geraria entre 1 750 e 1 790 MJ/m²/ano de calor em climas tropicais.

Este estudo apresentado revela que o tamanho dos reservatórios de armazenagem afeta o desempenho e usabilidade dos sistemas de aquecimento solar de água. Em aplicações práticas, os resultados mostram que, as esferas flutuantes aumentam a eficiência, e o desempenho dos sistemas torna-se melhor,

mas a temperatura da água utilizável é tão importante quanto o desempenho do sistema.

Valorização econômica através do custo para este protótipo verificasse no período de retorno pelo procedimento da equivalência em kWh, para um investimento e uma tecnologia termo solar adquirida e instalada por R\$ 745,00 nas características fornecidas, levaria 18 meses para se pagar conforme uma alíquota de 25% sobre a cobrança da conta de energia elétrica e 24 meses para 12% de alíquota.

Contribuir na conscientização das pessoas, pelo meio ambiente e pelo os graves problemas sociais. Imagine o volume de latas de alumínio e cacos de vidros outros descartáveis, que poderemos tirar do meio ambiente, com a reciclagem direta na aplicação no aquecedor solar, ou em outros projetos existentes.

Conclui-se que o modelo de coletor solar proposto, que viabiliza financeiramente a aquisição de um sistema de aquecimento solar e ainda ajuda a preservação do meio ambiente por meio da reciclagem, pode ser uma das soluções para iniciar uma cultura solar a baixo custo. Usar aquecimento solar é um ato de desenvolvimento e racionalidade sob todos os aspectos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Discutir mecanismos de aproveitamento de energia, influência da tinta, reflexão e absorção nos tubos de PVC.
- Utilização de materiais alternativos para composição da caixa d'água para obtenção de resultados mais eficazes.

7 REFERÊNCIAS

- ABRAVA. O mercado elege o Sol. <http://www.abrava.com.br>. Acessado em 16/10/2013.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Tarifas. <http://www.aneel.gov.br/> Acessado em Dezembro de 2013.
- ASHRAE-93, Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors, ASHRAE, Atlanta, 2003.
- AYOADE, J. O. Introdução à Climatologia dos Trópicos. 2ª edição, 1988, Editora Bertrand. São Paulo, Brasil.
- BAGGIO, A., Aproveitamento dos Resíduos de Compósitos à Base de Resina Poliéster e Fibra de Vidro. Dissertação de Mestrado, aprovada pelo programa de pós graduação em agronomia "Energia na Agricultura", UNESP, Botucatu SP, 2005.
- BARTOLI, R., et al.; Desenvolvimento de Aquecedor Solar de Água Utilizando Materiais Termoplásticos, 6º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Gramado 2001.
- Building Research Establishment, Clearline Solar Thermal Test Report e Average Household Simulation. Client Report Number 251175, Viridian Solar, 2009. Available at:http://www.viridiansolar.co.uk/Assets/Files/BRE_Report_Viridian_Solar_Average_House_Simulation.pdf.
- BEZERRA, Arnaldo Moura. Aplicações Práticas da Energia Solar. Nobel. São Paulo 1990.
- CASTRO M. G., COLMENAR A. S. Energía Solar Térmica de Baja Temperatura. Progensa 2000, Sevilla Espanha.
- CAVALEIRO, C. K. N. Mecanismos de Incentivo ao uso de Fontes Renováveis em Sistemas de Descentralizados à Luz da Experiência Norte americana E ncontro de Energia no Meio Rural. AGRENER 2000, Setembro 2000. Campinas SP Brasil.
- COLLE, S. ABREU, S. L. SALAZAR, J. P. L. C. REGUSE, W. Impacto da Energia Solar Sobre o Pico de Demanda de Energia de Chuveiros Elétricos de Famílias de Baixa Renda no Brasil. XII Congrese Ibérico y VII Congreso Íbero Americano de Energía Solar. Vigo Espanha, 14-18 Setembro de 2004. Editora M. Vazquez y J. F. Seara.
- Christian Oudet - Polymères - Structures et propriétés - Introduction - Masson (1993) p. 25, pp. 66 et suivantes (ISBN 2-225-84271-X)

CZAJKOWKI, J., Radiac 2/95 <http://czajkowski.iwarp.com/software.htm>, acessado em Setembro de 2013.

DUFFIE, J. A. BECKMAN, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley, NY, 1991.

E.H. Amer, J.K. Nayak, G.K. Sharma, Transient method for testing flat-plate solar collectors, Energy Conversion and Management 39 (7) (1998) 549 e 558.

ELETROBRÁS, Ministério de Minas e Energia, Procel Apresenta Pesquisa Sobre Posse e Uso de Equipamentos Elétricos. Divisão de Imprensa da Eletrobrás, 18/04/2012.

European Standards, CSN EN 12975-2 e Thermal Solar Systems and Components e Solar Collectors e Part 1: General Requirements (2006). FROTA, Anésia Barros. Geometria da Insolação. Geros. Rio de Janeiro 2004.

E. Zambolin, D. Del Col, Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions, Solar Energy 84 (8) (2010) 1382e1396.

GAMA, P. H. R. P. OLIVEIRA, A. Conservação de Energia e sua relação com a qualidade de Energia Elétrica, XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (1999), Brasil.

GIBA, C., Atlas Solarimétrico do Brasil – Banco de Dados Terrestres Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, 2000. GITTMAN, L. J. Princípios da Administração Financeira. 7ª edição Harbra, São Paulo 1997.

GIMENES, A.L.V, SILVESTRE, W.P. UDAETA, M.E.M. Viabilidade da execução de projeto de eficiência energética com uso de energias renováveis mediante implantação de equipamento híbrido fotovoltaico e térmico para geração de eletricidade e aquecimento de água com energia solar para substituição de chuveiros elétricos. In. Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, 21. 2011, Florianópolis. Revista XXI SNPTEE. Florianópolis. vol. 2 Fevereiro | 2011.p.43.

GOERCK, M. Determinação do potencial energético de um coletor solar foto térmico na região do vale do Taquari – RS Brasil. Lajeado. Centro Universitário Univates. 2008. 92p. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento)

GOY, Leonardo. Casa Civil corrige: PAC 2 prevê R\$ 1,088 tri em energia. Isto é dinheiro. [S.l.] 29 mar 2010. Economia on line. Disponível em http://www.istoedinheiro.com.br/noticias/18144_CASA+CIVIL+CORRIGE+PAC+2+P+REVE+R+1088+TRI+EM+ENERGIA. Acesso em 03 jan. 2013.

GOLDEMBERG, J. t alii, Energy for Development, World Resources Institute, Washington, 1987.

GOLDEMBERG, J. JOHANSSON, THOMAS, B. (Editors). Energy As An Instrument for Socio-Economic Development. United Nations Development Programme, New York, NY: 1995.

GRANJA, A. D. Transmissão de Calor em Regime Periódico: Efeito da Inércia Térmica em Fechamentos Opacos. Campinas 2002. Tese de doutorado em Engenharia Civil FEC UNICAMP.

HAY, J. E., DAVIS, J. A. Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface. Proceedings. First Canadian Solar Radiation Data Workshop, p. 59-72, 1980.

HERNÁNDEZ, A. L. Una Herramienta Computacional para el Cálculo de Coordenadas Solares y la Estimación de Irradiación Solar Horaria. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - ASADES. Vol. 7, Nº 2, 2003. Argentina.

I.M. Michaelides, P.C. Eleftheriou, An experimental investigation of the performance boundaries of a solar water heating system, Experimental Thermal and Fluid Science 35 (6) (2011) 1002 e 1009.

INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia. Normalização e Qualidade Industrial. Programa Brasileiro de Etiquetagem - Sistemas e Equipamentos para Aquecimento Solar de Água - Coletores Solares para banho. Edição de Maio de 2008.

LABAKI, L. C. Tratamento de dados climáticos de Campinas – SP, para análise de desempenho térmico de edificações. Encontro Nacional de Modelos de Simulações de Ambientes. Anais. São Paulo, NUTAU/FAUUSP.1995. Pp.355–365.

LIU, B. Y. H., JORDAM, R. C., The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation, Solar Energy, 1960, v.4, n. 3, p.1-19.

L.M. Ayompe, A. Duffy, M. Mc Keever, M. Conlon, S.J. McCormack, Comparative field performance study of flplaatte and heat pipe evacuated tube collectors (ETCs) for domestic water heating systems in a temperate climate, Energy 36 (5) (2011) 3370 e 3378.

L.M. Ayompe, A. Duffy, Analysis of the thermal performance of a solar water heating system with flat plate collectors in a temperate climate, Energy 58 (5) (2013) 447 e 454.

MAIA, A. G., Especialização de Classes Sociais no Brasil: Uma Nova Dimensão para Análise da Estrutura Social, Tese de doutorado, Instituto de Economia, UNICAMP, Campinas SP 2006, p. 81.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project. Solar Energy, v. 81, n. 4, p. 517-528, 2007.

MANEA, T. F. et al. Determinação de parâmetros de desempenho para coletores solares tubulares a vácuo. LABSOL – Laboratório de energia solar – PROMEC - UFRGS. 2011.

MATIAS, W. F., GOMES, J. M. Matemática Financeira. Atlas, São Paulo 1994.

MME, Ministério de Minas e Energia do Brasil. Competência do Desenvolvimento Energético. <http://www.mme.gov.br/Desenvolvimentoenergetico/competencia.htm> Acessado em 11/08/2013.

MOGAWER, T.; SOUZA, T. M. Sistema Solar de Aquecimento de Água para Residências Populares. In. Encontro de Energia do Meio Rural, 5. 2004, Campinas. Anais eletrônicos. Disponível em <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000200050&script=sci_arttext&tIng=pt>. Acesso em 03/11/2013.

MONTEIRO, G. A Esperança de uma Alternativa Sustentável, Revista do CREA SP, nº 8, ano III, 2003, São Paulo, Brasil;

MOREIRA, Ajax R. Bello. A expansão do Setor Brasileiro de Energia Elétrica: Falta de Mercado ou Falta de Planejamento? Notas Técnicas 1. Instituto de Pesquisas Econômicas IPA. Rio de Janeiro 2003.

MACYNTIRE, A. J. Instalações Hidráulicas Prediais e Industriais, 3ª edição, LTC livros técnicos e científicos editora, Rio de Janeiro 1996.

NASPOLINI, H. F.; Rüter, R. Assessing technical and economic viability of low cost domestic solar hot water systems (DSHWS) in low income residential dwellings in Brazil. Renewable Energy. 2012, vol. 48, p 92-99

NASPOLINI, H. F.; MILITÃO, H. S. G.; RÜTER, R. The role and benefits of solar water heating in the energy demands of low-income dwellings in Brazil. Energy Conversion and Management, vol. 51, ed. 12, dez. 2010, p. 2835–2845.

NEWHOME. Coletores tubulares a vácuo. Disponível em <http://www.newhome.com.br/HTMLs/Ekohome/Solar/T%C3%A9rmico/ColetorTubVac> . Acesso em julho de 2013.

NEWNAN, D.; Eschenbach, T.; Lavelle, J. Engineering Economics Analysis. 11ª edição. Oxford University Press, 2011.

NICHITA, G. Nova lei torna aquecimento solar obrigatório em SP. Revista Sustentabilidade, jul./2007. http://www.revista_sustentabilidade.com.br/noticias/nova-lei-torna-Aquecimento-solar-obrigatorio-em-sp. Acesso em maio de 2013.

NBR 128 /1963, Instalações Prediais de Água Quente – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro 1968.

NBR 7198 / 1982, Projeto e Execução de Instalações Prediais de Água Quente, Procedimento, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro 1982.

NBR 10184 / 1988, Coletores Solares Planos para Líquidos – Determinação do Rendimento Térmico, Rio de Janeiro 1988.

NBR 12269/1992, Execução de Instalações de Sistemas de Energia Solar que Utilizam Coletores Solares Planos para Aquecimento de Água. Procedimento, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 30 de Abril de 1992.

NORTON, B. Anatomy of a solar collector. Refocus, vol. 7, ed.3, p. 32-35. 2006.

OLIVA, G. A. Utilização de Aquecedores Solares de Baixo Custo em Programas de Gerenciamento pelo Lado da Demanda. XV SNPTEE, Brasil, 2000.

OLIVEIRA JR., C. J. Controle eletrônico de potência em aquecedores elétricos de passagem por semiciclos otimizados. São Paulo. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica de São Paulo. 2006.

OLIVEIRA, S. H. F. Dimensionamento de Sistemas Fotovoltáicos Autônomos: Ênfase na Eletricidade de Residências de Baixo Consumo. Dissertação de Mestrado aprovada pelo programa de Interunidades (EP/FEA/IEE/IF) da USP. São Paulo 1997.

PEREIRA, R. C., et alli; Construção e Teste de Coletores Solares de Baixo Custo a Base de PVC. 8º Congresso Brasileiro de Polímeros. Águas de Lindóia, São Paulo 2005.

PEREIRA, R. C., et alli; Eficiência Térmica de Coletores Solares de Baixo Custo CSBC. 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, PR, Novembro de 2006.

PIRES, I. A. Caracterização de Harmônicos Causados por Equipamentos Eletro-Eletrônicos Residenciais e Comerciais no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Eng. Elétrica da UFMG 2006.

PRADO, R. T. A., GONÇALVES, O. M. Water Heating Through Electric Shower and Energy Demand. Energy and Buildings, volume 29 p. 77-82. 1998.

R.C. Tiwari, A. Kumar, S.K. Gupta, G.D. Sootha, Thermal performance of flat- plate solar collectors manufactured in India, Energy Conversion and Management 31 (4) (1991) 309e313.

RADIASOL. Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Engenharia Mecânica, Brasil. <http://www.mecanica.ufrgs.br/solar/#softwares>. Acessado em Abril de 2013.

REDPATH, D. A. G ET al. Experimental investigation of fluid flow regime in thermosyphon heat-pipe evacuated tube solar heat heaters. Dublin. Conference on Passive and Low Energy Architecture, 22. 2008.

RÍSPOLI, Í. A. G., MARIOTONI, C. A. Irradiação Solar - Dimensionamento e Verificação - Recursos na Palma da Mão, Revista Científica Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente, ISSN 0329-5184. Argentina 2007.

RODRIGUES, D., MATAJS, R. Um Banho de Sol para o Brasil. – o que os aquecedores solares podem fazer pelo meio ambiente e a sociedade. Vitae Civilis. Instituto para o Desenvolvimento, Meio Ambiente e Paz, ISBN 85-99722- 01-8. p 102. São Lourenço da Serra SP.

ROSA, Daniel Jordão de Magalhães, Caracterização da Radiação Solar: O Caso da Cidade Universitária/USP e da Ilha do Cardoso/Cananéia. Dissertação de Mestrado, aprovada em Julho de 2003, Universidade Politécnica de São Paulo Brasil USP.

RÍSPOLI, Í. A. G., MARIOTONI, C. A. Método Simplificado para o Dimensionamento do Volume de Água Quente Focando Sistemas de Aquecimento Solar Dedicados ao Banho, Revista Científica Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente, ISSN 0329-5184. Argentina 2007.

RÍSPOLI, Í. A. G., MARIOTONI, C. A. Tecnologia Adequada para Sistema de Energia Solar visando Aquecimento de Água para o Banho Humano em Moradias do Meio Rural. 5º Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída AGRENER 2004. Centro de Convenções Campus da UNICAMP. Campinas SP.

RÍSPOLI, Í. A. G. Estudo do Aproveitamento da Energia Solar para o Aquecimento de Água em Edificações Unifamiliares de Baixa Renda. Dissertação de Mestrado FEC UNICAMP. BAE UNICAMP, Campinas SP Brasil 2001.

RÍSPOLI, Í. A. G., MARIOTONI, C. A. Encurtamento do Período de Retorno de um Investimento Focando a Aplicação da Energia Solar Passiva nas Edificações de Menor Poder Aquisitivo. III Workshop Brasil – Japão em Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, UNICAMP 2005.

SARTORI, E. Não há Falta de Energia nem de Chuvas. Energias Renováveis. Artigos. <http://www.aondevamos.eng.br/verdade/index.html> . Acessado em Novembro de 2013.

SEEWALD, A. Caracterização de Coletores Solares de Baixo Custo. Monografia apresentada ao dpto de Engenharia Mecânica da escola de engenharia da Universidade Federal do Rio Grando do Sul. Porto Alegre, 2004.

SOCIEDADE DO SOL, Aquecedor Solar de Baixo Custo. Organização não governamental. <http://www.sociedadedosol.org.br>. Acessado em Dezembro de 2013.

SOLETROL. O Aquecimento Solar em Núcleos Habitacionais. <http://www.soletrol.com.br/noticias/informativos/49/2.php>. Acessado março de 2013.

TESSARO, A. R. Desempenho de um Painel Fotovoltaico Acoplado a um Rastreador Solar. 4º Encontro de Energia no Meio Rural e Geração. Distribuída AGRENER 2006 U NICAMP. Campinas SP.

TOLMASQUIM, M. T., Fontes Renováveis de Energia no Brasil, Interciência, RJ 2003.

TOLMASQUIM, M. T., GUERREIRO, A., Mercado de Energia 2006 – 2015, EPE, RJ, 2005.

TOLMASQUIM, M. T., GUERREIRO, A., Consumo de Energia Cresceu 4,6% em Janeiro de 2008. Publicação da Diretoria de Estudos Econômicos e Energéticos da Empresa de Pesquisa Energética – EPE, Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica. Ano I, nº5, Fevereiro de 2008, Rio de Janeiro.

VARELLA, F. K. O. M. Tecnología Solar Residencial: Inserção de Aquecedores Solares de Água no Distrito de Barão Geraldo – Campinas. Dissertação de Mestrado. Engenharia Mecânica UNICAMP. Campinas 2004.

VÁZQUES, M. E. Una Brevíssima História de la Arquitectura Solar, <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n9/amvaz.html> Acessado em 15/10/2013.

Z. Chen, S. Furbo, B. Perers, J. Fan, E. Andersen, Efficiencies of flat plate solar collectors at different flow rates, Energy Procedia 30 (0) (2012) 65e72.