

DAIANE MIEKO ICERI

ANÁLISE DA RELAÇÃO DESEMPENHO/CUSTO DE ALGUNS COLETORES
SOLARES COMERCIAIS

Bauru 2014

DAIANE MIEKO ICERI

ANÁLISE DA RELAÇÃO DESEMPENHO/CUSTO DE ALGUNS COLETORES
SOLARES COMERCIAIS

*Dissertação apresentada à
Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia
Mecânica.*

*Área de concentração:
Fenômenos de Transporte*

Orientador:
Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon

Bauru 2014

Iceri, Daiane Mieko.

Análise da relação desempenho/custo de alguns coletores solares comerciais / Daiane Mieko Iceri, 2014

93 f.

Orientador: Vicente Luiz Scalon

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014

1. Energia solar. 2. Sistema de aquecimento doméstico. 3. Otimização. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de DAIANE MIEKO ICERI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 18 dias do mês de julho do ano de 2014, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. JOÃO BATISTA CAMPOS SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica/Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de DAIANE MIEKO ICERI, intitulada "ANÁLISE DA RELAÇÃO DESEMPENHO/CUSTO DE ALGUNS COLETORES SOLARES COMERCIAIS". Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON



Prof. Dr. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA



Prof. Dr. JOÃO BATISTA CAMPOS SILVA



*“O futuro pertence àqueles
que acreditam na beleza de
seus sonhos”*

Eleanor Roosevelt

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Massamitsu Iceri e Nilza Yassuko Ivama Iceri, não só por todos os ensinamentos de vida, como respeito, dedicação, responsabilidade, entre outros, mas principalmente por todo o esforço de uma vida para que um dia eu pudesse alcançar essa grande etapa em minha vida. E aos meus irmãos, Taciane Mitsuko Iceri e Felipe Yukio Iceri que sempre me apoiaram com muito amor e companheirismo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon por todo o ensinamento, paciência, compreensão. Sempre levarei comigo os grandes conhecimentos e base acadêmica adquiridos em meu mestrado.

Ao meu avô Yassuo que sempre apoiou e se orgulhou do meu crescimento intelectual. A minha tia Xi pelo apoio à minha família. E aos meus padrinhos, Kunimitsu e Tokie, por sempre me apoiar e participar em minhas conquistas.

Aos meus amigos de laboratório, por todo o apoio e amizade, que me ajudaram no desenvolvimento do meu projeto.

A CAPES pelo apoio financeiro.

E a todo o Departamento de Engenharia Mecânica, da UNESP, Câmpus Bauru.

ICERI, D. M. **Análise da relação desempenho/custo de alguns coletores solares comerciais.** 2014. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2014.

RESUMO

O uso da energia térmica provinda da energia solar a partir do uso de aquecedores solares de água residenciais associados aos sistemas convencionais vêm crescendo, principalmente com o intuito da redução do uso dos chuveiros elétricos. Porém é necessário que tais equipamentos sejam dimensionados de maneira correta de acordo com cada aplicação e necessidade, já que se isso não ocorrer o sistema não apresentará vantagens. Um sistema de aquecimento de água é basicamente composto por um coletor de placa plana, um reservatório térmico e um sistema de aquecimento auxiliar. Coletores solares são capazes de transformar a energia da radiação solar em energia térmica, que na forma de calor, é transferida para um fluido. O sistema de um coletor solar depende da radiação solar sobre as placas, da temperatura do ar ambiente e da temperatura desejada da água quente. A radiação solar é dependente da localização em que o coletor foi instalado e para que direção o mesmo está voltado, definindo assim a quantidade de calor útil absorvido pelo coletor e seu rendimento. A eficiência do coletor solar é definida como a razão entre o calor útil recebido pelo fluido e a radiação solar incidente sobre a superfície do coletor, na forma de radiação direta, difusa e a refletida de outras superfícies, em um dado intervalo de tempo. A eficiência do coletor depende de vários fatores de projetos, sendo os principais: o número de coberturas da placa, o tipo do vidro e suas características refletivas, o espaçamento entre o coletor e o vidro, o tipo e espessura do isolamento, o fator de absorção da placa absorvedora, entre outros fatores. Para o dimensionamento correto de sistemas de aquecimento solar de água para o uso doméstico, a partir das curvas de eficiência dos coletores, foram desenvolvidas algumas metodologias, baseadas na equação da energia útil, ou no cálculo da utilizabilidade diária de radiação solar, ou na obtenção da fração solar que o sistema fornece em relação a demanda de água quente. Neste trabalho é proposta uma análise de diferentes métodos de dimensionamento de sistemas de aquecimento solar, o estudo econômico dos sistemas de aquecimentos solares e a análise

de sistemas otimizados a fim de obter qual o melhor sistema para cada aplicação de sistemas domésticos. Também se propõe estudar a viabilidade de um sistema novo proposto de coletores com e sem cobertura acoplados, considerando que o coletor sem cobertura realize um pré aquecimento da água do reservatório para uma maior elevação da temperatura pelos coletores com cobertura. O objetivo foi de fazer uma análise dinâmica da variação da temperatura e avaliar a energia útil do sistema, e posteriormente fazer um estudo de otimização do sistema para verificar sua viabilidade econômica e buscar os sistemas ótimos, com o intuito de obter um sistema com uma área maior, porém com um custo menor se comparado ao sistema composto apenas por coletores com cobertura. Para o desenvolvimento desse estudo será utilizado um *software* conhecido como Gnu-Octave para implementar rotinas de cada método estudado, e também utilizar ferramentas de otimização para obter os sistemas otimizados para cada proposta.

Palavras-chave: Sistema de aquecimento doméstico, energia solar, coletores de placa plana, sistema acoplado, otimização

ICERI, D. M. **Analysis of relative performance/cost of some commercial solar collectors**. 2014. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2014.

ABSTRACT

The thermal solar energy use for domestic water heaters associated with conventional systems have been growing, especially the aim of reducing the electric showers use. However it is necessary that the equipment is design correctly according to each application, since if that system does not fulfill this will not present advantages. A solar hot water system is composed by a flat-plate collector, a thermal storage and auxiliary heating system. Solar collectors are able to transform solar radiation into thermal energy and in the heat form that is transferred to a fluid. The solar collector depends on the solar radiation over the plates, the ambient temperature and the demand hot water temperature. Solar radiation is dependent on the location which the collector was installed and the direction it is facing, thus the useful heat absorbed by the collector and its performance can be define. The solar collector efficiency is defined as the ratio of useful heat received by the fluid and the solar radiation incident on the collector surface, which it is composed by the radiation direct, diffuse and reflected from other surfaces, in a given time interval. The collector efficiency depends on several projects factors and the main factors are: the number of collectors covers, the kind of the glass and its reflective characteristics, the spacing between the absorber surface and the glass and the thickness of insulation, the absorption factor of the plate, the other factors. The correct design of the domestic solar hot water using, from the collectors efficiency curves, some methodologies based on the useful energy equation, or the calculation of daily utilizability of solar radiation, or the determination of solar fraction of the system that supplied the hot water demand. This paper proposes an analysis of different methods to desing solar hot water systems, the economic study of solar heating systems and optimized analysis in order to get the best system to be applied for each domestic systems application. And it study the feasibility of a proposed new coupled collectors system composed by unglazed and glazed collectors, whereas the unglazed collector produces a pre-heating of water from the reservoir to raise the greater temperature by the glazed collectors. The aim of this study is to make a

temperature dynamic analysis and evaluate the useful energy of the system, and then make an examination of the optimization of the system to verify the system economic feasibility and to seek the optimal systems, in order to obtain a system with an area higher, but at a lower cost compared to system composed by only glazed collectors. The study development was based on the software known as Gnu-Octave in order to implement routines to each method studied, and also use optimization tools to obtain the optimal system for each proposal will be used.

Key-words: Domestic hot water system, solar flat plate collector, coupled system, optimization.

Sumário

AGRADECIMENTOS.....	ii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xii
SIMBOLOGIA.....	xiii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Contexto brasileiro da energia solar.....	2
1.2 - Coletor Solar de Placa Plana.....	4
1.3 - Objetivos.....	9
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA.....	20
3.1 - Método Estático.....	21
3.2 - Método do Modelo Dinâmico.....	27
3.3 - ϕ , f-Chart.....	29
3.4 - Método do Modelo Dinâmico para um Sistema Acoplado de Coletores.....	35
3.5 - Análise Econômica.....	39
3.6 - Otimização.....	41
3.6.1 - Otimização Univariável.....	42
3.6.2 - Otimização Multivariável.....	43
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS.....	44
4.1 - Comparação entre os sistemas dinâmicos acoplado e simples.....	51
4.2 - Otimização.....	61
4.2.1 - Sistema acoplado.....	62
CONCLUSÕES.....	65
Referências.....	67

	viii
ANEXO A.....	71
ANEXO B.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Consumo de algumas formas de energia ao longo dos anos.....	3
Figura 2: Demanda energética por setor.....	4
Figura 3: Componentes de um coletor solar de placa plana.....	5
Figura 4: Gráfico de Eficiência de diferentes tipos de coletores.....	6
Figura 5: Diagrama área do coletor pelo volume do reservatório térmico para uma fração solar constante.....	12
Figura 6: Regiões de sistemas ótimos de aquecimento solar segundo desempenho anual.....	13
Figura 7: Esquema de um sistema de aquecimento solar.....	13
Figura 8: Seção transversal de um coletor de placa plana.....	14
Figura 9: Esquema integrado de coletores fotovoltaicos e térmicos.....	15
Figura 10: Esquema de dessalinização conectado a um sistema de coletores solares ligados em série.....	16
Figura 11: Seção transversal de um coletor de polímero.....	17
Figura 12: Esquema representativo das trocas de calor pela Lei de Kirchhoff.....	18
Figura 13: Ângulo do pôr do sol.....	22
Figura 14: Variação do ângulo de declinação ao longo das estações do ano.....	24
Figura 15: Fluxograma do Método da Energia Útil.....	28
Figura 16: Esquema proposto para o Método ϕ , f-Chart.....	30
Figura 17: Razão entre o produto transmitância absorptância médio mensal diário e o normal em função do ângulo de incidência para diferentes quantidades de coberturas.....	34
Figura 18: Fluxograma para o Método ϕ , f-Chart.....	36
Figura 19: Esquema proposto para recirculação no reservatório de um sistema acoplado de coletores.....	37

Figura 20: Esquema de instalação de um circuito de aquecimento solar por termossifão	47
Figura 21: Variação da fração solar ao longo de um ano, para os diferentes métodos estudados.....	51
Figura 22: Decomposição da radiação horária para o dia típico de dezembro.....	52
Figura 23: Decomposição da radiação horária para o dia típico de Junho.....	53
Figura 24: Variação da temperatura de mistura para os sistemas simples e acoplado, para o dia típico de dezembro.....	54
Figura 25: Variação da temperatura de mistura para os sistemas simples e acoplado, durante o dia típico de junho.....	55
Figura 26: Energias úteis horária para os sistemas acoplado e simples para o dia típico de dezembro.....	56
Figura 27: Energias úteis horária para os sistemas acoplado e simples para o dia típico de junho.....	56
Figura 28: Energia acumulada ao longo do dia típico de dezembro para os sistemas acoplado e simples.....	57
Figura 29: Energia acumulada ao longo do dia típico de junho para os sistemas acoplado e simples.....	58
Figura 30: Eficiência horária para os sistemas simples e acoplados no dia típico de dezembro.....	58
Figura 31: Eficiência horária para os sistemas simples e acoplados no dia típico de junho.....	58
Figura 32: Variação da fração solar para os sistemas simples e acoplado ao longo de um ano.....	59
Figura 33: Variação da temperatura de mistura do reservatório térmico de acordo com a razão volumétrica y	60
Figura 34: Variação da fração solar anual média mensal de acordo com a razão volumétrica y	61
Figura 35: Variação do custo total dos sistemas simples para os métodos estudados em função da área total.....	61
Figura 36: Variação do custo do sistema acoplado em função da área dos coletores sem	

e com cobertura.....	xi
	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Consumo residencial de eletricidade por região do Brasil.....	5
Tabela 2: Faixas de classificação para coletores solares e sistemas acoplados voltados para banho.....	8
Tabela 3: Faixas de classificação para coletores solares voltadas para banho.....	8
Tabela 4: Ensaio e normas que os coletores solares devem obedecer.....	9
Tabela 5: Dias Típicos para cada mês.....	20
Tabela 6: Tabela resumo das metodologias e sistemas apresentados.....	39
Tabela 7: Temperatura média ambiental da cidade de Bauru.....	44
Tabela 8: Dados das radiações diárias médias mensais para cidade de Bauru.....	46
Tabela 9: Dados informativos sobre aparelhos sanitários.....	46
Tabela 10: Quantidades e preços dos equipamento hidráulicos considerados para o presente projeto.....	48
Tabela 11: Custos independentes da área para sistemas de coletores com simples e sem cobertura de vidro.....	49
Tabela 12: Dados característicos dos coletores.....	50
Tabela 13: Dados de demanda do sistema estudado.....	50
Tabela 14: Valores otimizados para os sistemas simples para os diferentes métodos analisados.....	62
Tabela 15: Valores otimizados para o sistema acoplado para alguns ângulos de inclinação do coletor.....	63
Tabela 16: Valores otimizados para o sistema acoplado para alguns valores de razão volumétrica y.....	63
Tabela 17: Comparação entre os sistemas simples e acoplado otimizados.....	64
Tabela 18: Parâmetros de entrada e saída da ferramenta de otimização fmin.....	72

SIMBOLOGIA

SÍMBOLOS ROMANOS

A_C	Área do coletor [m ²]
A_T	Área total do coletor para o sistema acoplado [m ²]
C_{AUX}	Custo total com energia auxiliar [R\$]
C_d	Custo dependente da área [R\$]
C_i	Custo independente da área [R\$]
c_p	Calor específico [J/kg K]
C_T	Custo total do sistema [R\$]
d	Taxa de retorno do valor do financeiro
E_C	Economia do com energia solar [R\$]
f	Fração Solar
F_R	Fator de remoção de calor do coletor

$F_R(\tau\alpha)_n$	Fator de ganho de energia solar coletada
$F_R U_L$	Fator de perda de calor do coletor [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$]
h	Ângulo horário [$^\circ$]
\bar{H}_T	Radiação média mensal total diária solar global incidente em um coletor inclinado [J/m^2]
\bar{H}_0	Radiação extraterrestre média mensal diária total incidente em uma superfície horizontal [J/m^2]
\bar{H}	Radiação média mensal diária total em uma superfície horizontal [J/m^2]
\bar{H}_D	Radiação média mensal diária difusa em uma superfície horizontal [J/m^2]
h_{ss}	Ângulo horário do pôr do sol [$^\circ$]
h_{ss}'	Ângulo horário do pôr do sol corrigido devido a inclinação do coletor [$^\circ$]
h_{sr}	Ângulo horário do nascer do sol [$^\circ$]
i	Taxa de juros
I	Irradiação horária [J/m^2]
K_θ	Razão entre o produto médio e o normal da transmitância absorvância horária do ângulo

K_T	Índice de claridade
L	Demanda de água quente [J]
m_{res}	Massa do reservatório [kg]
N	Número do dia no ano
n	Número de dias no mês
PW	Valor presente [R\$]
Q_u	Energia útil absorvida pelo coletor [J]
q_u	Energia útil horária absorvida pelo coletor [J]
Q_L	Volume de demanda de água quente em volume [L]
\bar{R}	Fator de Radiação Total Mensal sobre uma Superfície Inclinada
r	Razão da radiação total por hora pela radiação total diária
R_B	Fator de radiação direta sobre uma superfície inclinada
\bar{R}_B	Fator Médio Mensal para Radiação Direta sobre um Plano Inclinado em Relação a uma Superfície Horizontal
r_d	Razão da radiação difusa horária pela radiação difusa diária

R_n	Taxa de radiação ao meio dia sobre uma superfície inclinada pela radiação sobre uma superfície horizontal
R_S	Parâmetro de correção para o reservatório térmico
\bar{S}	Radiação média mensal absorvida pelo coletor por unidade de área [J/m^2]
T_a	Temperatura ambiente [$^{\circ}C$]
T_{af}	Temperatura de água fria [$^{\circ}C$]
T_e	Temperatura de entrada no coletor [$^{\circ}C$]
T_L	Temperatura de demanda de água quente [$^{\circ}C$]
T_{me}	Temperatura de mistura no reservatório térmico [$^{\circ}C$]
T_{min}	Temperatura mínima de operação para o método ϕ, f -Chart [$^{\circ}C$]
U_L	Coefficiente global de perda de energia [$W/m^2 K$]
v	Vida útil [anos]
x	Razão entre áreas dos coletores para sistema acoplado
X'	Razão da perda total de calor em relação a demanda Total

X_C	Razão da radiação crítica mínima média mensal pela radiação incidente ao meio dia
Y	Razão adimensional da energia absorvida
y	Volume superior do reservatório térmico que será aquecido pelo coletor com cobertura

SÍMBOLOS GREGOS

φ	Latitude [°]
β	Ângulo de inclinação do coletor [°]
θ	Ângulo de incidência das radiações [°]
δ	Declinação [°]
Δt	Número de dias no mês em segundos [s]
$\tau\alpha$	Produto transmitância absorptância
ρ_G	Refletividade
$\bar{\Phi}_{max}$	Máxima utilizabilidade diária

SUBSCRITOS

B	Direta
c	Coletor

cc Coletor com cobertura

cs Coletor sem cobertura

D Difusa

G Refletida

n Normal

ss Pôr do sol

sr Nascer do sol

T Total

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A utilização de energias renováveis para a substituição dos combustíveis fósseis está em crescente expansão, uma vez que as energias provenientes do petróleo e seus derivados estão cada dia mais escassos e caros. Além disto, estes tipos de combustíveis são grandes poluentes e tem afetado de forma sistemática o meio ambiente. Como alternativa existe a possibilidade da ampliação da utilização das energias renováveis, que são àquelas provindas de recursos naturais como: o sol, vento, chuva, marés e energia geotérmica. Estas formas de energia são consideradas praticamente inesgotáveis além de provocar impactos ambientais menores. Além disso, as energias renováveis trazem outros benefícios a longo prazo, como segurança energética, empregos, desenvolvimento sustentável e redução de gases que causam o aquecimento global. Quando instaladas de forma sustentável não produzem ou produzem uma mínima quantidade de poluentes no ar e gases que causam efeito estufa (TÜKENMEZ e DEMIRELI, 2012). Entretanto, estas energias limpas apresentam ainda uma desvantagem significativa: a descontinuidade na geração. Sua capacidade de geração depende do clima e, por conta disto é necessário um sistema complexo de planejamento e controle para otimização da sua produção, já que seu armazenamento na forma de energia elétrica é muito complexo.

As energias mais comuns utilizadas no Brasil são as energias hídricas, solar, biomassa e eólica. A energia hídrica é gerada a partir da energia cinética do movimento da água dos rios e, embora ela possa ser considerada renovável a utilização de grandes centrais com formação de lagos de grandes extensões provocam importantes impactos ambientais. A energia eólica baseia-se no mesmo princípio da energia hidráulica, porém é gerada devido ao movimento cinético dos ventos. Sua principal desvantagem é que sua produção é muito variável, tanto em relação a sua velocidade como em relação à sua localização geográfica. No Brasil a energia eólica tem se mostrado uma ótima solução para a região nordeste e é a forma de energia alternativa que tem apresentado maior crescimento nos últimos anos pela sua boa relação custo/benefício. A biomassa, por sua vez, é a energia a partir dos gases gerados da reação química de materiais orgânicos, animais ou vegetais. Atualmente ela é a segunda forma de

energia mais utilizada no Brasil, sendo que o etanol, utilizado como combustível veicular, e o bagaço, utilizado na geração termelétrica, são os maiores responsáveis por isso. Por fim, sistemas baseados em energia solar aproveitam da energia térmica presente nos raios solares que chegam na Terra. Esta fonte de energia é mais utilizada para aquecimento de ambientes e de água ou, ainda em menor escala, para gerar energia elétrica.

O uso combinado de energias renováveis se tornou muito importante, e muitas vezes podem reduzir significativamente a dependência de energia elétrica das concessionárias. Dessa forma, a energia solar para aquecimento de água destinada para banho tem apresentado uma grande expansão. Porém, o dimensionamento do sistema ainda pode ser muito otimizado para cada aplicação, evitando futuras desconfiças do público no sentido de capacidade de atendimento às demandas especificadas.

1 - Contexto brasileiro da energia solar

O sistema de aquecimento solar de água para substituição do chuveiro elétrico é a principal forma de utilização da energia térmica do sol. O aquecimento de água voltada para o banho a partir de dispositivos elétricos gasta anualmente bilhões de kWh geradas por grandes centrais hidroelétricas. A energia elétrica é uma energia de alta disponibilidade que pode ser utilizada para diversos fins, sendo um contrassenso utilizá-la em resistências elétricas para aquecimento, como é comum no país. A energia solar térmica para este fim tem apresentado resultados positivos para qualquer latitude. A utilização de coletores solares de aquecimento de água, mesmo em localidades com baixos índices de radiação, pode trazer um grande benefício no aproveitamento do potencial energético disponível.

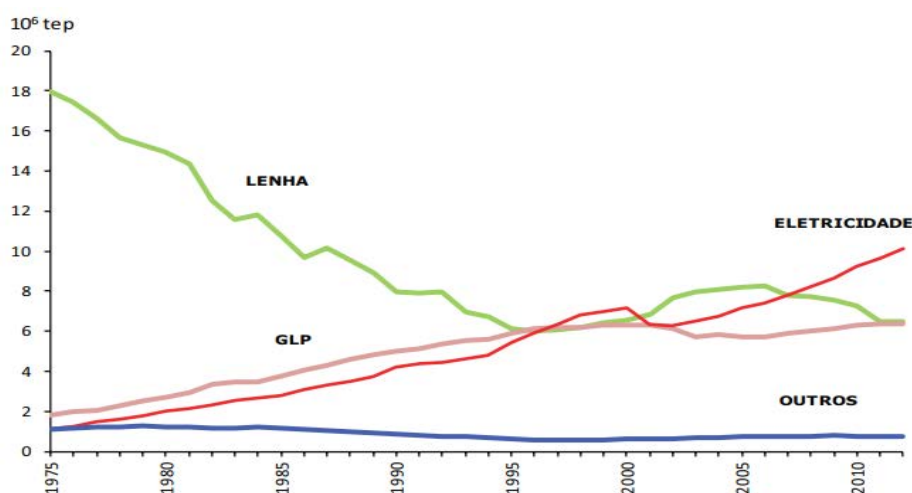
A implementação de sistemas de aquecimento doméstico de água apresenta vantagens socioeconômicas e ambientais como: economia para o consumidor e redução de impactos ambientais com grandes hidroelétricas e/ou com emissão de gás carbônico. Segundo a Associação Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA), em um estudo de 2006, mais de 200 mil toneladas de CO₂ deixaram de ser liberados para a atmosfera devido ao uso de coletores solares. Além disso, o uso do aquecimento solar desloca o horário de ponta e atenua a sobrecarga no sistema elétrico nesse período (entre as 17 e 21 h). (Energia Solar Térmica e suas Tecnologias - DASOL | Departamento Nacional de Aquecimento Solar da ABRAVA, 2014)

De acordo com a publicação: Boas práticas em energia solar do Instituto de Cidadania e Sustentabilidade (Vitae Civilis), o Brasil tem em média mais de 2200 horas anuais de

insolação, sendo um potencial equivalente a 15 trilhões de MWh, correspondentes a 50 mil vezes o consumo nacional de eletricidade. Porém, o país aproveita muito pouco dessa fonte de energia sustentável, utilizando menos que países que possuem insolação muito inferior como, por exemplo, a Alemanha.

A radiação solar no Brasil varia de 8 a 22 MJ/m² durante a maior parte do ano, e em dias com baixas radiações (nos meses de maio a julho) tem-se valores entre 8 e 18 MJ/m², conforme dados do Ministério do Meio Ambiente (2014). Ainda de acordo com os dados obtidos dessa pesquisa, o nordeste brasileiro é a região com maior incidência solar, com média anual próxima a regiões com as mais altas radiações do mundo, como, por exemplo, regiões de desertos. Segundo a publicação do Departamento Nacional de Aquecimento Solar da ABRVA (DASOL), Energia Solar Térmica e suas Tecnologias (2014), o Brasil em 2013 possuía 8,4 milhões de m² de área de coletores solares térmicos instalados, usados para aquecimento de água para banho e de piscinas, sendo o 5º país em utilização dessa tecnologia. Porém, mesmo com todo esses dados, o Brasil possui apenas 2% de suas casas com aquecimento solar, de acordo com a publicação A Vez da Energia Solar - Planeta Sustentável.

O uso do chuveiro elétrico no país é predominante, o qual é responsável por 8% de toda a energia elétrica produzida e 18% da demanda no sistema elétrico no horário do final da tarde. Conforme o Balanço Energético Nacional, 2013, houve um aumento entre o ano de 2011 e 2012 de 3,8% no consumo de energia elétrica, e como mostrado na Fig. 1 o aproveitamento da eletricidade aumenta a cada ano que se passa. Além disso, o consumo nas residências elevaram em 2,1%, valor significativo, considerando que os domicílios



Fonte: BEN, (2013)

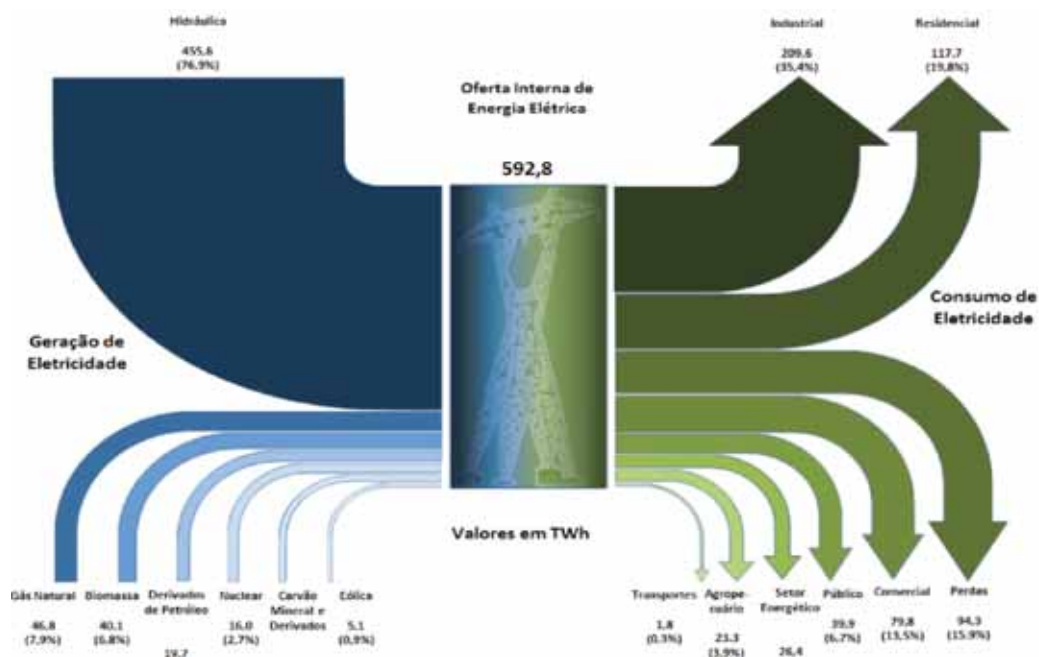
Figura 1: Consumo de algumas formas de energia ao longo dos anos

apresentam grande influência no consumo de energia elétrica total produzida no país, como mostrado pela Fig. 2.

Dentro desse cenário, foi retirado também do Balanço Energético Nacional, 2013 a Tab. 1, que apresenta o consumo de energia elétrica por região no Brasil. É perceptível a grande influência da região sudeste no consumo total do país, superando em todos os anos o valor de 50% do total, então, a presença de sistemas aquecimento solar de água doméstico nessa região tem apresentado grande importância, para a redução do consumo de energia elétrica e assim, diminuir a sobrecarga no setor energético do país e evitar a construção de novas hidroelétricas de grande porte.

2 - Coletor Solar de Placa Plana

Segundo Nikolić e Lukić (2013), os sistemas mais comuns utilizados para absorção da energia térmica solar são os coletores de placa plana utilizados para aquecimento da água. Os coletores solares de placa plana são aqueles que recebem radiação solar através de uma superfície plana absorvedora superior na qual a água circula por meio de dutos. As maiores limitações para o aumento do uso de coletores convencionais são a sua eficiência média relativamente baixa e, principalmente, o alto custo de investimento para os padrões brasileiros. Assim, estudos para melhoria da eficiência e modelos de otimização estão aumentando.



Fonte: BEN, (2013)

Figura 2: Demanda energética por setor

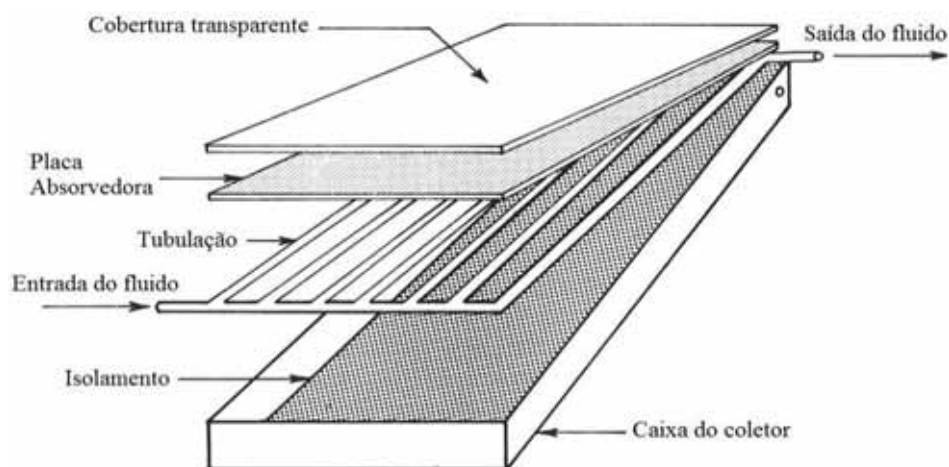
Tabela 1: Consumo residencial de eletricidade por região do Brasil

REGIÃO	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
NORTE	5,2	5,2	5,0	5,1	5,2	5,3	5,2	5,5	5,5	5,7
NORDESTE	15,6	15,8	16,2	16,3	16,3	17,3	17,7	18,0	18,0	18,2
SUDESTE	54,8	54,7	54,7	54,6	54,5	53,9	53,6	52,9	53,0	52,4
SUL	17,0	16,8	16,7	16,4	16,5	16,2	16,1	16,0	15,8	15,9
CENTRO-OESTE	7,4	7,5	7,4	7,6	7,5	7,4	7,4	7,7	7,6	7,8

Fonte: BEN, (2013)

Assim, de acordo com Martinopoulos et al. (2010), o aumento da utilização de sistemas de aquecimento solar, a partir de coletores solares são analisados segundo sua viabilidade econômica, em comparação com os sistemas convencionais, além de avaliar sua simplicidade de fabricação e de utilização. Assim, com o objetivo de minimizar o custo de produção com os coletores, novos materiais de baixo custo e que produzem menores impactos ambientais surgem com o intuito de substituir os que são empregados atualmente, com pequenas variações da eficiência do coletor.

Os coletores de placa plana típicos consistem de uma caixa metálica isolada na região inferior, com uma cobertura de vidro ou plástico e uma placa absorvedora de cor escura. A placa absorvedora possui dutos por onde passa o fluido a ser aquecido (Fig. 3). Assim, a eficiência do coletor depende de vários fatores de projeto, como os principais, o número de coberturas da placa, o tipo do vidro e suas características refletivas, o espaçamento entre o coletor e o vidro, o tipo e espessura do isolamento, e entre outros fatores. Portanto, as



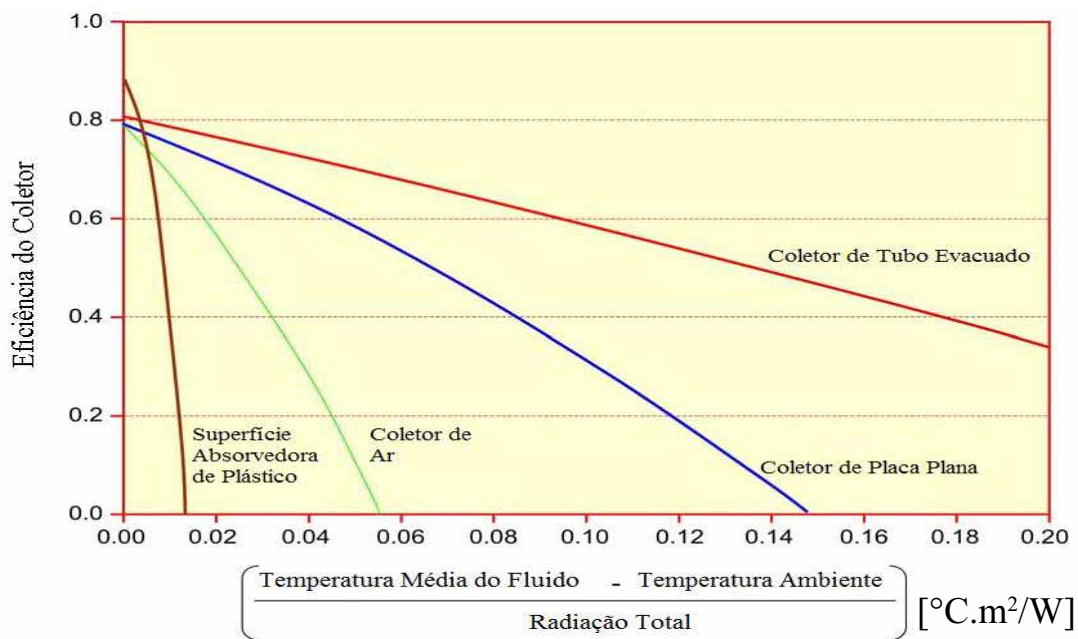
FONTE: SÖZEN et al. 2008

Figura 3: Componentes de um coletor solar de placa plana

coberturas dos coletores devem ter alta transmissividade e absorvidade e uma emissividade muito baixa. [(SIQUEIRA, 2009), (MARTINOPOULOS et al. 2010) e (SÖZEN et al. 2008)]

Rodríguez-Hidalgo et al. (2011) afirmam que a eficiência de um coletor solar é um fator-chave para o desempenho das instalações térmicas. Como as condições climáticas variam continuamente durante o dia, a eficiência instantânea de um coletor depende não só dos componentes utilizados na sua construção, mas também das condições ambientais efetivas e da temperatura da água quente desejada.

Como a eficiência varia com a temperatura de trabalho do fluido e das condições ambientais, os rendimentos dos coletores são representados por retas em função de um valor que representa estes parâmetros. A diferença de temperatura entre a temperatura de mistura da água quente e a temperatura ambiente sobre a radiação incidente é a variável largamente utilizada, como no exemplo apresentado na Fig. 4, para diferentes tipos de coletores. De acordo com Lima (2003), as vantagens do coletor plano em relação aos demais tipos são: a simplicidade de construção, relativo baixo custo, nenhuma parte móvel, relativa facilidade de reparo e durabilidade. Os coletores solares de placa plana são capazes de absorver a radiação solar direta, difusa e a refletida, e assim podem ser fixados nos telhados das residências sem necessidade de sistemas de acompanhamento do movimento do sol, e devem apenas ser montados voltados para o equador inclinados de tal forma a minimizar as mudanças de posição do sol.



FONTE: NORTON, 2006

Figura 4: Gráfico de Eficiência de diferentes tipos de coletores

Coletores sem a cobertura de vidro também são utilizados de acordo com as necessidades. Trata-se de coletores de construção mais simples para o aproveitamento da energia solar e pode ser vantajosamente aplicados em sistemas em que a temperatura de demanda seja um pouco superior à do ambiente. A aplicação mais comum é o aquecimento de água de piscinas (GIOVANNETTI et al. 2012).

Um coletor não é capaz de absorver toda a radiação incidente sobre ele e transferi-la integralmente para o fluido. Isso ocorre devido as perdas que são presentes no coletor, sendo as perdas óticas e as térmicas. A primeira é devido a reflexão da radiação pela cobertura de vidro e a segunda é causada devido à diferença de temperatura entre o sistema e o ambiente, resultando em perdas de calor por convecção e radiação para o meio.

Colle et al. (2009) definiram a fração solar como sendo a proporção entre a energia útil captada pelo coletor e a demanda de água quente total térmica, e é depende da radiação solar disponível, da eficiência do coletor, da área do coletor e da demanda térmica. Esse parâmetro é importante para o estudo do dimensionamento de sistemas de aquecimento solar, já que indica a proporção de energia solar que supre a demanda de água quente e qual será a necessidade de gasto com energia auxiliar para o complemento de tal necessidade.

O Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade industrial (INMETRO) em parceria com o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica regulamentaram e incluíram os coletores solares dentro do programa de etiquetagem de acordo com as classificações apresentadas nas Tab. 2 e 3, com o intuito de verificar a conformidade dos coletores e definiram as características que deveriam ser informadas pelos fabricantes, sendo elas:

- Produção específica de Energia do coletor em kWh/mês m²
- Produção Mensal de energia por coletor em kWh/mês
- Eficiência térmica média dos coletores
- Pressão de funcionamento
- E carga de pressão máxima

Tabela 2: Faixas de classificação para coletores solares e sistemas acoplados voltados para banho

Faixas de Classificação Coletor Solar e Sistema Acoplado Aplicação Banho	
Classe	Produção Específica Mensal (kWh/mês.m ²)
A	$80,3 < PME_e$
B	$73,3 < PME_e \leq 80,3$
C	$66,3 < PME_e \leq 73,3$
D	$59,3 < PME_e \leq 66,3$
E	$52,3 < PME_e \leq 59,3$

FONTE: INMETRO, (2012)

Os coletores solares devem passar pelos testes e obedecer as normas definida pelo INMETRO como mostra a Tab. 4 e, além disso, os coletores devem suportar altos níveis de radiação sem apresentarem falhas como, por exemplo, ruptura na cobertura de vidro ou na superfície absorvedora e em suas tubulações, acúmulo de água da chuva ou perda do isolamento.

A Norma ABNT NBR 15747-2 é a que rege a maioria dos testes que devem ser feitos nos coletores e nela são definidos parâmetros como por exemplo a vazão e a pressão de operação para a definição da eficiência dos coletores, o número de horas que devem ser exposto o coletor em um teste de envelhecimento e, assim como todos os parâmetros para os ensaios dos coletores.

Assim, com a regulamentação dos coletores solares o governo criou algumas leis que incentivou o uso de coletores solares. Atualmente, algumas cidades possuem leis que incentivam o uso de coletores solares, como por exemplo: Juiz de Fora (MG), Varginha (MG), Birigui (SP), Diadema (SP), Franca (SP), Marília (SP), Peruíbe (SP), Ribeirão Preto (SP), São

Tabela 3: Faixas de classificação para coletores solares voltadas para banho

Faixas de Classificação Coletor Solar – Aplicação Piscina	
Classe	Produção Específica Mensal (kWh/mês.m ²)
A	$98,0 < PME_e$
B	$90,0 < PME_e \leq 98,0$
C	$80,0 < PME_e \leq 90,0$
D	$70,0 < PME_e \leq 80,0$
E	$65,0 < PME_e \leq 70,0$

FONTE: INMETRO, (2012)

Tabela 4: Ensaios e normas que os coletores solares devem obedecer

Ensaios para coletores Fechados	Ensaios para coletores abertos	Referência normativa
Desempenho térmico	Desempenho térmico	ABNT NBR 15747-2
Pressão interna	Pressão interna	
Resistência à alta temperatura	Resistência à alta temperatura	
Exposição I (10h)	Exposição I (10h)	
Choque térmico interno e externo I	Choque térmico interno e externo I	
Exposição II (20h)	Exposição II (20h)	
Choque térmico interno e externo II	Choque térmico interno e externo II	
Penetração de chuva	-	
Carga mecânica	-	
Resistência ao congelamento	Resistência ao congelamento	
Resistência ao impacto	-	
Envelhecimento acelerado	Envelhecimento acelerado	ASTM G155

FONTE: INMETRO, (2012)

José do Rio Preto (SP) e São Paulo (SP). Além disso, algumas leis federais estimulam o crescimento do uso de coletores solares, como por exemplo, o uso de aquecedores solares em residências financiadas pelo programa “Minha casa, Minha vida”. (CIDADES SOLARES, 2014)

Existem também, projetos que impulsionam a utilização de coletores solares, como o exemplo do Vitae Civilis, Instituto de Cidadania e Sustentabilidade que desenvolveu o projeto “Boas práticas para a construção de políticas públicas municipais em energia solar”, baseada em programas como o uso de aquecimento solar nas casas da CDHU do estado de São Paulo.

3 - Objetivos

Assim, com todo esse cenário favorável ao crescimento da utilização de aquecedores solares de água residencial, o presente trabalho tem como objetivos:

- Desenvolver e implementar rotinas na ferramenta computacional Gnu Octave, para as diferentes metodologias existentes.
- Comparar o comportamento dos diferentes métodos de dimensionamentos considerados, para um mesmo sistema de aplicação e uma mesma área de coletor.
- Definir uma rotina que calcule sistemas otimizados para os diferentes métodos

estudados, a fim de buscar a área que deve ser utilizada para um menor custo total do sistema aplicado.

- Estudar a viabilidade de um sistema novo proposto, de um sistema de aquecimento solar doméstico acoplado, composto por coletores com e sem cobertura, com o intuito de verificar a redução do custo e o aumento no ganho energético ao comparar com um sistema simples composto apenas por coletores com simples cobertura de vidro, segundo o mesmo método de dimensionamento.
- E obter o sistema otimizado para o sistema acoplado e compará-lo com o sistema simples, a partir do mesmo método de dimensionamento.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização de aquecimento solar de água residencial tem apresentado um forte crescimento no cenário atual, já que o sistema energético brasileiro vem apresentando problemas ambientais relacionados ao uso de combustíveis fósseis. Porém, foi ressaltado também a importância do correto dimensionamento do sistema para que traga os resultados esperados. Durante as épocas mais quentes do ano é comum o circuito de aquecimento solar trabalhar superdimensionado, já que a demanda de água quente é menor e as radiações são altas. Já durante os períodos do ano mais frios necessita-se de maiores quantidades de água quente e as insolações são mais baixas e, neste caso, é usual que o sistema não possa suprir toda a demanda. Dessa forma, o dimensionamento ótimo normalmente permite um funcionamento equilibrado entre o uso do equipamento solar e do circuito auxiliar e traz melhores resultados. (KULKARNI et al., 2007)

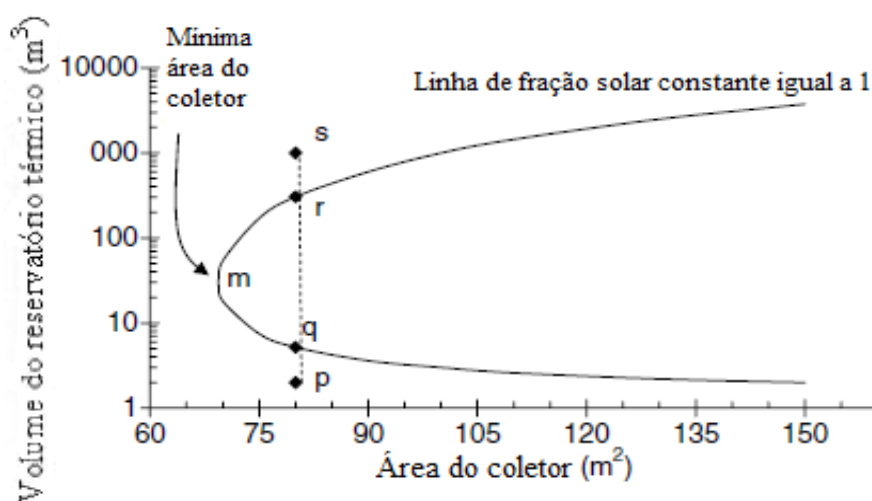
Assim, inúmeras metodologias para o dimensionamento de sistemas de aquecimento solar estão disponíveis na literatura. Alguns exemplos de métodos de dimensionamento são o da utilizabilidade (DUFFIE; BECKMAN, 1991), *f*-Chart (KLEIN et al., 1976) e o ϕ , *f*-Chart (KLEIN; BECKMAN, 1979), além disso, há os métodos de simulação, como por exemplo o TRNSYS (KLEIN et al., 1975) e o SOLCHIPS (LUND; PELTOLA, 1992). Além dos métodos de dimensionamento, atualmente existem alguns modelos de simulação que definem os parâmetros do sistema de aquecimento solar e calcula o sistema otimizado para tal aplicação. (KIM et al., 2012)

Kulkarni et al. (2007) definiram um método de dimensionamento baseado em diagramas da área do coletor versus volume do reservatório térmico que são fundamentados em relação a estudos do mesmo autor, realizados anteriormente. A partir da análise das diferentes linhas de fração solar constante, como apresentada na Fig. 5, é possível identificar qual o melhor sistema de aquecimento solar para cada situação. O sistema de aquecimento solar considerado pelos autores em seu estudo foi de um conjunto típico de aquecimento solar de água, composto por um coletor de placa plana conectado a um reservatório térmico e um

aquecimento auxiliar externo ligado em série ao sistema.

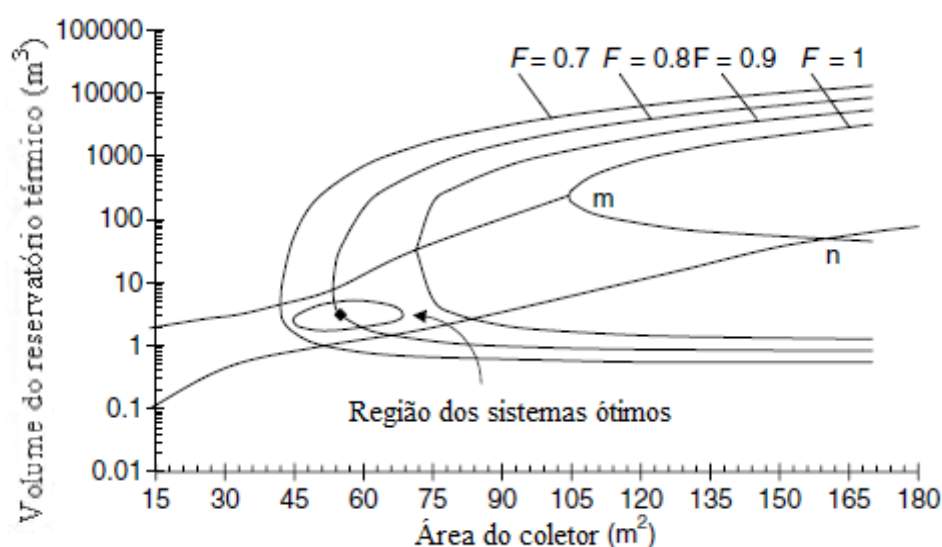
A Figura 5 foi levantada por Kulkarni et al., (2007) para um sistema considerado e uma fração solar igual a 1. Observa-se na figura que a área mínima que supre tal demanda é representada pelo ponto m. Porém, qualquer combinação entre o volume do reservatório e a área do coletor entre a linha de fração solar constante também atende as necessidades do projeto. Nesse estudo, os autores consideraram um balanço de energia no reservatório térmico para avaliar a variação da temperatura no mesmo. O aumento da carga energética do sistema se deve a absorção da energia útil pelo fluido em circulação no coletor, desconsiderando as perdas do reservatório e a demanda para aquecer a água fria que entra no reservatório devido a utilização da água quente. Com isso, eles desenvolveram o cálculo da fração solar para diversos sistemas de aquecimento solar, caracterizando uma relação entre a área do coletor, o volume do reservatório térmico e a porcentagem da demanda que a energia solar supre.

A energia útil capturada pelo coletor solar no balanço de energia foi considerada apenas valores positivos nessa análise. Assim, foi possível fazer o estudo dinâmico da variação da temperatura do reservatório analiticamente, assumindo que para o instante de tempo definido para o estudo a radiação sobre o coletor, a temperatura ambiente e a demanda sejam constantes. Para o instante inicial foi considerada como temperatura inicial a temperatura ambiente do local estudado. Com a metodologia definida, foi realizado um estudo de sistemas otimizados, baseados nos gráficos entre a área do coletor pelo volume do reservatório, para diferentes frações solares, Fig. 6.



FONTE: KULKARNI et al., 2007

Figura 5: Diagrama área do coletor pelo volume do reservatório térmico para uma fração solar constante

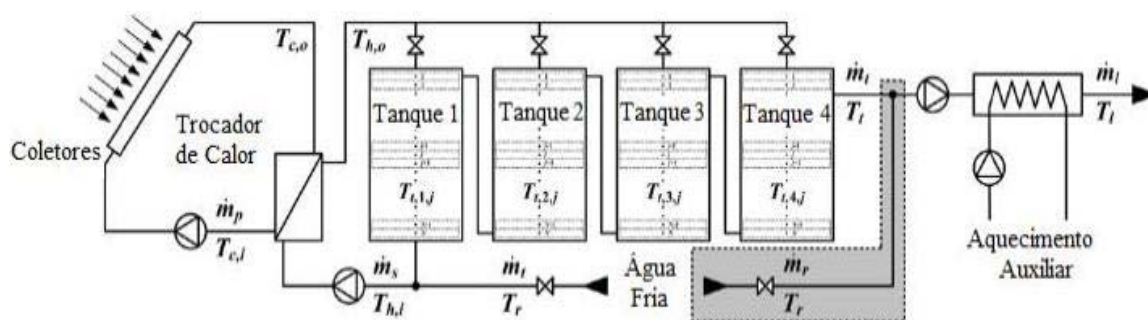


FONTE: KULKARNI et al., 2007

Figura 6: Regiões de sistemas ótimos de aquecimento solar segundo desempenho anual

O sistema ótimo foi encontrado pela função objetivo baseada no custo total anualizado obtido por uma análise de Pareto dos diagramas.

Kim et al., (2012) também propuseram uma metodologia para calcular o desempenho a longo prazo de sistemas de aquecimento solar e com esse procedimento, buscar sistemas otimizados. Primeiramente, eles caracterizaram um método confiável para estimar as radiações direta e difusa por hora média mensal sobre uma superfície inclinada, a partir de teorias empíricas pré existentes. Naquele trabalho foi analisado um sistema composto por $1200 m^2$ coletores de tubos evacuados, quatro reservatórios térmicos de $50 m^3$ de volume ligados em série e um sistema de aquecimento auxiliar movido a gás, como mostrado na Fig. 7. O coletor é abastecido pelo tanque 1, a água quente retorna ao reservatório que estiver com a temperatura mais próxima a sua e o tanque 4 fornece água para o consumo, no qual a



FONTE: KIM et al., 2012

Figura 7: Esquema de um sistema de aquecimento solar

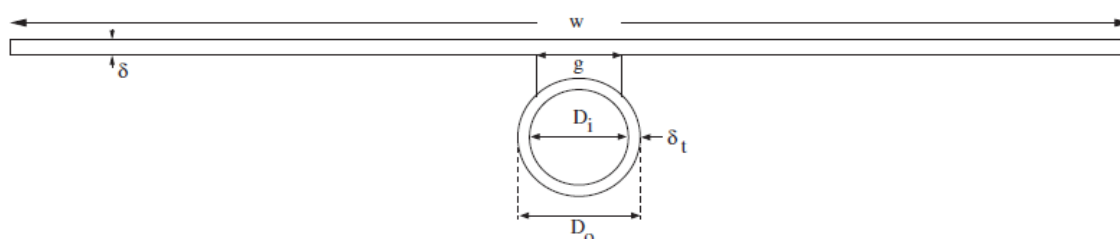
temperatura é a mais alta.

Também foi realizado no trabalho realizado por Kim et al., (2012) um estudo dinâmico da temperatura no reservatório térmico, porém o balanço de energia foi feito em um volume de controle diferencial considerando um sistema de transferência de calor unidimensional. Além disso, foi avaliada a variação da temperatura de saída do coletor, sendo que para o cálculo da energia útil absorvida pelo coletor foi levado em consideração a temperatura de mistura no mesmo, dada pela média entre a temperatura de entrada e saída. Para solucionar as equações diferenciais usaram um algoritmo de matriz tridiagonal padrão (TDMA) e como condições iniciais definiu-se que o sistema estava em equilíbrio com o ambiente.

Então, com a definição da metodologia para o dimensionamento do sistema de aquecimento solar e para o cálculo da performance anual do sistema, Kim et al., (2012) definiram o procedimento para a obtenção de sistemas otimizados. A função objetivo utilizada foi a função de economia baseada no período de *payback*, sendo maximizada pelo método do Micro Algoritmo Genético (μ GA).

Alvarez et al., (2010) definiram um modelo matemático a partir do balanço de energia na seção composta por um tubo e sua superfície absorvedora de um coletor como mostrada na Fig. 8. A ideia principal do balanço foi a de associar a condução bidimensional na seção transversal do coletor com a perda de calor por convecção unidimensional, para analisar a variação da temperatura do fluido que escoa pelo tubo. Com isso, foi possível estudar o comportamento da energia útil transmitida para a água e assim, avaliar a performance instantânea do sistema.

A resolução do modelo analítico desenvolvido foi feita numericamente por meio do Método dos Elementos Finitos, sendo as funções das temperaturas aproximadas por funções polinomiais utilizando o elemento finito quadrático de Lagrange. Para validar a modelagem térmica dinâmica foi realizada, nesse estudo, uma análise experimental de um sistema de 1 m^2 de um coletor de alumínio, para comparação dos resultados obtidos.



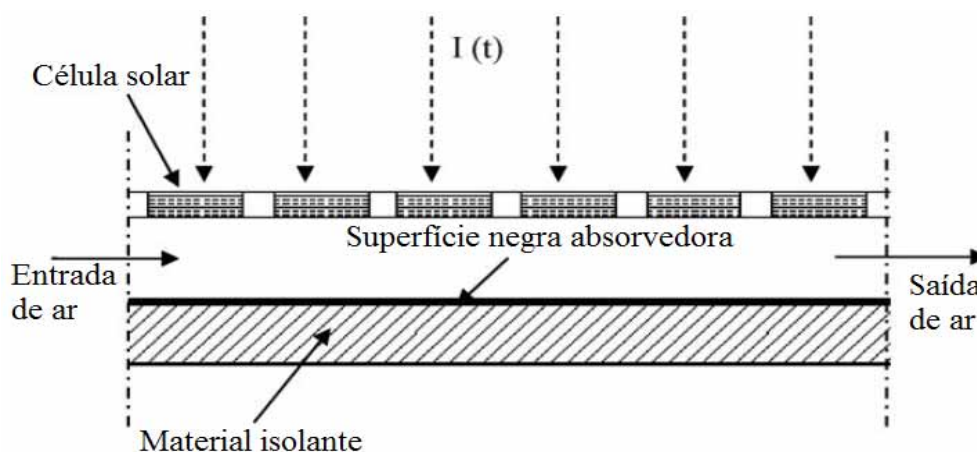
FONTE: ALVAREZ et al., 2010

Figura 8: Seção transversal de um coletor de placa plana

Um estudo realizado por Dubey et al., (2009) foi o de definir o desempenho de sistemas integrados de coletores fotovoltaicos e térmicos. O sistema estudado de coletores de simples cobertura conectados em série para aquecimento de ar, com sistemas de geração de energia sobre o vidro, está apresentado na Fig. 9. Para a obtenção do desempenho do sistema foi feito um balanço de energia para cada sistema fotovoltaico/térmico, considerando a transferência de calor unidimensional, em regime estacionário. Por fim, foi obtida uma equação geral para o conjunto de coletores como uma função da absortividade e do coeficiente de perdas médio de todos os coletores, já que todos os coletores conectados em série são iguais.

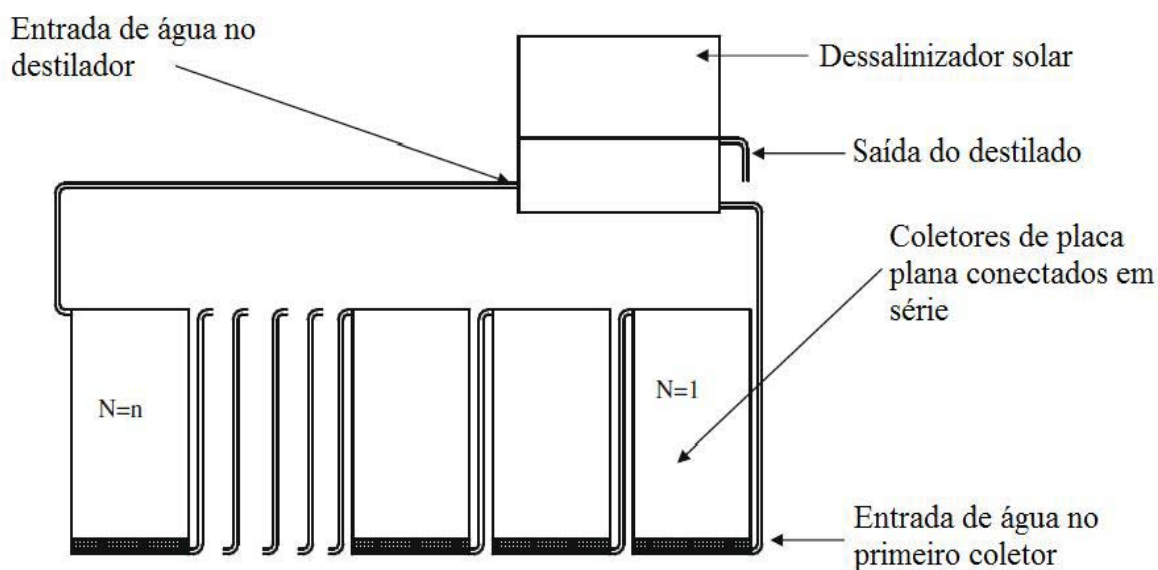
Gaur e Tiwari, (2010) desenvolveram uma metodologia para obter o sistema otimizado para um conjunto de coletores conectados em série integrado a um circuito de dessalinização, como mostrado na Fig. 10. O sistema considerado é composto por coletores de placa plana de 2 m² cada e um dessalinizador solar convencional com área de 1 m² e coberto com um vidro inclinado em 30°.

Nesse estudo foi feito o estudo dinâmico da variação da temperatura no destilador e a energia absorvida por todos coletores foi considerada como a soma das energias úteis capturadas por cada coletor. Como todos coletores eram iguais, foi possível definir uma equação única, na qual é calculada para um coeficiente de absortividade e de perdas médio entre todos os coletores e assim, é necessário, para os cálculos, apenas a temperatura de entrada do primeiro coletor, que é a temperatura de saída do dessalinizador e a temperatura de saída do coletor, a qual é a de entrada no dessalinizador. Um algoritmo foi desenvolvido para o procedimento dinâmico de cálculo das variações de temperaturas nos sistemas e assim, obtendo os rendimentos horários do sistema.



FONTE: DUBEY et al., 2009

Figura 9: Esquema integrado de coletores fotovoltaicos e térmicos



FONTE: GAUR e TIWARI, 2010

Figura 10: Esquema de dessalinização conectado a um sistema de coletores solares ligados em série

Sampathkumar et al., (2013) estudaram também um sistema de dessalinização acoplado a coletores solares, porém nesse caso, foram utilizados coletores de tubos evacuados, baseado no estudo dos autores citados anteriormente. O sistema utilizado foi de um dessalinizador de 1 m^2 de área com uma inclinação do vidro de 11° e uma área de $3,32 \text{ m}^2$ de coletor solar. O mesmo balanço de energia no sistema de dessalinização foi considerado para obter a variação da temperatura de entrada e saída, a partir da análise da energia útil absorvida pelo coletor solar, já que a temperatura de entrada no dessalinizador é a temperatura de saída do coletor.

Abou-Zeid e Hawas, (1983) estudaram a viabilidade econômica de sistemas de aquecimento solar para o uso doméstico, tanto para aquecimento de ambiente como de água. Seu estudo foi baseado no método *f*-Chart para determinar a fração solar global anual que cada sistema é capaz de suprir. A partir do cálculo do desempenho de cada sistema, os autores propuseram uma metodologia para avaliar os aspectos econômicos do sistema de aquecimento solar, de forma a otimizar a área dos coletores que correspondesse ao custo ótimo do sistema, considerando três casos diferentes de vida útil dos sistemas, no qual foi assumido 10, 20 e 30 anos. Nesse trabalho, os principais custos considerados foram os custos independentes e dependentes da área, o custo com a manutenção de 5% ao ano referente a um valor inicial proposto para o primeiro ano e o custo com o combustível utilizado no aquecimento auxiliar.

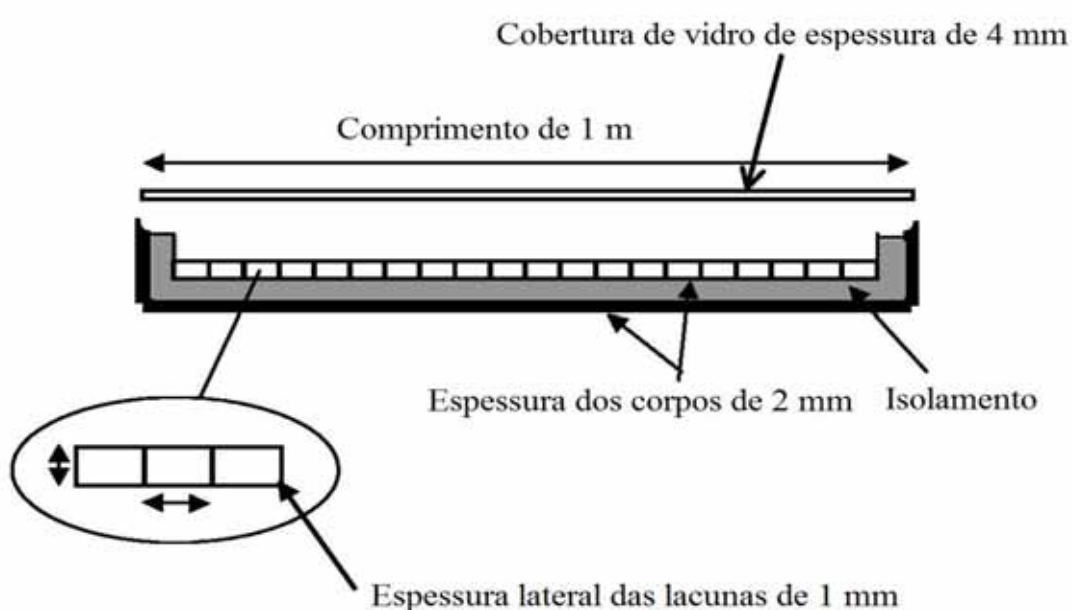
Lima et al., (2006) utilizaram o programa TRNSYS para dimensionar um sistema de aquecimento solar de água para uso doméstico. Nesse trabalho foi considerado um conjunto

de um coletor de placa plana de simples cobertura e um reservatório térmico, para uma residência de quatro pessoas. Para esse caso foi considerado que a temperatura do reservatório se mantinha constante ao longo do dia em uma temperatura média.

Com o procedimento para o cálculo do dimensionamento do sistema de aquecimento solar, foi utilizado um método complexo para a solução de problemas lineares com restrições. A função objetivo a ser minimizada foi o custo total anualizado, e com a finalidade de otimizar a área do coletor, o seu ângulo de inclinação e o volume do reservatório.

Siqueira et al., (2011) fizeram uma análise e um estudo do desempenho de sistemas de aquecimento solar de baixo custo, ou seja, um conjunto composto de coletores sem cobertura. O mesmo procedimento realizado pelos autores anteriores para o estudo da estratificação no reservatório quando utilizados coletores de simples cobertura foi feito para os coletores sem cobertura. O balanço de energia foi feito para os coletores solares e no reservatório e assim, foi possível obter o desempenho dos sistemas de baixo custo.

Estudos sobre novos materiais para coletores foram feitos, Cristofari et al., (2002) estudaram coletores de placa plana composto por polímero, com um formato da superfície absorvedora como mostrado pela Fig. 11. Foi realizado um estudo baseado na Lei de Kirchhoff, considerando todas as trocas de calor no sistema, como mostrado na Fig. 12. O balanço de energia foi feito para cada nó, para intervalo de tempo, para a análise da variação da temperatura da água que escoou pelo coletor, que é definida como função da temperatura do



FONTE: CRISTOFARI et al., 2002

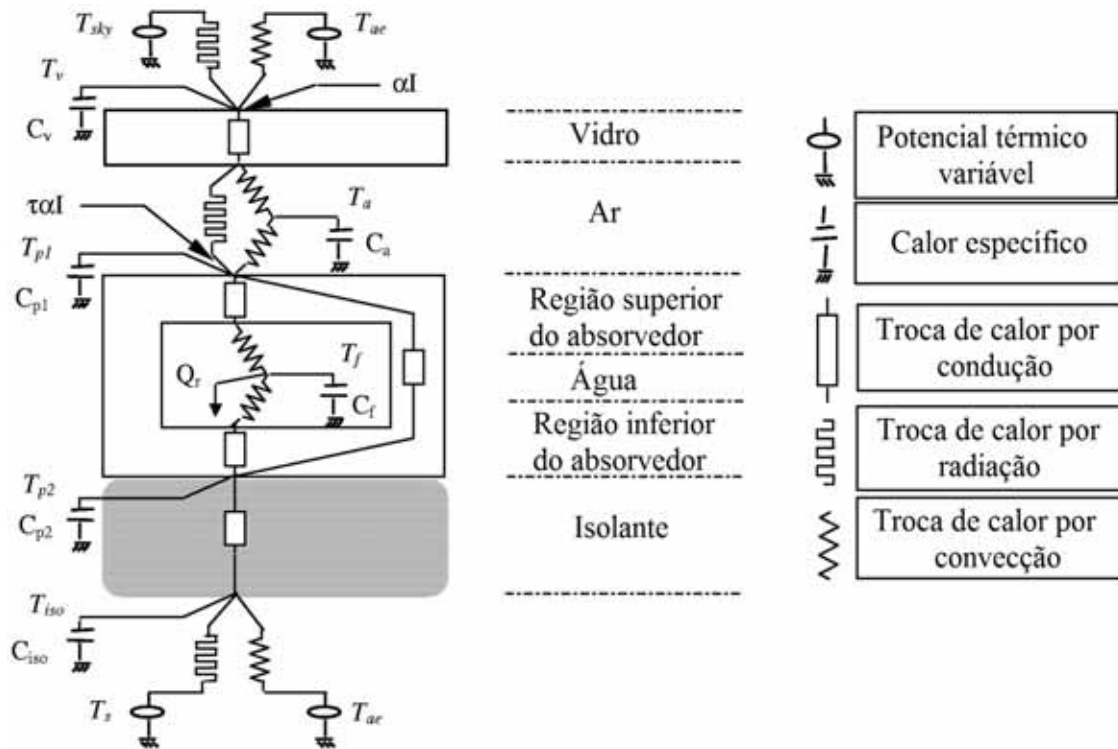
Figura 11: Seção transversal de um coletor de polímero

topo e da base do absorvedor, e das resistências térmicas de condução do absorvedor e de convecção do fluido.

Após a definição da variação da temperatura no coletor, foi feito também um balanço térmico no reservatório térmico para o estudo dinâmico da temperatura. Para resolver os sistemas de equações diferenciais obtidas foi utilizado o Método de Runge Kutta de quarta ordem e, por fim, a partir da análise da variação da temperatura do fluido ao longo de um dia foi calculada a eficiência térmica do sistema ao longo do mesmo dia.

Farahat et al., (2009) desenvolveram uma rotina para otimizar sistemas de aquecimento solar de água residencial, considerando maximizar a função objetivo da eficiência térmica, calculada segundo um balanço de exergia, em relação a área do coletor de placa plana e o fluxo de massa que escoar pelo mesmo. Como as funções objetivos e de contorno são equações não lineares foram utilizadas ferramentas numéricas pré existentes de maximização, que utilizam do método de programação sequencial quadrática.

O trabalho desenvolvido durante o mestrado de Souza, (2009) tinha como objetivo desenvolver um *software* para otimização de sistemas centralizados de aquecimento solar de água, a partir do método F-Chart e de um balanço de energia no reservatório térmico, com o



FONTE: CRISTOFARI et al., 2002

Figura 12: Esquema representativo das trocas de calor pela Lei de Kirchhoff

intuito de direcionar a aplicação de sistemas de aquecimento. O autor buscou calcular a fração solar a fim de otimizar o número de coletores a ser utilizados, ou seja, qual o melhor arranjo de coletores conectados em série ou em série/paralelo, segundo uma área total ótima. Além disso, o autor realizou uma análise financeira para a implementação de sistemas de aquecimento solar, de acordo com o estudo de valor presente, taxa de retorno e tempo de *payback*.

Medeiros, (2012) desenvolveu um programa computacional com o intuito de simular e dimensionar, com o objetivo de obter sistemas otimizados de aquecimento solar de água, a partir de um balanço de energia no coletor solar. O trabalho foi realizado a fim de minimizar os custos com instalação e com o consumo com energia elétrica. Após feita a análise e obtido os sistemas otimizados, o autor comparou os resultados obtidos com o custo ao utilizar chuveiro elétrico.

E para um melhor estudo sobre o comportamento do uso de aquecimento solar doméstico, Miyazato, (2012) realizou uma avaliação para compor diretrizes de projeto para integração de sistemas de aquecimento voltadas para uso residencial. A autora realizou duas análises, uma teórica, baseada no uso dos equipamentos, normas programas de necessidades e uma verificação prática, alicerçado em entrevistas com especialistas, consulta a manuais técnicos de diferentes fabricantes e participações em cursos sobre sistemas de aquecimento solar.

O presente trabalho visa estudar os diferentes métodos de dimensionamento de sistemas de aquecimento solar residencial, com o objetivo de obter sistemas otimizados pela implementação no *software* Gnu-Octave. Além disso, a partir da análise da presente revisão, será feito um estudo proposto de um sistema acoplado de coletores sem cobertura, para pré aquecimento da água, e com um de simples cobertura. Tal estudo será feito baseado na equação da energia útil de Hottel e Whillier (1958) a partir de uma análise dinâmica das temperaturas de mistura no reservatório térmico.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias utilizadas pelos diferentes modelos aplicados no cálculo da energia útil e da fração solar obtida por coletores de placas planas. Estes métodos são: o da Energia Útil, Energia Útil baseada em um modelo dinâmico da temperatura de entrada no coletor, Modelo dinâmico de temperatura para um sistema acoplado de coletores solares e o ϕ, f -Chart.

Para o estudo das metodologias foi considerado os cálculos para os dias típicos, que são os dias que apresentam o comportamento semelhante à média mensal de cada mês. Segundo Kalogirou, 2009, um ano típico resume todas as informações climáticas de um estudo a longo prazo do sistema solar. Desta forma, um estudo a longo prazo de um coletor solar pode ser feito a partir dos dados de um ano típico. A Tab. 5 apresenta os dias típicos de um ano típico.

Para o cálculo da demanda será necessário obter o valor da temperatura de água fria fornecida ao sistema. Neste caso, foi considerada a hipótese que a mesma encontra-se 1 °C abaixo da temperatura ambiente do local estudado. Assim:

- $T_{af} = T_a - 1$

Tabela 5: Dias Típicos para cada mês

Mês	Dia Típico
Janeiro	17
Fevereiro	16
Março	16
Abril	15
Mai	15
Junho	11
Julho	17
Agosto	16
Setembro	15
Outubro	15
Novembro	14
Dezembro	10

A inclinação dos coletores solares varia de acordo com sua aplicação, geralmente é utilizada uma inclinação de 10° acima do valor absoluto da latitude onde o mesmo se encontra, voltado para o equador e, sendo essa inclinação adotada para o presente projeto. (KALOGIROU, 2009)

- $\beta = \pm |\varphi + 10|$

Para o estudo dos métodos baseados no cálculo da energia útil do sistema foi necessário estabelecer algumas hipóteses, que são listadas abaixo:

- Para o cálculo da energia útil serão apenas considerados os valores positivos. Já que quando as perdas forem maiores que os ganhos de energia devido a radiações, não haverá fluxo reverso no efeito termossifão. Assim sendo, a energia armazenada pelo fluido não será perdida e, apenas não haverá absorção da radiação térmica. Desta forma, a Energia Útil nesse estudo foi considerada sempre maior ou igual a zero, ou seja, $Q_u \geq 0$.
- Para obter toda a Energia Útil disponível no sistema foi feita uma varredura de todas as energias incidentes naquela hora, desde o ângulo horário do nascer do sol (h_{sr}) até o pôr do sol (h_{ss}). Foi considerada a igualdade, em termos absolutos, do ângulo horário do nascer e do pôr do Sol $h_{sr} = -h_{ss}$.
- A fração solar foi calculada segundo o calor útil para cada dia típico de todos os meses, para a demanda referente ao mesmo dia, e dessa forma, considerada como média mensal para cada mês.

O ângulo horário do pôr do sol (h_{ss}) é o ângulo que os raios solares fazem no momento do pôr do sol, em um ponto na superfície da Terra, com o meio dia. Assim, ele pode ser calculado para o instante em que o ângulo de altitude solar é zero, ou o ângulo de zênite é de 90° . O ângulo horário do pôr do sol pode ser observado pela Fig. 13.

1 - Método Estático

Para a utilização do método da energia útil foi adotado a hipótese de que a temperatura de entrada do coletor é igual à de mistura do sistema, que foi também adotada como uma temperatura média entre a temperatura de demanda e a ambiente, constante ao longo de todo o dia, (KULKARNI et al., 2007) assim:

$$T_e = T_{me} = \frac{T_L + T_a}{2}$$

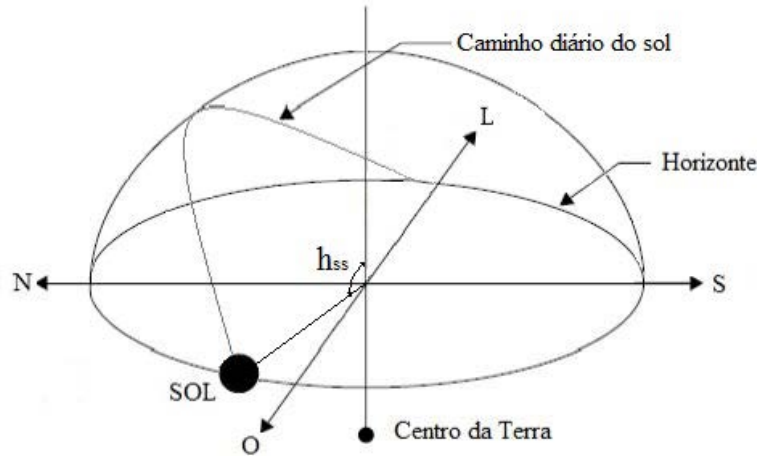


Figura 13: Ângulo do pôr do sol

A equação 1 foi desenvolvida por Hottel e Whillier (1958) e é considerada base para o dimensionamento de sistemas de aquecimento de água composto por coletores de placa plana. A expressão determina o calor útil fornecido por um coletor devido a absorção de radiação incidente sobre o mesmo descontando-se as perdas de calor para o meio. Ela é função das características do coletor (Área (A_c), fator de remoção de calor (F_R), produto transmitância absorvância ($\tau\alpha$) e coeficiente de perdas (U_L)), da radiação incidente sobre o mesmo (I_t) e a diferença entre a temperatura de entrada do fluido no coletor e a temperatura ambiente. Assim, o calor útil fornecido pelo coletor é dado por:

$$Q_u = A_c F_R [I_c (\tau\alpha) - U_L (T_{me} - T_a) \Delta t] \quad (1)$$

Para calcular a quantidade de energia capturada no dia típico de cada mês, será avaliada a energia horária capturada ao longo de todo o dia. Para isso, foi utilizada a equação 1, porém será considerada a irradiação horária (I_c) para a respectiva temperatura instantânea de entrada no coletor (T_{me}). Além disso, uma correção foi necessária, pois os valores de absorvância dos coletores são dados em função do produto transmitância absorvância normal ao coletor e não segundo a inclinação da incidência da radiação, dessa forma obteve-se a equação 2,

$$q_u = A_c F_R \left[(\tau\alpha)_n \frac{\tau\alpha}{(\tau\alpha)_n} I_c - U_L (T_{me} - T_a) \Delta t \right] \quad (2)$$

Para o cálculo do parâmetro de radiação incidente sobre um coletor inclinado pelo produto da transmitância absorvância horária, deve-se utilizar a equação 3,

$$\frac{\tau\alpha}{(\tau\alpha)_n} I_c = I_B R_B \frac{(\tau\alpha)_B}{(\tau\alpha)_n} + I_D \frac{(\tau\alpha)_D}{(\tau\alpha)_n} \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + I_T \frac{(\tau\alpha)_G}{(\tau\alpha)_n} \rho_G \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (3)$$

O produto $\tau\alpha$ representa a interatividade das características ópticas das radiações solares presentes entre o vidro e a superfície absorvedora do coletor. Assim, de acordo com Smith e Weiss (1977), a eficácia do produto transmitância absorvância é influenciada pela cobertura do coletor, pelo número de coberturas de vidro, pela superfície absorvedora e pelo ângulo de incidência das radiações solares. Porém, é importante ressaltar que as radiações direta, difusa e refletida incidem com ângulos diferentes (θ_i), para um mesmo instante. Dessa forma, foi considerado que para coletores sem cobertura, a razão entre a transmitância absorvância ($\tau\alpha/\tau\alpha_n$) é igual a 1 e para coletores com simples cobertura o cálculo para cada tipo de radiação, o produto $\tau\alpha$ horário pode ser calculado pela equação 4,

$$\frac{(\tau\alpha)_i}{(\tau\alpha)_n} = K_\theta = 1 - b_0 \left[\frac{1}{\cos(\theta_i)} - 1 \right], \quad (4)$$

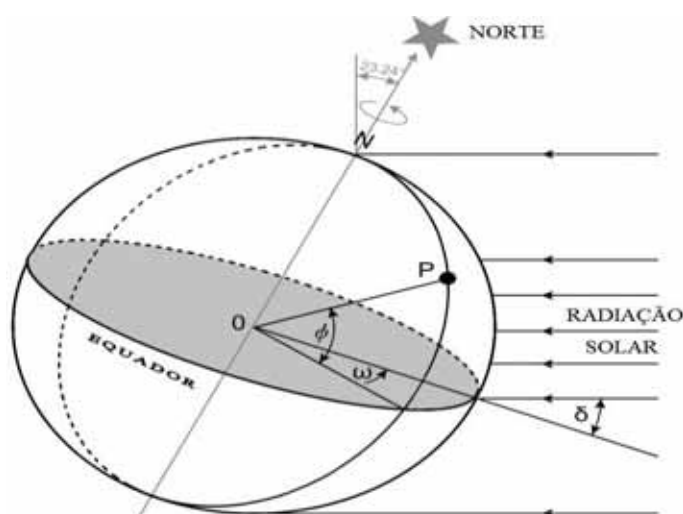
sendo $b_0 \approx 0,1$, para coletores de simples cobertura.

Para utilização destas expressões, é preciso estimar o ângulo de incidência de cada uma das naturezas das radiações (direta (B), difusa (D) e refletida (G)) sobre o coletor, devido a inclinação do mesmo (KALOGIROU, 2009),

$$\begin{aligned} \theta_B &= \arccos[\cos(h)\cos(\delta)\cos(\varphi+\beta) + \sin(\delta)\sin(\varphi+\beta)] \\ \theta_D &= 59.68 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \\ \theta_G &= 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \end{aligned} \quad (5)$$

O ângulo de incidência da radiação direta para coletores instalados no hemisfério Sul, θ_B , é função do ângulo horário, h , do ângulo de declinação, δ , da latitude do local, φ , e da inclinação do coletor, β . Para o cálculo do ângulo de incidência da radiação direta de coletores utilizados no hemisfério norte, deve-se utilizar o ângulo de inclinação, β , com valor negativo.

A declinação é a distância angular que os raios incidentes fazem com a linha do Equador, como ilustrado pela Fig. 14. Assim, quando a Terra se posiciona no equinócio de outono ou de primavera, a declinação é nula, já que os raios incidem na Terra, paralelamente a latitude. Como a declinação depende apenas da posição em que a Terra se encontra de acordo com seu movimento de translação em torno do Sol, a declinação é determinada em função do dia do ano (N), como definida pela equação 6, desenvolvida por Kalougirou (2009),



FONTE: The Sun As A Source Of Energy, 2013

Figura 14: Variação do ângulo de declinação ao longo das estações do ano

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen}\left(\frac{360(284 + N)}{365}\right) \quad (6)$$

O ângulo horário é o ângulo formado entre a posição da hora média utilizada para o cálculo da radiação horária e o meio dia, sendo valores negativos para horas antes e positivos para depois das 12 horas,

$$h = (\text{Hora} - 12)15 \quad (7)$$

Assim, é necessário obter o Fator de radiação direta sobre uma superfície inclinada R_B , já que os dados de radiações são medidos segundo uma superfície horizontal. A inclinação dos coletores solares varia de acordo com sua aplicação, sendo geralmente utilizado uma inclinação de 10° a mais que a latitude, onde o mesmo se encontra e voltado para o equador. Dessa forma, o fator R_B foi estimado para converter a radiação direta sobre uma superfície horizontal para uma superfície inclinada.

Para um coletor fixo com a face voltada para o sul, ou seja, instalado no hemisfério norte o fator R_B é calculado como em Iqbal (1978), pela equação 8,

$$R_B = \frac{\operatorname{sen}(\varphi - \beta) \operatorname{sen}(\delta) + \cos(\varphi - \beta) \cos(\delta) \cos(h)}{\operatorname{sen}(\varphi) \operatorname{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(h)} \quad (8)$$

Para um coletor fixo com a face voltada para o norte, ou seja, instalado no hemisfério sul o fator R_B é calculado por

$$R_B = \frac{\sin(\varphi + \beta) \sin(\delta) + \cos(\varphi + \beta) \cos(\delta) \cos(h)}{\sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(h)} \quad (9)$$

As radiações horárias incidentes são obtidas a partir da radiação total incidente sobre uma superfície horizontal, \bar{H} , para um dia típico de acordo com a latitude específica. Sendo as radiações direta, difusa e total, utilizadas na equação 3, determinadas por Pandey e Katiyar (2011), pela equação 10,

$$\begin{aligned} I_T &= \bar{H} r \\ I_D &= \bar{H}_D r_d \\ I_B &= I_T - I_D \end{aligned} \quad (10)$$

Para o cálculo das radiações ao longo do dia, foi utilizada a reconstituição da curva de radiação a partir dos parâmetros r e r_d , apresentados nas equações 11 e 12 e os valores de radiação incidente.

Valores de radiações por hora normalmente não estão disponíveis, porém é possível obtê-las a partir da radiação diária média mensal, através de correlações empíricas. De acordo com Collares-Pereira e Rabl (1979) a razão entre radiação total horária e a radiação total diária r é dada como função do ângulo do pôr do sol e do ângulo horário,

$$r = \frac{\pi}{24} (\sigma + \gamma \cos(h)) \frac{\cos(h) - \cos(h_{ss})}{\sin(h_{ss}) - (2\pi h_{ss}/360) \cos(h_{ss})} \quad (11)$$

$$\text{Sendo: } \sigma = 0,409 + 0,5016 \sin(h_{ss} - 60)$$

$$\gamma = 0,6609 - 0,4767 \sin(h_{ss} - 60)$$

Liu e Jordan (1960) propuseram a correlação empírica da razão entre a radiação difusa horária e a radiação difusa diária r_d que permite obter a radiação difusa horária solar através do valor diário, como sendo,

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos(h) - \cos(h_{ss})}{\sin(h_{ss}) - (2\pi h_{ss}/360) \cos(h_{ss})} \quad (12)$$

As correlações r e r_d , são dependentes apenas do ângulo horário dado pela equação (7) e pelo ângulo do pôr do Sol (h_{ss}).

O ângulo do pôr do sol é função da latitude do local e do ângulo de declinação e dado pela seguinte equação,

$$h_{ss} = -\text{tg}(\varphi) \text{tg}(\delta) \quad (13)$$

Para obter a radiação total difusa sobre uma superfície horizontal, \bar{H}_D , utilizada pela equação 10, deve-se calcular a razão definida por Erbs et al. (1982). A razão entre a radiação difusa média mensal diária e a radiação total média mensal diária sobre uma superfície horizontal (\bar{H}_D/\bar{H}), está apresentada pelas equações 14 e 15,

- Para $h_{ss} \leq 81,4^\circ$ e $0,3 \leq K_T \leq 0,8$

$$\frac{\bar{H}_D}{\bar{H}} = 1,391 - 3,560 \bar{K}_T + 4,189 \bar{K}_T^2 - 2,137 \bar{K}_T^3 \quad (14)$$

- Para $h_{ss} > 81,4^\circ$ e $0,3 \leq K_T \leq 0,8$

$$\frac{\bar{H}_D}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022 \bar{K}_T + 3,427 \bar{K}_T^2 - 1,821 \bar{K}_T^3 \quad (15)$$

O índice de claridade, K_T , é obtido a partir da relação entre a radiação total diária e a radiação extraterrestre incidindo sobre uma determinada superfície horizontal. Esse índice está relacionado à quantidade de nuvens, que impedem que toda a radiação atravesse a atmosfera, e é definido pela equação 16,

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (16)$$

Cabe ressaltar que, embora as nuvens reduzam a quantidade de radiação direta sobre o sistema, elas também possuem alto poder de refletividade aumentando significativamente o índice de radiação difusa. Segundo Liu e Jordan (1963), \bar{K}_T pode assumir os seguintes valores:

- Céu completamente nublado, $\bar{K}_T < 0,3$
- Céu parcialmente nublado, $0,3 < \bar{K}_T < 0,7$
- Céu claro (sem nebulosidade), $\bar{K}_T > 0,7$

A radiação extraterrestre independe de fatores atmosféricos. Ela é dada levando-se em conta a constante solar e características geométricas da órbita terrestre, sendo dada pela equação,

$$\bar{H}_0 = \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{SC}}{\pi} \cdot \left[1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot N}{365} \right) \right] \cdot \left[\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h_{ss}) + \left(\frac{\pi \cdot h_{ss}}{180} \right) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \right] \quad (17)$$

onde G_{SC} é a constante Solar, e foi considerada constante e igual a $G_{SC}=1366,1 \text{ W/m}^2$.

Definido o procedimento de cálculo do calor útil fornecido pelo coletor para o aquecimento da água, é necessário definir a fração solar (f) que o sistema de energia solar é capaz de suprir, apresentada pela equação 18,

$$f = \frac{Q_u}{L} \quad (18)$$

A demanda de água quente é função do volume de água quente necessário para determinada residência Q_L , do calor específico da água, considerado como constante de valor $c_p=4,18 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ e a variação de temperatura de demanda e a da água fria,

$$L = \rho Q_L c_p (T_L - T_{af}) \quad (19)$$

A partir da metodologia descrita acima foi elaborado o fluxograma para o método da energia útil estático apresentado na Fig. 15.

2 - Método do Modelo Dinâmico

Para utilização do Modelo Dinâmico foi considerado como hipótese que haveria uma estratificação de temperatura no reservatório, assim a temperatura de entrada no coletor seria uma média entre a temperatura de mistura (T_{me}) do sistema e a ambiente (T_a):

- $T_e = \frac{T_{me} + T_a}{2}$

O Método dinâmico tem o objetivo de calcular a energia útil da mesma forma que o Método estático, porém neste caso, a variação de temperatura de mistura ao longo do dia é considerada. Esta variação da temperatura do reservatório térmico é obtida a partir do balanço de energia desprezando-se as perdas térmicas do reservatório. Assim sendo, toda a taxa de energia útil fornecida pelo coletor é utilizada para aquecer toda a água do reservatório térmico, elevando sua temperatura de mistura no mesmo intervalo de tempo, assim:

$$q_u = m_{res} c_p \frac{dT}{dt} \quad (20)$$

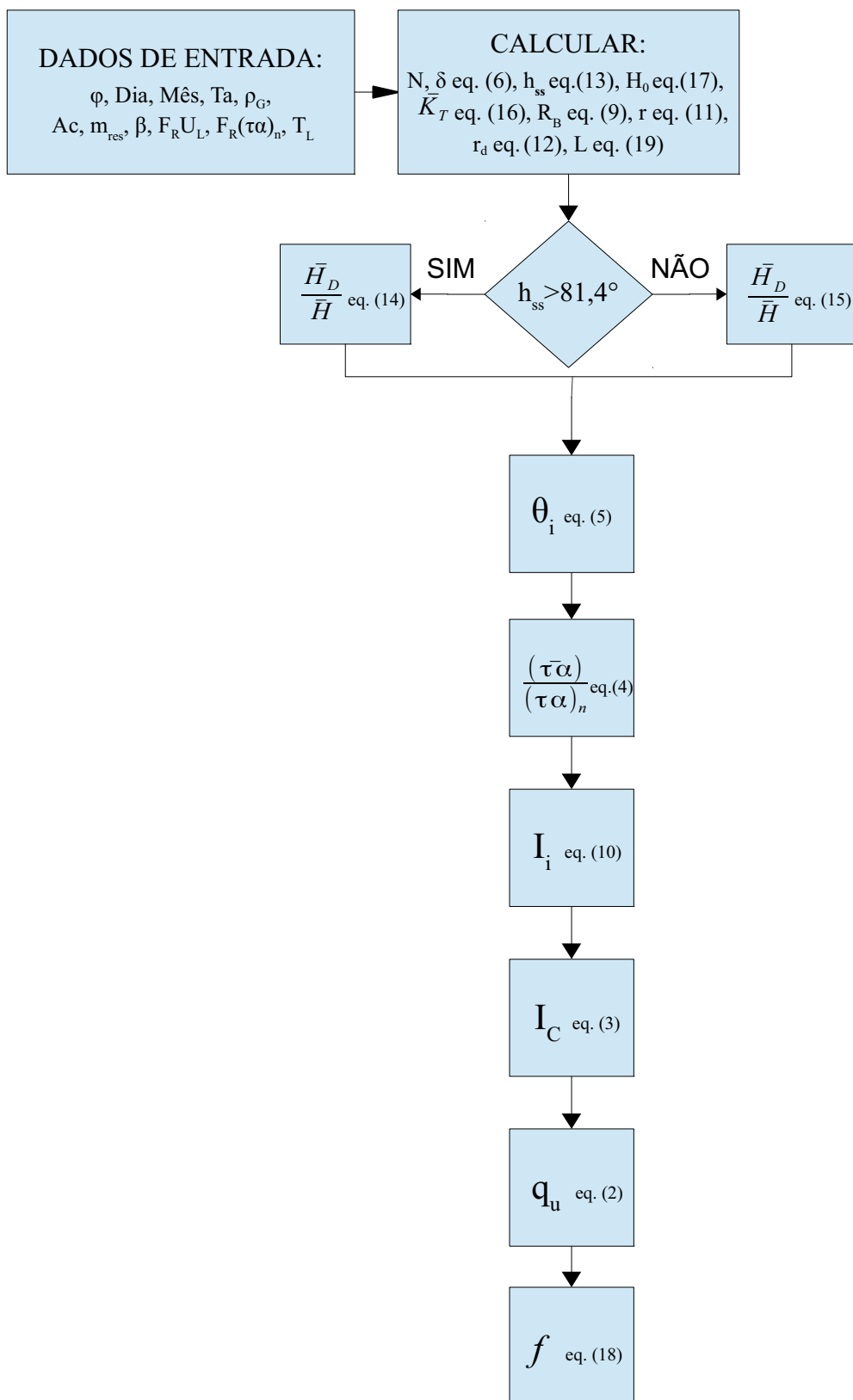


Figura 15: Fluxograma do Método da Energia Útil

Sendo a equação 20 uma expressão similar à obtida por Kulkarni et al., (2007). Ajustando-se a expressão de maneira a isolar a derivada de temperaturas obtém-se:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q_u}{m_{res} c_p} \quad (21)$$

Resolvendo esta equação diferencial, com a utilização da equação 2 para o cálculo da energia útil, é possível obter a evolução da temperatura de mistura ao longo do dia, desde a hora do nascer ao pôr do sol. Assim sendo, tem-se uma equação diferencial ordinária de primeira ordem na forma:

$$\frac{dT}{dt} - \frac{q_u(t)}{m_{res} c_p} = 0 \quad (22)$$

que deve ser resolvida desde $-h_{ss}$ até h_{ss} , calculados pela equação 13, e sujeita à condição inicial:

$$t = -h_{ss} \rightarrow T(-h_{ss}) = T_e \quad (23)$$

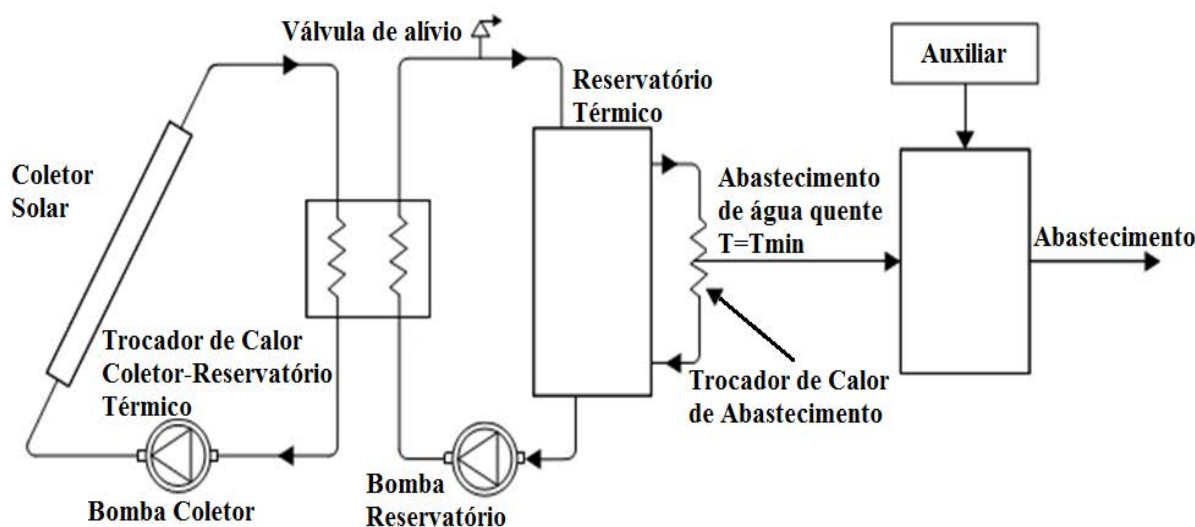
onde T_e representa a temperatura igual à da água fria na entrada do coletor no dia considerado.

Como o comportamento da energia útil varia ao longo do dia com as condições de radiação solar é necessário utilizar um método numérico para a solução do problema. Por se tratar de uma equação diferencial ordinária, o Método de Runge-Kutta de quarta-quinta ordem foi utilizado no próprio ambiente de solução GNU Octave/Matlab.

Resolvida esta equação diferencial, praticamente o mesmo procedimento adotado para o Método estático no cálculo da Energia Útil e da fração solar, nos dias típicos, foi utilizado. A única variação adicional neste caso foi a existência de variação da temperatura de entrada no coletor, uma vez que esta era proveniente do tanque armazenador.

3 - ϕ, f -Chart

O método proposto por Klein e Beckman (1979) combina os conceitos da “Utilizabilidade” diária e do f -Chart e, por conta disso, é conhecido como ϕ, f -Chart. A utilizabilidade é o método de dimensionamento que utilizado para calcular os desempenhos dos coletores a partir do conceito que apenas radiações acima de um nível crítico são úteis. Já o método f -Chart é a metodologia que determina a fração solar a partir de uma equação empírica. O método ϕ, f -Chart considera um sistema fechado de aquecimento solar de água, como mostrado pela Fig. 16.



FONTE: KALOGIROU, 2009

Figura 16: Esquema proposto para o Método ϕ, f -Chart

Neste modelo não há restrição na temperatura de entrada do coletor, como é previsto no método f -Chart, mas é necessário limitar uma temperatura mínima da água de abastecimento. O método busca uma taxa de radiação mínima média mensal crítica (I_{tc}), que ocorre quando a temperatura de saída é a mínima. Dessa forma é possível obter a máxima eficiência do sistema ($\bar{\phi}_{max}$), pois a máxima quantidade de energia absorvida por um coletor corresponde ao caso em que a temperatura do fluido de entrada no coletor seja T_{min} .

O método ϕ, f -Chart é baseado no método f -Chart e busca os parâmetros adimensionais (Y e X) que caracterizam o comportamento do coletor para obter a fração solar mensal, sendo função basicamente da radiação solar total sobre a placa coletora, da demanda a ser suprida e da utilizabilidade diária máxima do sistema e das características do coletor: área do coletor (A_C), reservatório térmico, coeficiente de perdas de calor do coletor (U_L), fator de remoção de calor (F_R) e do produto transmitância absorvância ($\tau\alpha$).

Assim, a fração solar mensal total é calculada pela equação analítica apresentada abaixo, a partir dos parâmetros adimensionais,

$$f = \bar{\phi}_{max} Y - 0,015 [\exp(3,85 f) - 1] [1 - \exp(-0,15 X')] R_s^{0,76} \quad (24)$$

O parâmetro de correção para o reservatório térmico, R_s , que é a relação entre a capacidade padrão do reservatório por unidade de área ($350 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$) e a capacidade mássica do reservatório utilizado no sistema (M),

$$R_s = \frac{350}{\frac{M c_p}{A_c}} \quad (25)$$

O parâmetro adimensional X' representa a razão da perda total de calor em relação a demanda total (L), calculada pela equação 19 multiplicada pelo número de dias, em relação ao tempo total em segundos (Δt) para o mês estudado,

$$X' = \frac{A_c (F_R U_L) (100) \Delta t}{L} \quad (26)$$

E o parâmetro $\bar{\phi}_{max} Y$ representa a taxa total de energia solar absorvida pelo coletor em relação a demanda total mensal (L),

$$\bar{\phi}_{max} Y = \bar{\phi}_{max} \frac{A_c \cdot F_R (\bar{\tau} \bar{\alpha}) N \bar{H}_t}{L} = \bar{\phi}_{max} \frac{A_c \cdot F_R (\bar{\tau} \bar{\alpha})_n [(\bar{\tau} \bar{\alpha}) / (\bar{\tau} \bar{\alpha})_n] N \bar{H}_t}{L}, \quad (27)$$

sendo N o número de dias para o mês calculado e \bar{H}_t a radiação total média mensal diária sobre um coletor inclinado, dado por,

$$\bar{H}_c = \bar{H} \bar{R} \quad (28)$$

O fator de radiação total mensal sobre uma superfície inclinada pode ser calculado por,

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_c}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_D}{\bar{H}}\right) \cdot \bar{R}_B + \frac{\bar{H}_D}{\bar{H}} \cdot \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right] + \rho_G \cdot \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right] \quad (29)$$

A relação entre as radiações médias mensais diárias difusa e total é dada pelas Equações 14 e 15 e a relação \bar{R}_B (fator médio mensal para radiação direta sobre um plano inclinado em relação a uma superfície horizontal) é dada pela equação apresentada por Iqbal, (1978):

- Para o hemisfério sul,

$$\bar{R}_B = \frac{\cos(\varphi + \beta) \cos(\delta) \text{sen}(h_{ss}') + (\pi/180) h_{ss}' \text{sen}(\varphi + \beta) \text{sen}(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}(h_{ss}) + (\pi/180) h_{ss} \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta)} \quad (30)$$

- Para o hemisfério norte,

$$\bar{R}_B = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos(\delta) \text{sen}(h_{ss}') + (\pi/180) h_{ss}' \text{sen}(\varphi - \beta) \text{sen}(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}(h_{ss}) + (\pi/180) h_{ss} \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta)}, \quad (31)$$

sendo δ e h_{ss} calculados pelas equações 6 e 14, respectivamente. O ângulo horário do pôr do

sol corrigido, h_{ss}' , devido a inclinação do coletor é o mínimo valor entre o ângulo horário do pôr do sol e o ângulo horário do pôr do sol levando em consideração a inclinação do mesmo, ou seja:

$$\begin{aligned} h_{ss}' &= \min\{\cos^{-1}[-\operatorname{tg}(\varphi - \beta)\operatorname{tg}(\delta)], \cos^{-1}[-\operatorname{tg}(\varphi)\operatorname{tg}(\delta)]\} \text{ no Hemisfério Norte} \\ h_{ss}' &= \min\{\cos^{-1}[-\operatorname{tg}(\varphi + \beta)\operatorname{tg}(\delta)], \cos^{-1}[-\operatorname{tg}(\varphi)\operatorname{tg}(\delta)]\} \text{ no Hemisfério Sul} \end{aligned} \quad (32)$$

Para obter o parâmetro que representa a energia absorvida é necessário calcular ϕ_{max} que representa a máxima utilizabilidade diária. Esta condição ocorre quando a radiação crítica é máxima, ou seja, ao meio dia,

$$\bar{\phi}_{max} = \exp\left(\left[A + B \frac{R_n}{\bar{R}}\right] \left[\bar{X}_{C,min} + C \bar{X}_{C,min}^2\right]\right), \quad (33)$$

sendo \bar{R} calculado pela equação 29 e a taxa de radiação ao meio dia sobre uma superfície inclinada pela radiação sobre uma superfície horizontal, para um determinado dia, R_n , é definido,

$$R_n = \left(\frac{I_t}{I}\right)_n = \left(1 - \frac{r_{d,n} H_D}{r_n}\right) R_{B,n} + \left(\frac{r_{d,n} H_D}{r_n H}\right) \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right] + \rho_G \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right] \quad (34)$$

As relações r_n , $r_{d,n}$ e $R_{B,n}$ são calculados pelas equações 11, 12 e 9, respectivamente, para o meio dia ($h=0^\circ$). Como o cálculo de R_n é feito para um dia típico, no qual a radiação total é igual à média mensal diária, foi considerado que $H = \bar{H}$. O termo H_D/H foi estimado por Erbs et al. (1982), para quatro diferentes localidades nos Estados Unidos e comparado com os estudos de outros autores realizados na Austrália, dessa forma, foi considerado as mesmas relações aplicadas ao Brasil, sendo:

- Para $h_{ss} \leq 81,4^\circ$ e $K_T < 0,715$,

$$\frac{H_D}{H} = 1,0 - 0,2727 K_T + 2,4495 K_T^2 - 11,9514 K_T^3 + 9,3879 K_T^4 \quad (35)$$

- Para $h_{ss} \leq 81,4^\circ$ e $K_T \geq 0,715$,

$$\frac{H_D}{H} = 0,143 \quad (36)$$

- Para $h_{ss} > 81,4^\circ$ e $K_T < 0,722$,

$$\frac{H_D}{H} = 1,0 + 0,2832 K_T - 2,5557 K_T^2 + 0,8448 K_T^3 \quad (37)$$

- Para $h_{ss} > 81,4^\circ$ e $K_T \geq 0,722$,

$$\frac{H_D}{H} = 0,175 \quad (38)$$

Como os cálculos para as relações acima são considerados para o dia típico, o índice de claridade para um dia é considerado igual ao médio mensal diário, ou seja, $K_T = \bar{K}_T$.

Um outro parâmetro adimensional importante é o $\bar{X}_{C, min}$, que é a razão da radiação crítica mínima média mensal e a radiação incidente ao meio dia. Ele implica, portanto, que a máxima energia absorvida pelo coletor ocorre quando se tem uma menor radiação crítica, ou seja, ao meio dia e com a temperatura de abastecimento é a mínima,

$$\bar{X}_{C, min} = \frac{(F_R U_L)(T_{min} - \bar{T}_a)}{F_R(\bar{\tau}\alpha)} = \frac{(F_R U_L)(T_{min} - \bar{T}_a)}{r_n \cdot R_n \bar{K}_t \bar{H}_0} = \frac{(F_R U_L)(T_{min} - \bar{T}_a)}{r_n \cdot R_n \bar{K}_t \bar{H}_0} \quad (39)$$

A radiação extraterrestre média mensal diária para um dia típico é calculada pela equação 17. O valor médio mensal do produto transmitância absorptância $(\bar{\tau}\alpha)$ é igual à razão entre radiação média absorvida pela radiação média incidente sobre o coletor,

$$\bar{\tau}\alpha = \frac{\bar{S}}{\bar{H}_t} \quad (40)$$

A radiação absorvida pelo coletor é dada por

$$\bar{S} = \bar{H}_B \bar{R}_B(\bar{\tau}\alpha)_B + \bar{H}_D(\bar{\tau}\alpha)_D \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + \bar{H} \rho_G(\bar{\tau}\alpha)_G \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (41)$$

Substituindo a equação 41 na 40, e dividindo pelo produto transmitância absorptância normal a superfície, obtém-se

$$\frac{(\bar{\tau}\alpha)}{(\tau\alpha)_n} = \frac{\bar{H}_B}{\bar{H}_c} \bar{R}_B \frac{(\tau\alpha)_B}{(\tau\alpha)_n} + \frac{\bar{H}_D}{\bar{H}_c} \frac{(\tau\alpha)_D}{(\tau\alpha)_n} \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + \frac{\bar{H}}{\bar{H}_c} \rho_G \frac{(\tau\alpha)_G}{(\tau\alpha)_n} \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (42)$$

Assim, as razões entre os produtos transmitância absorptância médios em relação ao produto quando a radiação é normal ao coletor, para cada tipo de radiação, devem ser obtidos. Os ângulos de incidência para as radiações difusas e refletidas foram determinadas por pela equação 5.

Além disso, a radiação direta média mensal diária \bar{H}_B é dada pela subtração entre a radiação total e a difusa, média mensal diária,

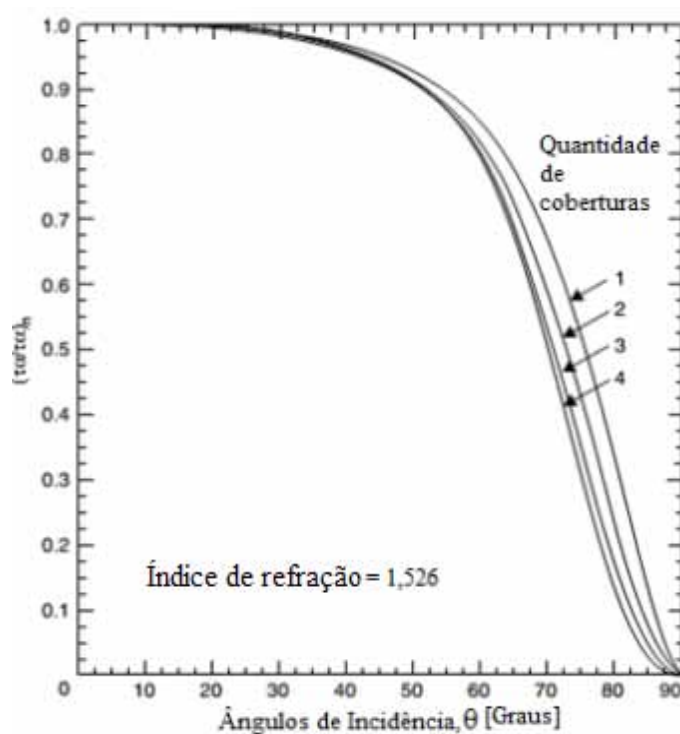
$$\bar{H}_B = \bar{H} - \bar{H}_D \quad (43)$$

Klein (1979) definiu o gráfico, apresentado na Fig. 17, que apresenta a relação entre o ângulo de incidência e $(\bar{\tau}\alpha)/(\tau\alpha)_n$, para coletores com 1 a 4 coberturas.

A partir desses gráficos, Kalogirou (2009) definiu uma equação aproximada para coletores com simples e dupla cobertura. Observando que, tanto para a definição do gráfico, quanto para as equações apresentadas abaixo, foram considerados uma refração de 1,526. Deve-se ressaltar ainda que para cada natureza da radiação tem-se um produto transmitância absorvância para seu respectivo ângulo de incidência θ , que são calculados pela equação 5.

- Simples cobertura

$$\frac{(\bar{\tau}\alpha)}{(\tau\alpha)_n} = -8,7 \cdot 10^{-8} \theta^4 + 1,03 \cdot 10^{-5} \theta^3 - 0,0004762 \theta^2 + 0,00851 \theta + 0,94967 \quad (44)$$



FONTE: KALOGIROU, 2009

Figura 17: Razão entre o produto transmitância absorvância médio mensal diário e o normal em função do ângulo de incidência para diferentes quantidades de coberturas

- Dupla cobertura

$$\frac{(\bar{\tau}\alpha)}{(\tau\alpha)_n} = -5,05 \cdot 10^{-8} \theta^4 + 3,578 \cdot 10^{-6} \theta^3 - 8,777 \cdot 10^{-5} \theta^2 - 1,836 \cdot 10^{-6} \theta + 1,0042 \quad (45)$$

A partir do procedimento descrito acima para o Método ϕ, f -Chart foi traçado o Fluxograma apresentado na Fig. 18.

4 - Método do Modelo Dinâmico para um Sistema Acoplado de Coletores

A partir da análise dos métodos propostos, verificou que o método da energia útil dinâmico seria a metodologia mais adequada para o dimensionamento do sistema acoplado proposto, já que o método estático faz uma análise aproximada do comportamento e o ϕ, f -Chart apresenta apenas equações empíricas de sistemas compostos pelo mesmo tipo de coletor.

O método do dinâmico para o sistema acoplado é baseado no modelo proposto, sendo adaptado para um sistema acoplado composto por diferentes tipos de coletores de placa plana. Neste estudo, foi proposto um sistema acoplado de coletores com e sem cobertura, com o intuito de se obter um sistema mais barato, devido ao pré aquecimento da água pelo coletor mais simples. Foi considerado que o coletor sem cobertura iria pré aquecer toda a água do reservatório térmico, aquecendo dessa forma, todo o volume de água. Já para o sistema com simples cobertura considerou que o mesmo trabalharia apenas com uma parcela do volume do reservatório, definido como uma razão volumétrica y , para que o ganho de temperatura dessa região fosse maior, já que toda energia captada pelo coletor com cobertura aqueceria um volume menor de água.

Foi adotada como hipótese que o reservatório fosse composto por duas regiões de estratificação, sendo cada coletor responsável por essas diferenças de temperaturas. Desta forma, para a região inferior do reservatório foi considerada a temperatura de entrada do primeiro coletor como a média entre a temperatura de mistura e a ambiente. Já para o coletor com cobertura a temperatura de entrada foi adotada como a média entre a temperatura de mistura da região superior e da inferior do reservatório, ou seja:

- $$T_{e,cs} = \frac{T_{me,i} + T_a}{2}$$
- $$T_{e,cc} = \frac{T_{me,i} + T_{me,s}}{2}$$

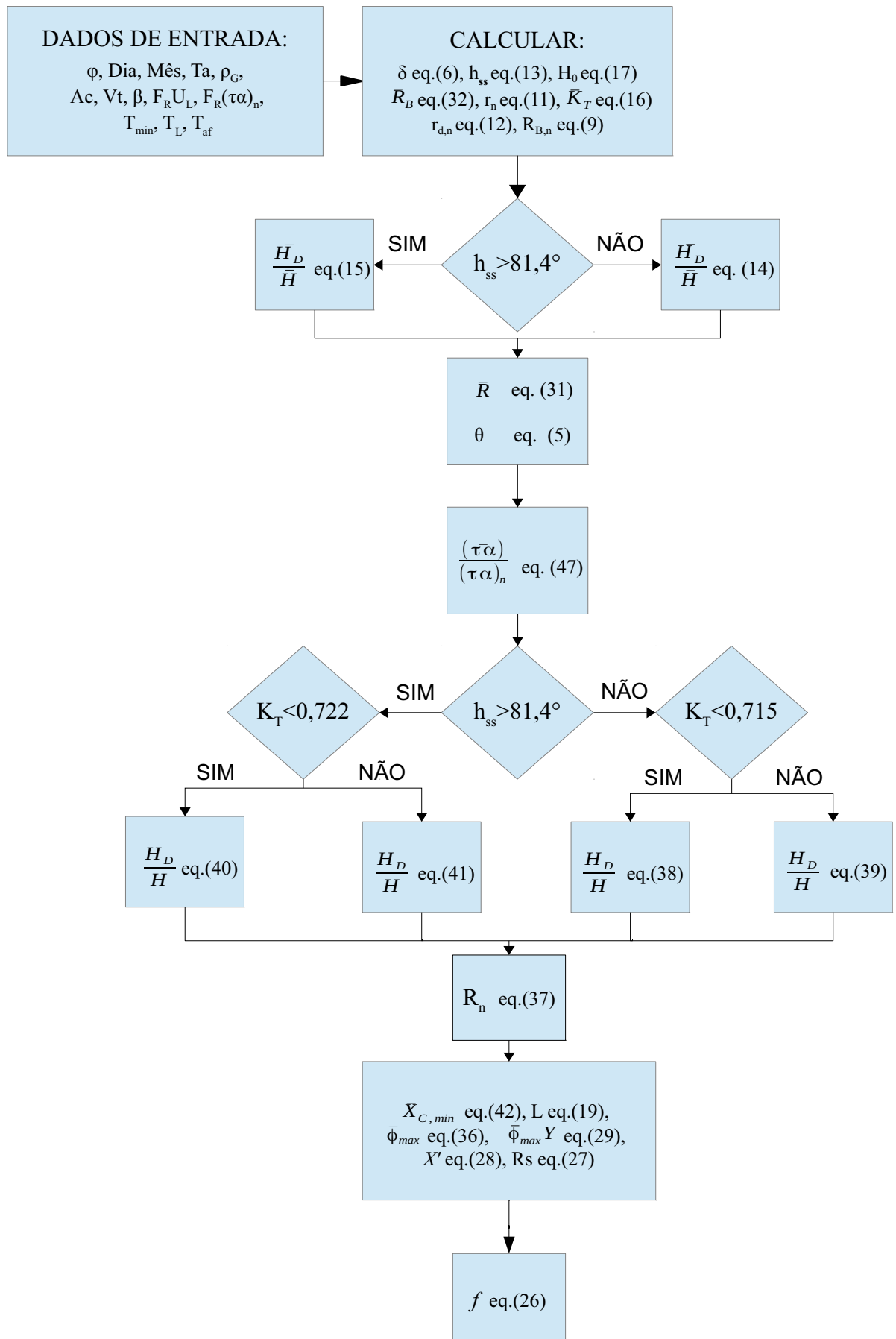


Figura 18: Fluxograma para o Método ϕ, f -Chart

A ideia principal seria permitir o estudo do comportamento de um acoplamento entre um coletor de placa plana sem cobertura, como um pré aquecedor, e um coletor com simples cobertura. De acordo com esta proposta estes estariam conectados a um reservatório térmico de maneira que cada um seria responsável pela recirculação do fluido em uma região, como ilustrado na Fig. 19. O coletor sem cobertura conectado ao reservatório deve ser responsável por pré aquecer a água do reservatório, enquanto o coletor ligado a região superior serve para elevar a temperatura da proporção y do reservatório.

Foi considerado para o cálculo da Energia Útil que o coletor de simples cobertura possuía uma fração x referente a uma área total do sistema, enquanto o com cobertura uma fração $(1-x)$ da área total do sistema. Assim, pela equação 2, tem-se as equações,

$$q_{u,cs} = A_T x F_R \left[(\tau \alpha)_n \frac{\tau \alpha}{(\tau \alpha)_n} I_c - U_L (T_{e,cs} - T_a) \Delta t \right] \quad (46)$$

$$q_{u,cc} = A_T (1-x) F_R \left[(\tau \alpha)_n \frac{\tau \alpha}{(\tau \alpha)_n} I_c - U_L (T_{e,cc} - T_a) \Delta t \right] \quad (47)$$

Dessa forma, é possível estudar a variação das temperaturas de mistura das regiões inferior e superior de maneira simultânea, para cada energia útil disponível por coletor. Neste caso, tem-se um sistema de equações diferenciais ordinárias para os dois balanços de energia, que devem ser resolvidas de maneira simultânea,

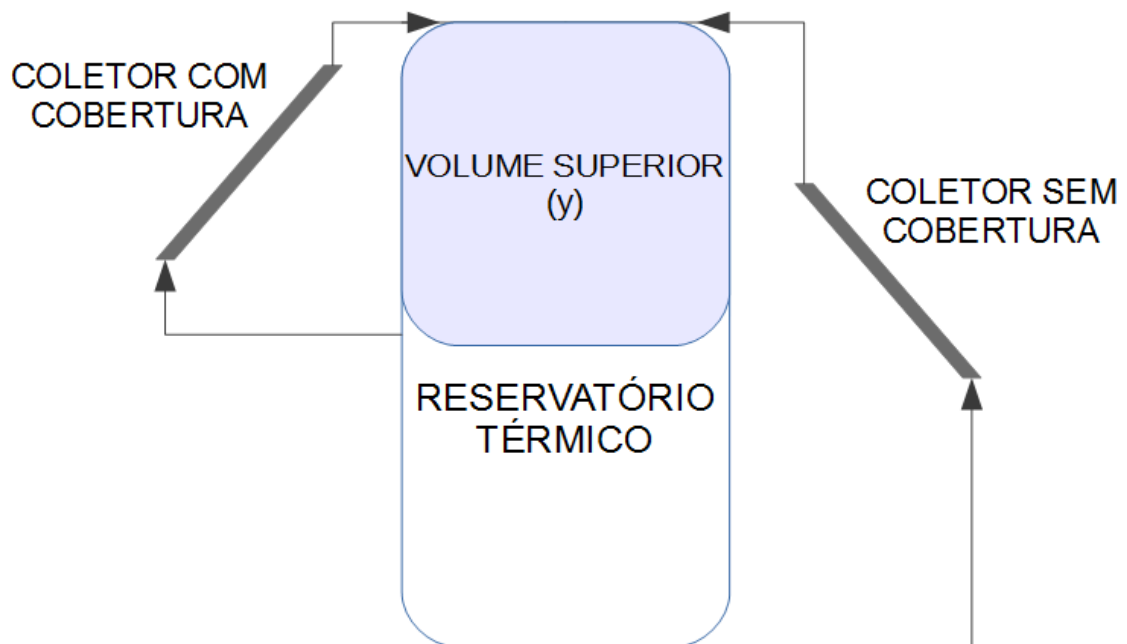


Figura 19: Esquema proposto para recirculação no reservatório de um sistema acoplado de coletores

$$\frac{dT_{cs}}{dt} = \frac{q_{u,cs}}{m_{res}c_p} \quad (48)$$

$$\frac{dT_{cc}}{dt} = \frac{q_{u,cc}}{y m_{res} c_p} + \frac{q_{u,cs}}{m_{res} c_p}$$

Assim, definidas as equações diferenciais, com um procedimento análogo ao descrito para o Método do modelo dinâmico aplicado a um único coletor, foi possível obter as distribuições de temperaturas ao longo dos dias típicos dentro do reservatório térmico. As condições iniciais do reservatório também foram consideradas idênticas para ambos os casos e iguais à temperatura de entrada do coletor no dia, como representado na equação 23.

Para o cálculo da fração solar, foi somado as energias úteis supridas por cada coletor, e o valor obtido foi dividido pela demanda para os dias típicos. Dessa forma, a expressão obtida para uma fração solar global do sistema acoplado é dada pela equação 49.

$$f = \frac{q_{u,cc} + q_{u,cs}}{L} \quad (49)$$

A Tabela 6 apresenta as características principais das metodologias e sistemas considerados no presente trabalho.

Tabela 6: Tabela resumo das metodologias e sistemas apresentados

Método	Sistema	Coletor	Radiação	Temperatura de entrada
Estático	Simplex	Com cobertura	Todas	Constante: $T_e = \frac{T_L + T_a}{2}$
ϕ , f -Chart	Simplex	Com cobertura	Acima da crítica	Não leva em consideração
Dinâmico	Simplex	Com cobertura	Todas	$T_e = \frac{T_{me} + T_a}{2}$
	Acoplado	Com cobertura	Todas	$T_{e,cc} = \frac{T_{me,i} + T_{me,s}}{2}$
		Sem cobertura		$T_{e,cs} = \frac{T_{me,i} + T_a}{2}$

5 - Análise Econômica

A análise econômica busca o melhor dimensionamento de um sistema de aquecimento solar de água combinando sua eficiência e melhor custo. Normalmente, os sistemas de energia solar não suprem 100% da demanda de água quente. Isso porque se o mesmo for dimensionado para suprir totalmente esta necessidade ele ficará superdimensionado para a maior parte do ano, gerando um sistema mais caro em relação a um sistema que supra uma necessidade inferior e a complete com uma energia auxiliar. Dessa forma, numa análise de custos deste tipo de sistemas, deve-se levar em consideração o valor adicional com a utilização de um combustível auxiliar.

O sistema de aquecimento solar possui a vantagem de não possuir custos com combustível, entretanto, o custo inicial do equipamento e sua instalação são altos. Já o sistema elétrico (mais utilizado no Brasil) requer um baixo investimento, mas possui gastos mensais de energia elétrica. Assim sendo, para compará-los economicamente a longo prazo deve ser considerado os custos financeiros do investimento (taxas de juros, de correção dos gastos ao longo da vida útil e das taxas de inflação dos combustíveis utilizados) tanto do convencional elétrico, como do sistema de aquecimento solar.

Ao se fazer uma análise econômica de um sistema de aquecimento solar a longo prazo, os gastos com o sistema ao longo da vida útil devem ser comparados em relação ao valor presente. Dessa forma deve se considerar que os valores investidos e a economia obtida ao longo dos anos quando comparados no presente. Para efeitos de comparação deve-se lembrar que gastos iguais executados em tempos diferentes não possuem o mesmo valor, pois se o pagamento de futuro for antecipado deve-se considerar o valor de desconto ou se o valor a ser pago no futuro for reservado no presente o mesmo desconto deve ser considerado. Assim sendo, é utilizada a equação 50 que define o valor presente dos custos e economia ao longo de cada ano (KALOUGIROU, 2009),

$$PW = \frac{C(1+i)^{v-1}}{(1+d)^v} \quad (50)$$

Porém, se o valor que será utilizado para pagar as despesas ao longo dos anos for aplicado em um fundo estável, deve-se levar em consideração a taxa de juros de aplicação, e o valor presente dos custos ao longo da vida útil do sistema quando o dinheiro gasto é aplicado é dado pela equação 51,

$$PW = \sum_{j=1}^v \frac{C(1+i)^{j-1}}{(1+d)^j}, \quad (51)$$

sendo v a vida útil do sistema em anos, d a taxa de desconto do valor monetário para o pagamento antecipado ou reservado no presente para o pagamento futuro e i a taxa de inflação para investimento do capital a ser gasto.

O custo total do sistema de aquecimento solar (C_s) é considerado como sendo a soma dos custos que variam com a área do coletor (C_d) e o os custos independente da mesma (C_i). Os custos principais do sistema são: equipamento, instalação, manutenção e energia auxiliar. Assim, o custo total (C_T) (equação 52) gasto ao longo da vida para aplicação do sistema é dado pela soma dos custos com a energia solar dependentes e independentes da área mais a energia auxiliar para completar a necessidade de água quente,

$$C_T = C_d A_C + C_i + C_{AUX} \quad (52)$$

O custo inicial para instalar um sistema de aquecimento solar deve incluir o custo presente dos equipamentos, custo com transporte, mão de obra para instalação, custos com suportes e ou modificações que sejam requeridas para a sua instalação. O custo inicial do equipamento leva em consideração o coletor solar, reservatório térmico, encanamento que suporte altas temperaturas, no caso de coletores com cobertura, e em alguns casos, sistemas de controle.

O consumo com a energia auxiliar é complementar a energia solar, que varia de acordo com a fração solar ao longo do ano. O custo com a energia auxiliar total, C_{AUX} (equação 53) é definido como o produto entre a integral da energia auxiliar (L_{AUX}) utilizada ao longo do ano pelo custo unitário (C_{EA}) da mesma. A demanda de energia auxiliar utilizada é definida como função da fração solar, pois o que não é suprido pela energia solar, deve ser suprido pela energia elétrica, como demonstrado pela equação:

$$C_{AUX} = C_{EA} \int_0^t L_{AUX} dt = C_{EA} \int_0^t L(1-f) dt \quad (53)$$

Os custos dependente da área do coletor solar são os relativos ao próprio equipamento, sendo eles o coletor solar e o reservatório térmico, estes geralmente pagos no momento da instalação do sistema. Os custos independente da área do coletor são referentes principalmente à sua manutenção (C_M), instalação e encanamento de cobre ou de Policloreto de Vinila Clorado (CPVC) ou Polipropileno Copolímero (PPR), utilizados nos sistemas de

simples e dupla cobertura. Os custos devido aos dois últimos são pagos como valor presente e a manutenção é paga ao longo de sua vida útil, e dessa forma deve-se fazer a correção para o valor presente. Além disso, os custos gastos com a energia auxiliar, quando utilizados, são pagos apenas quando usada e assim, a inflação e a taxa de desconto do valor gasto ao longo de sua utilização devem ser levados em consideração. O custo total do sistema devido a energia solar em seu valor presente pode ser resumida pela equação 54, relativo a sua análise econômica a longo prazo.

$$C_T = Cd A_C + Ci + \sum_{j=1}^v \frac{C_M (1+i)^{j-1}}{(1+d)^j} + \sum_{j=1}^v \frac{C_{AUX} (1+i)^{j-1}}{(1+d)^j} \quad (54)$$

6 - Otimização

O procedimento de otimização é direcionado para o estudo de problemas com o intuito de minimizar ou maximizar uma função, a partir da variação de parâmetros. Assim, a solução do problema será o conjunto de parâmetros que tornam a função mínima ou máxima, em uma determinada região de busca. As funções à serem otimizadas podem ser lineares ou não lineares, univariáveis ou multivariáveis e restritas ou irrestritas. No caso deste estudo, a otimização econômica de um sistema doméstico de aquecimento solar de água tem como objetivo buscar o menor custo anualizado do sistema, em função de uma área ótima de aplicação.

Na maioria dos casos de otimização, os problemas a serem resolvidos são funções complexas que dependem de inúmeras ferramentas computacionais criadas com o intuito de resolvê-los. Inicialmente utilizava-se os softwares criados em BASIC, FORTRAN, PASCAL ou C. As ferramentas computacionais como Matlab, Octave, Scilab, Maple, Statistica entre outros, possuem em suas bibliotecas completas ferramentas de otimização, facilitando a sua utilização.

6.1 - Otimização Univariável

Para buscar a área otimizada com menor custo total para sistemas de aquecimento solar a partir dos métodos simples, ou seja, para os procedimentos nos quais era dimensionado apenas o uso de um coletor, com ou sem cobertura, foi necessário utilizar uma ferramenta de otimização univariável, logo a área do coletor era a variável a ser minimizada e o custo total do sistema a função a ser otimizada.

Assim, foi utilizado um pacote de otimização já implementado nas plataformas Gnu-

Octave/Matlab, conhecido como fmin, cuja ferramenta tem como objetivo resolver problemas de otimização não linear, com restrições e univariável. Este procedimento busca o mínimo local da função dentro do limite definido pelo usuário sendo composto por uma função objetivo não linear e sujeito a restrições lineares e não-lineares. Esse pacote não se baseia em derivadas, em vez disso, busca uma seção áurea e uma interpolação parabólica, e assim, é possível garantir a convergência e resolver de forma mais rápida (sintaxe apresentada no Anexo A). Nos métodos da energia útil a área era apenas utilizada na equação 1, para obter a fração solar que determina o custo da energia auxiliar pela equação 53. Dessa forma, foi possível otimizar a equação 54, apenas em função da área total do sistema.

Entretanto, para o método ϕ , f -Chart foi necessário obter os parâmetros adimensionais das equações 25, 26 e 27 em função da área. A equação 24, a fração solar é convertida também em função da área, como apresentado nas equações 55-58, bem como seus parâmetros adimensionais em função da área.

$$\bar{\phi}_{max} Y = (\bar{\phi}_{max} Y)' A_C = \bar{\phi}_{max} \frac{F_R(\tau\bar{\alpha}) N \bar{H}_t}{L} A_C \quad (55)$$

$$X' = (X')' A_C = \frac{(F_R U_L)(100) \Delta t}{L} A_C \quad (56)$$

$$R_s = R_s' A_C = \frac{350}{Mc_p} \cdot A_C \quad (57)$$

$$f = (\bar{\phi}_{max} Y)' A_C - 0,015 [\exp(3,85 f) - 1] [1 - \exp(-0,15 (X')' A_C)] (R_s' A_C)^{0,76} \quad (58)$$

Assim, para os sistemas simples deve-se minimizar a área total do sistema de acordo com a equação do custo total a ser otimizada que é função da fração solar calculada para cada método:

$$C_T = C_d A_c + C_i + \sum_{j=1}^v \frac{C_M (i+1)^{j-1}}{(1+d)^j} + \sum_{j=1}^v \frac{C_{EA} (1-f) L (i+1)^{j-1}}{(1+d)^j} \quad (59)$$

Os custos do sistema de aquecimento solar de água residencial é apenas função da área, como apresentado na equação 54, e da fração solar, que como apresentado na equação 58 também foi reduzido a uma função da área. Assim, foi possível implementar a função custo apenas em função da área.

6.2 - Otimização Multivariável

Para o estudo do método da energia útil dinâmico com sistema acoplado foi necessário utilizar uma ferramenta de otimização multivariável, já que o objetivo era buscar a área total otimizada, ou seja, a área ótima para os coletores com e sem cobertura, para um menor custo total dos sistemas de aquecimento solar.

Então, foi utilizado um pacote de otimização para utilização no Gnu-Octave, conhecido como `fminsearchbnd`. Tal ferramenta é também composta por uma função objetivo não linear e busca o mínimo de uma função multivariável, com restrições, utilizando o Método Nelder–Mead, que se baseia no estudo de uma forma geométrica com $n+1$ vértices para um problema de n -dimensões e sua sintaxe é apresentada no Anexo A.

Assim, para o sistema acoplado, deve-se calcular a fração do sistema pela equação 49 e então, deve-se otimizar a área total do sistema (A_T) e a razão entre as áreas dos coletores (x) segundo a função custo que deve ser minimizada:

$$C_T = C_{d,cs} A_T x + C_{d,cc} A_T (1-x) + C_i + \sum_{j=1}^v \frac{C_M (i+1)^{j-1}}{(1+d)^j} + \sum_{j=1}^v \frac{C_{EA} (1-f) L (i+1)^{j-1}}{(1+d)^j} \quad (60)$$

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

Para as metodologias propostas foi necessário definir os parâmetros utilizados para avaliar a relação custo-benefício nos diversos casos. Admitiu-se que o sistema foi instalado na cidade de Bauru, localizada a uma latitude de 22,32°S e longitude 49,06°W. Considerando a inclinação sugerida, de aproximadamente mais 10° em relação a latitude, entende-se que o coletor deveria operar com uma inclinação de $\beta=32,32^\circ$, com face voltada para o equador (Norte).

As temperaturas de operação foram estabelecidas considerando que a cidade de Bauru não apresenta temperaturas médias ambiente relativamente baixas, como observado na Tab. 7. No trabalho foi adotada a temperatura mínima de água quente de 30°C como referência para utilização no método ϕ, f -Chart e uma temperatura de demanda de água quente de 60°C para todas as metodologias.

A partir do site do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) sobre o potencial energético solar (2013), foi possível obter os valores das radiações médias mensais diárias, sobre uma superfície horizontal. No site é disponibilizado um programa que se destina à obtenção da irradiação para qualquer ponto do território nacional, a partir de sua localização (latitude e longitude).

Tabela 7: Temperatura média ambiental da cidade de Bauru

Mês	Temperatura Média [°C]
Janeiro	24,3
Fevereiro	25
março	24,6
abril	23,2
maio	19,7
junho	19,3
julho	19,3
agosto	21
setembro	22,3
outubro	23,2
novembro	23,9
dezembro	24,5

O SunData é relacionado ao banco de dados *Valores Medios de Irradiacion Solar Sobre Suelo Horizontal* do Centro de Pesquisa de Energia Solar (CENSOLAR, 2013), que possui cerca de 350 valores de irradiação solar diária média mensal sobre um plano horizontal para o Brasil. A partir desses dados, o sistema estima os valores de irradiações para uma determinada localização a partir das suas coordenadas geográficas, interpolando os dados de irradiações mais próximas. Com este processo é possível obter os valores da irradiação solar, em kWh/m².dia no plano horizontal, correspondentes às médias mensais diárias para os 12 meses do ano. Os dados das radiações diárias médias mensais obtidas por este procedimento para cidade de Bauru estão apresentadas na Tab. 8.

A demanda de água quente é outro parâmetro fundamental a ser estabelecido para o projeto. De acordo com a ABNT 5626 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, da qual foi retirada a Tab. 9, a vazão média para um chuveiro ou ducha é de aproximadamente 12 litros/minuto. Considerando um tempo médio diário de banho de 10 minutos por pessoa, estimado pela Norma Brasileira, NBR 15569, tem-se que um indivíduo consome uma média de 120 litros de água quente por dia.

Considerando o censo de 2010, o número médio de moradores por domicílio era de 3,3, a demanda total média residencial do país foi aproximada neste trabalho por 400 litros de água quente por residência. Para essa demanda de água quente foi definido um reservatório térmico que supra tal necessidade.

Segundo Liu e Jordan (1963), para a refletividade pode ser adotado, para maioria dos meses, o valor padrão de $\rho=0,2$ e caso na cidade haja a presença de neve, esse valor deverá ser maior apenas nos meses de inverno. Como o local de estudo está em uma região tropical, foi adotado para refletância o valor de 0,2 para todo o ano.

Tabela 8: Dados das radiações diárias médias mensais para cidade de Bauru

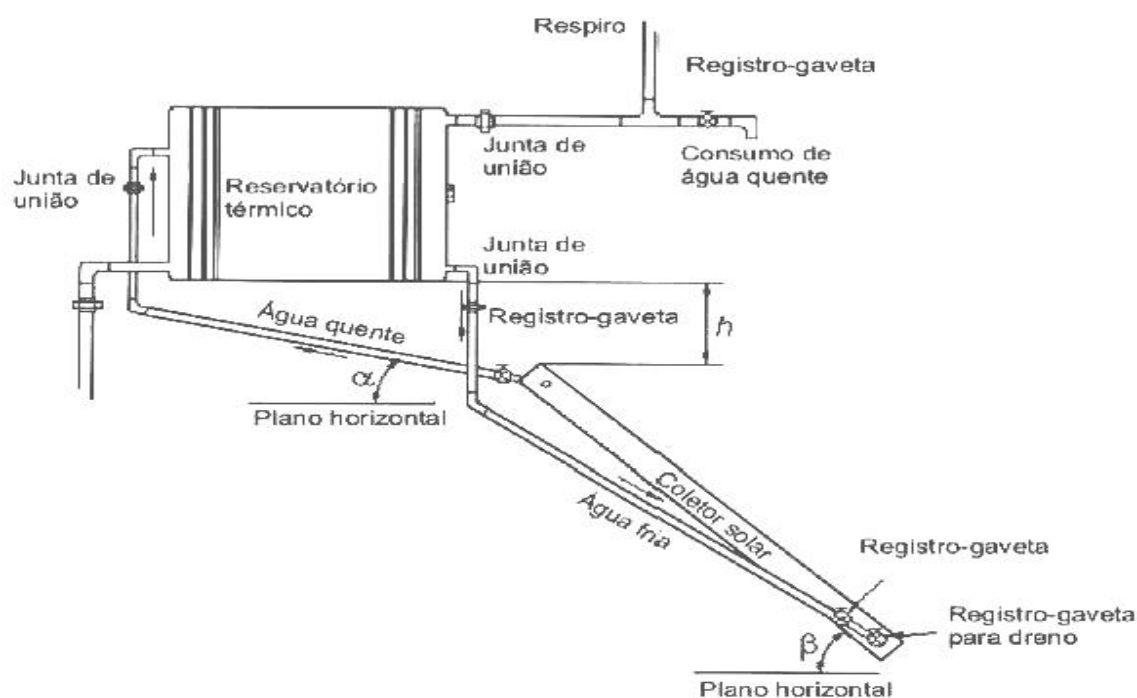
Mês	\bar{H} [MJ/m ²]
Janeiro	21,492
Fevereiro	19,584
Março	19,512
Abril	16,992
Mai	15,3
Junho	13,284
Julho	15,3
Agosto	16,596
Setembro	16,812
Outubro	20,484
Novembro	21,492

Tabela 9: Dados informativos sobre aparelhos sanitários

Aparelho sanitário	Peça de utilização	Vazão mínima de projeto (L/min)
Banheira	Misturador	18
Bidê	Misturador	6
Chuveiro ou ducha	Misturador	12
Lavadora de pratos ou roupas	Registro de pressão	18
Lavatório	Torneira ou misturador	9
Pia	Torneira ou misturador	15

Fonte: ABNT 5626

Em relação ao custo, foi necessário definir alguns parâmetros de instalação do sistema, e estes devem estar de acordo com a NBR 7198, Projeto e execução de instalações prediais de água quente e a NBR 15569, Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e instalação. Levando em conta que a circulação da água se dá devido ao efeito termossifão, o sistema deve ser instalado conforme a Fig. 20. Nesta figura h é a altura mínima entre a parte superior do coletor e a parte inferior do reservatório térmico e α o ângulo de inclinação da tubulação de retorno em relação ao plano horizontal. Estes são valores de referência indicados mas, segundo a NBR 15569, esses parâmetros devem seguir a especificação do fabricante.



Fonte: ABNT 15569

Figura 20: Esquema de instalação de um circuito de aquecimento solar por termossifão

Tabela 10: Quantidades e preços dos equipamento hidráulicos considerados para o presente projeto

Material	CPVC		
Equipamento	Custo/unidade	Quantidade	Custo total
Tubo Diâmetro 22mm	R\$ 29,45	8	R\$ 235,60
Cotovelo	R\$ 3,65	9	R\$ 32,85
Conector	R\$ 18,70	5	R\$ 93,50
"Te"	R\$ 3,80	1	R\$ 3,80
Luva	R\$ 1,95	2	R\$ 3,90
Custo Total	-	-	R\$ 369,65

sendo, a unidade de tubulação de 3 m de comprimento.

Com base em alguns manuais de instalações de diferentes fabricantes de coletores solares foi possível observar que h deve estar entre 20 cm e 5 m. E a inclinação α da tubulação deve ser superior a 2% da relação entre a distância horizontal pela vertical do coletor ao reservatório para que a água possa circular naturalmente.

Além disso, é indicado pela norma NBR 15569 que nas tubulações onde escoar água quente sejam evitados sifões ou embarrigamentos de maneira a prevenir o acúmulo de bolhas e a consequente estagnação do fluido.

Assim, respeitando as Normas mencionadas e com base na Fig. 20, foram estimados alguns parâmetros de instalação como apresentados na Tab. 10, com seus respectivos preços. Os preços dos equipamentos hidráulicos foram obtidos pela média de alguns sites de fabricantes que estavam disponíveis para a cidade de Bauru durante a realização da pesquisa. Além disso, foi consultado o mercado local para custos da instalação do sistema, assim foi considerado um custo com mão de obra de instalação de R\$ 400,00. Os custos independentes da área para um sistema de aquecimento residencial de coletores com simples e sem cobertura são apresentados na Tab. 12, sendo também valores de sistemas disponíveis para a cidade de Bauru.

De acordo com a metodologia descrita e com os parâmetros estabelecidos foi possível desenvolver uma rotina no GNU-Octave, para a análise dos diferentes métodos de dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de água residencial.

Tabela 11: Dados característicos dos coletores

Coletor	Material	$F_R(\tau\alpha)_n$	$F_R U_L$ [W/m ² °C]	Custo/m ²	Vida útil
Simple Cobertura	Alumínio	0,709	6,443	R\$ 237,50	20
Sem Cobertura	Polipropileno	0,91	22,57	R\$ 86,25	10

Tabela 12: Custos independentes da área para sistemas de coletores com simples e sem cobertura de vidro

Tipo de coletor	Tubulação (cpvc) para altas temperaturas *	Chuveiro	Reservatório Térmico Baixa Pressão	Total Custos independentes da área
Simple cobertura	R\$ 400,00	R\$ 145,00	R\$ 1.425,00	R\$ 2.370,00
Sem cobertura	-	R\$ 145,00	R\$ 1.425,00	R\$ 1.970,00

*O valor com os equipamentos hidráulicos foi arredondado, para a implementação e otimização do sistema.

Os dados característicos de coletores solares para banho e piscina foram retirados do site do Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia (INMETRO, 2013). Foi selecionado um fabricante e segundo pesquisa com o fornecedor local foram definidos os preços de cada por unidade de área. Esses dados estão presentes na Tab. 11.

Para a análise dos custos do sistema foram adotados uma taxa de juros anual médio de 10% e uma taxa de inflação monetária ao longo dos anos de 7% ao ano, baseados nos dados vigentes durante a realização da pesquisa. Para a energia auxiliar foi considerado um custo médio de R\$0,3175/kWh para uma residência de baixo consumo.

A Tabela 13, por sua vez, apresenta os dados de demanda estabelecidos para o presente trabalho. Inicialmente foi feita uma análise comparativa entre os métodos, e dessa forma, foi obtido a Fig. 21, na qual é representada a variação da fração solar ao longo de um ano. Para os sistemas simples, ou seja, composto apenas por coletor com cobertura, foi adotada uma área de 6 m². Tal área foi adotada a fim de obter valores de fração solar possível de comparação, ou seja, que não apresentasse valores maiores que 1.

O comportamento da fração solar ao longo de um ano típico é semelhante em todos os métodos estudados. É possível notar que o modelo dinâmico simples apresentou os maiores valores de fração solar. Em seguida o ϕ, f -Chart e por fim o método estático.

Na Figura 21 observa-se que o método dinâmico apresentou os maiores dados de radiações, já que o mesmo considera todas as radiações disponíveis úteis e além disso, considera a variação da temperatura ao longo do dia, resultando em uma maior energia útil e assim, maior fração solar. Já o método estático apresenta fração inferior, pois considera a temperatura de entrada no coletor fixa, sem variação ao longo do dia. Ao se considerar a temperatura de entrada no coletor constante ao longo do dia, como é o caso do método estático, tem-se que as perdas de calor para o ambiente são constantes, independente da energia absorvida.

Tabela 13: Dados de demanda do sistema estudado

Demanda de Água Quente	Volume do Reservatório Térmico	Ângulo de inclinação do Coletor	Temperatura Mínima de demanda	Temperatura de demanda
400 L	400 L	30°	30°C	60°C

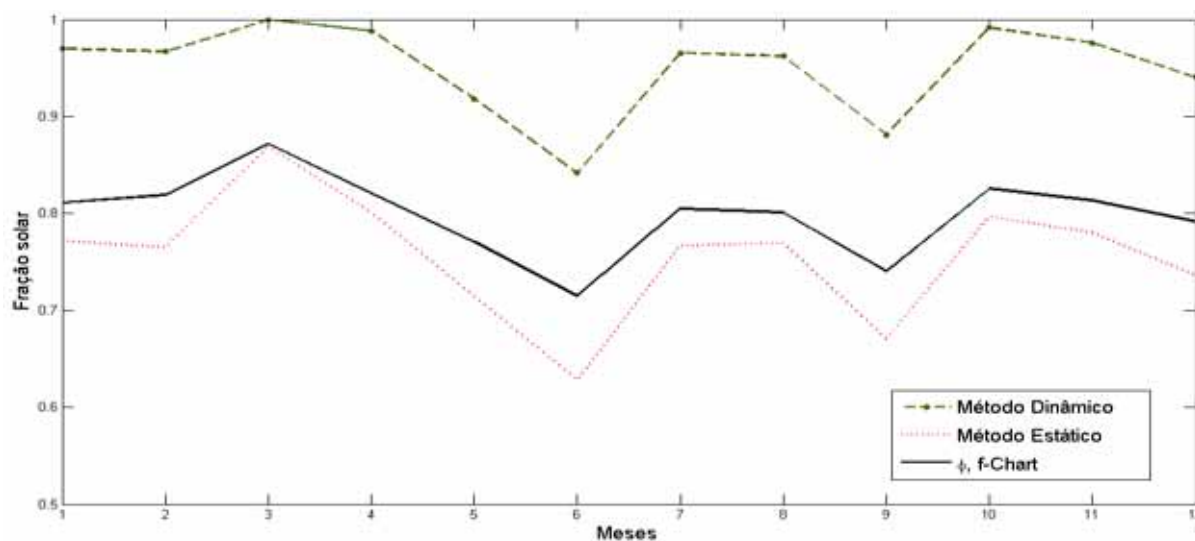


Figura 21: Variação da fração solar ao longo de um ano, para os diferentes métodos estudados

Para o início do dia, quando as energias absorvidas são menores e a temperatura de entrada já é alta, as perdas são altas e dessa forma a energia útil é menor. Já no caso do sistema dinâmico, no qual a temperatura de mistura varia segundo a energia absorvida, as perdas aumentam com o aumento da temperatura da água aquecida. Assim, a energia acumulada para o sistema dinâmico será maior, devido a maior energia útil no início do dia em relação ao sistema estático proporcionando uma maior fração solar.

Já para o caso do ϕ, f -Chart como o método considera útil apenas as radiações acima da crítica, definida pela temperatura mínima de demanda, o sistema apresentará uma radiação disponível sobre ele menor, já que as outras metodologias consideram toda a radiação utilizável, ocasionando uma fração solar menor para o ϕ, f -Chart.

Ao comparar o comportamento dos métodos e considerando que o estudo para sistema acoplado baseado no método ϕ, f -Chart não foi possível, já que suas equações foram definidas empiricamente. Um estudo comparativo entre o sistema acoplado e o simples foi feito a partir do estudo dinâmico da temperatura por Hottel e Whillier (1958).

1 - Comparação entre os sistemas dinâmicos acoplado e simples

Para a análise dos sistemas dinâmicos foram escolhidos para comparação os meses de dezembro e Junho, pois são os meses que apresentam maiores e menores horas de sol e maior e menor temperatura ambiente, respectivamente. Estes ainda são os meses com maiores e menores temperaturas ambientes, respectivamente. Portanto, foi necessário, a partir da radiação média mensal diária, a reconstituição da irradiação média mensal horária, e além disso, foi possível verificar a contribuição das radiações diretas, difusas e refletivas.

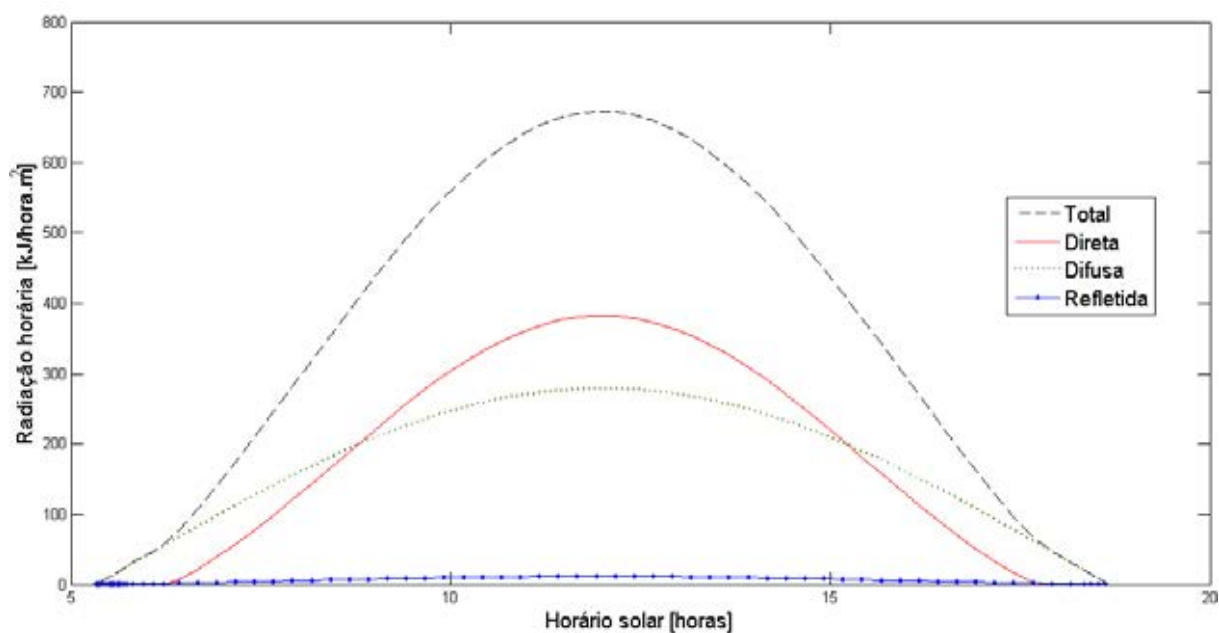


Figura 22: Decomposição da radiação horária para o dia típico de dezembro

Para isso foi utilizado um ângulo de inclinação de coletor conforme o indicado para a otimização dos meses de inverno, ou seja, para um ângulo igual a $32,32^\circ$. Como apresentadas nas Fig. 22 e 23.

O comportamento das radiações ao longo dos dias típicos são semelhantes, independente do mês e da natureza das radiações. As irradiações em dezembro são mais distribuídas ao longo do dia, já que apresenta mais horas de sol, e seu valor máximo de radiação total é próximo a 700 kJ/m^2 .

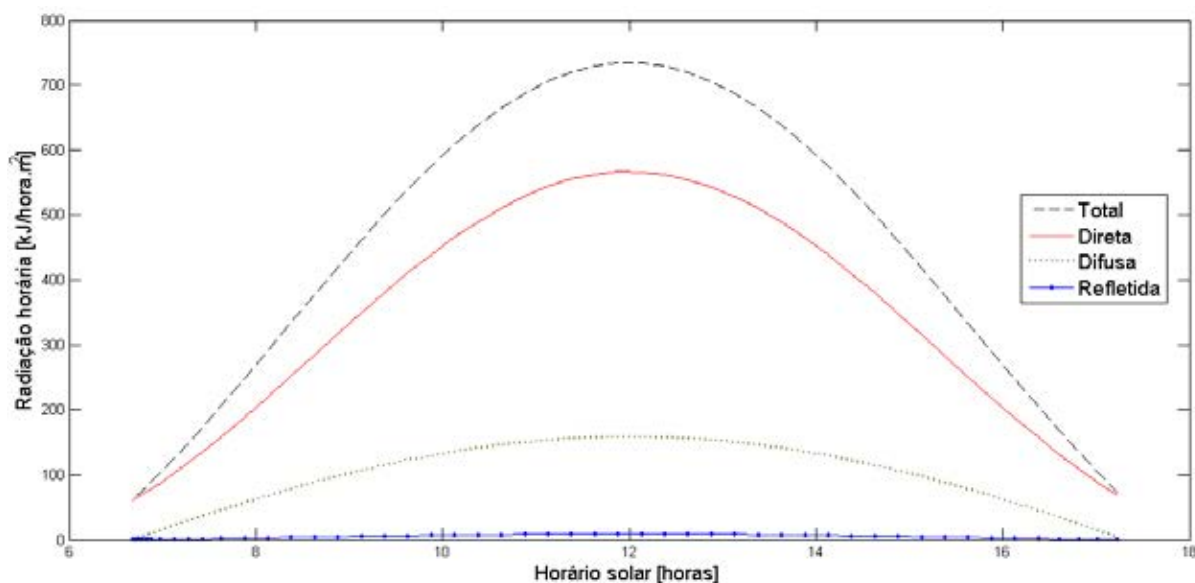


Figura 23: Decomposição da radiação horária para o dia típico de Junho

Já para o mês de junho as curvas de irradiações são mais achatadas, com valor máximo próximo a 750 kJ/m^2 . Para o mês de dezembro, a radiação total possui maiores contribuições das radiações diretas e difusas, sendo a direta com maior participação nos horários perto ao meio dia, e no início e no final do dia a maior contribuição é devido a radiação difusa. Já para o mês de junho a maior contribuição é dada pela radiação direta em todo o dia e uma parcela da radiação difusa. Para os dois meses a participação da irradiação refletida é muito insignificante, já que o índice de refletividade local é muito baixo.

Como foi considerado a radiação diária média mensal, para a reconstituição horária, verifica-se que os menores níveis de radiação para o mês de dezembro ocorre porque há nessa época do ano maiores ocorrências de chuvas e assim, uma maior nebulosidade, resultando em uma parcela menor de radiação direta e uma maior da radiação difusa. O contrário ocorre com o mês de junho, quando as chuvas são mais escassas e assim, uma menor incidência de nuvens, ocasionando em uma maior radiação direta e menor participação da radiação difusa. Com isso, como as radiações diretas são mais significativas em junho, a radiação horária alcança valores maiores do que em dezembro.

Além disso, deve-se lembrar que a utilização do valor do ângulo igual ao valor absoluto da latitude mais 10° implica numa otimização para melhorar a captação de energia no inverno. Este fato ajuda a explicar o porquê das irradiações horárias sobre a superfície do coletor para o mês de junho serem maiores, mesmo com a radiação diária média mensal sobre uma superfície horizontal menor que no mês de dezembro.

Com os dados de radiações ao longo dos dias típicos, foi possível obter a variação da temperatura de mistura na entrada no coletor ao longo do dia, como apresentado nas Fig. 24 e 25.

Para a análise e comparação dos dois sistemas foi adotada a mesma área total de 6 m^2 , porém para o sistema acoplado foi considerado 50% da área para cada coletor, ou seja, 3 m^2 de coletor com e sem cobertura, já para o sistema simples toda a área foi composta por coletores com simples cobertura. E além disso, um valor adotado de razão volumétrica para o sistema acoplado de $\gamma=0,5$. Esses valores foram escolhidos para se obter valores significativos para que fosse possível a comparação entre os sistemas, e que fossem condizentes com os valores utilizados na prática.

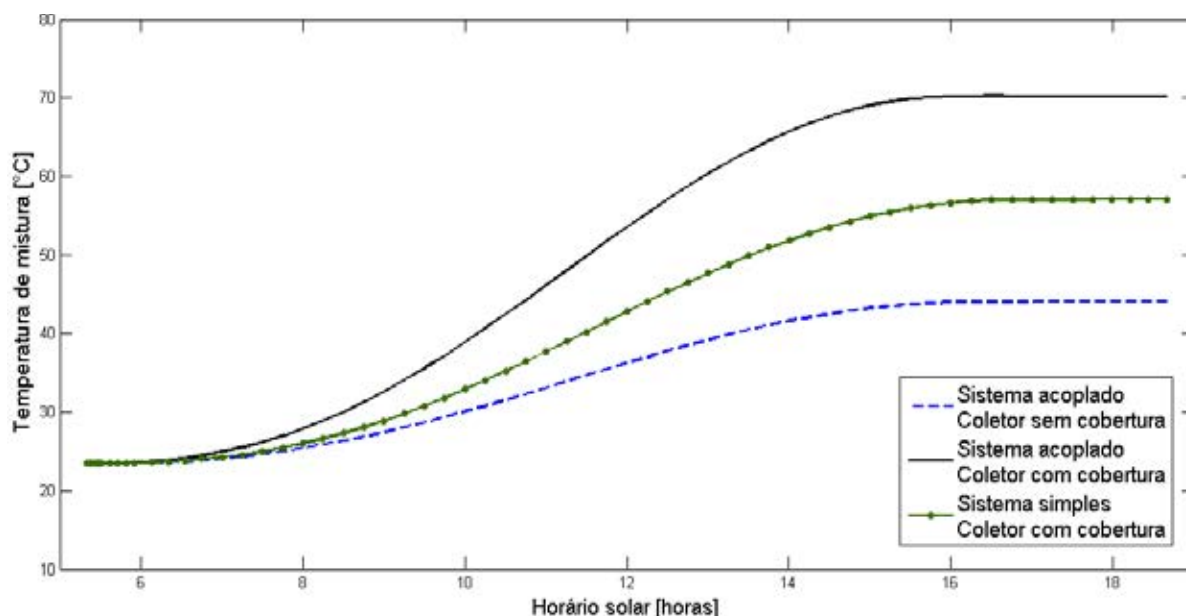


Figura 24: Variação da temperatura de mistura para os sistemas simples e acoplado, para o dia típico de dezembro

A variação da temperatura ao longo dos dias típicos dos dois meses analisados tiveram um comportamento similar, iniciando o dia a temperatura de água fria, e a medida que a energia útil fosse absorvida a temperatura elevou-se até se estabilizar ao final do dia. Isso ocorre devido ao fato que, ao final do dia, as perdas se tornam maiores que os ganhos de energia, já que quanto mais elevadas as temperaturas da água quente, maiores serão as perdas por convecção para o meio ambiente. Assim, a energia útil pelo sistema no período do final do dia é nula, como pode ser observado pelos gráficos de energia.

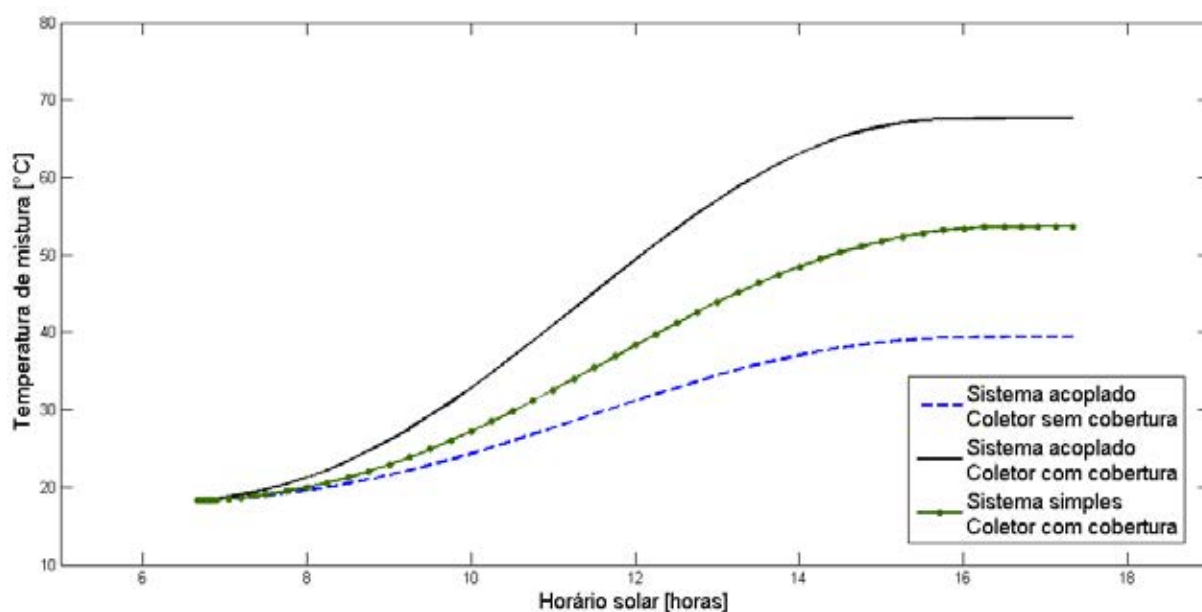


Figura 25: Variação da temperatura de mistura para os sistemas simples e acoplado, durante o dia típico de junho

O sistema acoplado apresentou resultados interessantes, já que ao utilizar o coletor sem cobertura para pré aquecimento da água, o com cobertura operava com maiores temperaturas. Dessa forma, as temperaturas de saída também se mostraram superiores ao sistema que operava exclusivamente com coletores de cobertura simples.

Segundo o observado nas simulações, no mês de dezembro a temperatura do reservatório encontrava-se, inicialmente, em 23°C e alcançou ao final do dia 70°C no sistema acoplado devido ao pré aquecimento da água a 44°C pelo coletor sem cobertura enquanto para o sistema simples a temperatura máxima atingida foi de 57°C .

Para o mês de junho, a temperatura no início do dia foi de 19°C e ao final do dia para o sistema acoplado foi de 68°C atingindo tal valor pela pré elevação da temperatura a 40°C pelo coletor sem cobertura e para o sistema simples a temperatura máxima atingida foi de 52°C . Como a variação de temperatura entre o início e o final do dia nos dois meses considerados foram muito próximos não se espera grandes diferenças na energia útil absorvida pelos sistemas ao longo dos dias.

Além disso, a temperatura alcançada pelo sistema acoplado ao final do dia para os dois meses foi superior à temperatura de demanda de água quente, já para o sistema simples essa temperatura não foi atingida em nenhum dos meses analisados. Dessa forma, pode-se perceber que a influência sobre a temperatura disponível no sistema é muito afetada pelo uso do acoplamento dos coletores.

A partir da variação da temperatura ao longo do dia, obteve-se as energias úteis horárias observadas nas Fig. 26 e 27, coletadas pelos sistemas acoplado e simples, para os meses de dezembro e junho, respectivamente.

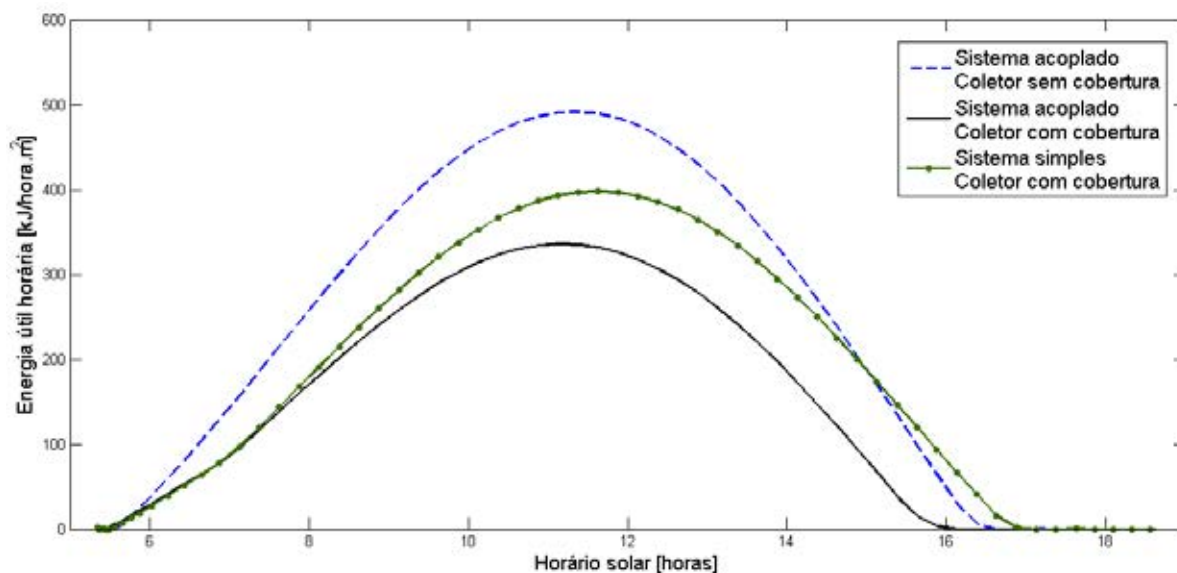


Figura 26: Energias úteis horária para os sistemas acoplado e simples para o dia típico de dezembro

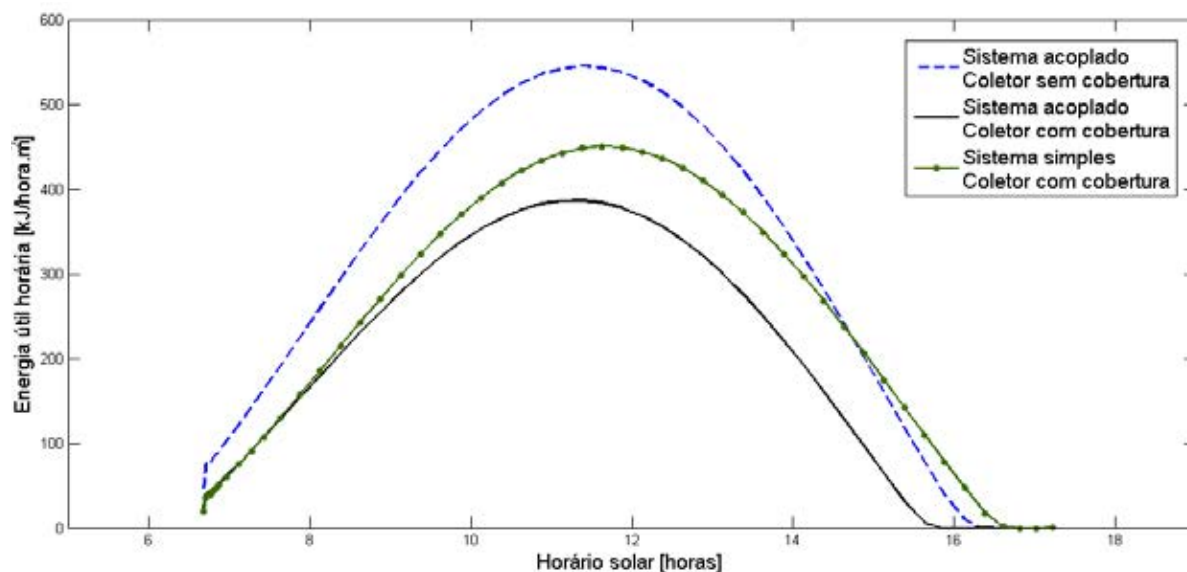


Figura 27: Energias úteis horária para os sistemas acoplado e simples para o dia típico de junho

O mesmo comportamento das energias úteis horárias foram verificadas para os dois meses. Entretanto, em dezembro, a energia útil é melhor distribuída ao longo de sua maior quantidade de horas de sol e no mês de junho as curvas são menos distribuídas, com valores máximos maiores que em relação a dezembro. As energias úteis horárias por m^2 de área de coletor absorvidas pelos coletores com e sem cobertura no sistema acoplado foram maiores que a captada pelo sistema simples, tanto para dezembro quanto para junho.

O mês de junho apresenta radiação média mensal diária inferior à do mês de dezembro, pelas próprias características das estações do ano no Hemisfério Sul. Entretanto, nota-se ao se reconstituir a sua distribuição ao longo do dia típico que o pico de radiação absorvida no inverno (junho) é maior que o apresentado no verão (dezembro). Porém, para o dia típico de dezembro a quantidade de horas de sol é superior quase duas horas a mais de radiação solar. Dessa forma, a quantidade de energias acumuladas ao longo de todas horas de sol são próximas, como será observado nas Fig. 28 e 29.

De acordo com os resultados observa-se que no início do dia as perdas de calor são menores, já que as temperaturas são próximas a temperatura ambiente, porém as energias úteis também são pequenas, devido ao seu baixo nível de radiação. Próximo ao meio dia observam-se os maiores níveis de radiações e que resultam nas maiores energias úteis absorvidas pelo sistema. Já a partir do meio da tarde, o sistema atinge altas temperaturas de operação, e dessa forma, verifica-se que um incremento significativo dos níveis de perdas de calor por convecção para o meio ambiente reduz a sua captação de energia.

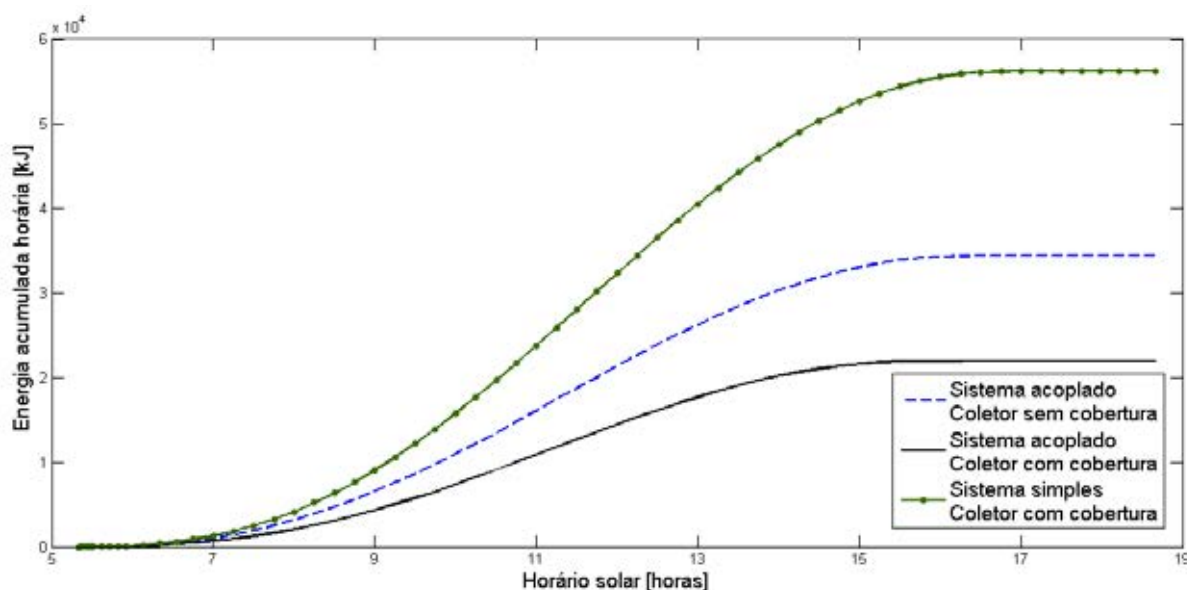


Figura 28: Energia acumulada ao longo do dia típico de dezembro para os sistemas acoplado e simples

Este processo atinge seu ápice no momento em que as perdas térmicas se igualam ou tornam-se maiores que os ganhos, impossibilitando a captação de energia útil por parte do sistema. Este ponto ocorre próximo das 16 horas, para os dois meses analisados e provocam a estabilização da temperatura ao final do dia.

Entretanto, os valores de energias acumuladas ao final dos dias são semelhantes, com ambos próximos de 60 MJ. Embora a energia capturada ao longo do dia seja similar, este valor implica em uma fração solar para o mês de junho muito menor do que em relação ao mês de dezembro, uma vez que a demanda de água quente para o mês mais frio é maior.

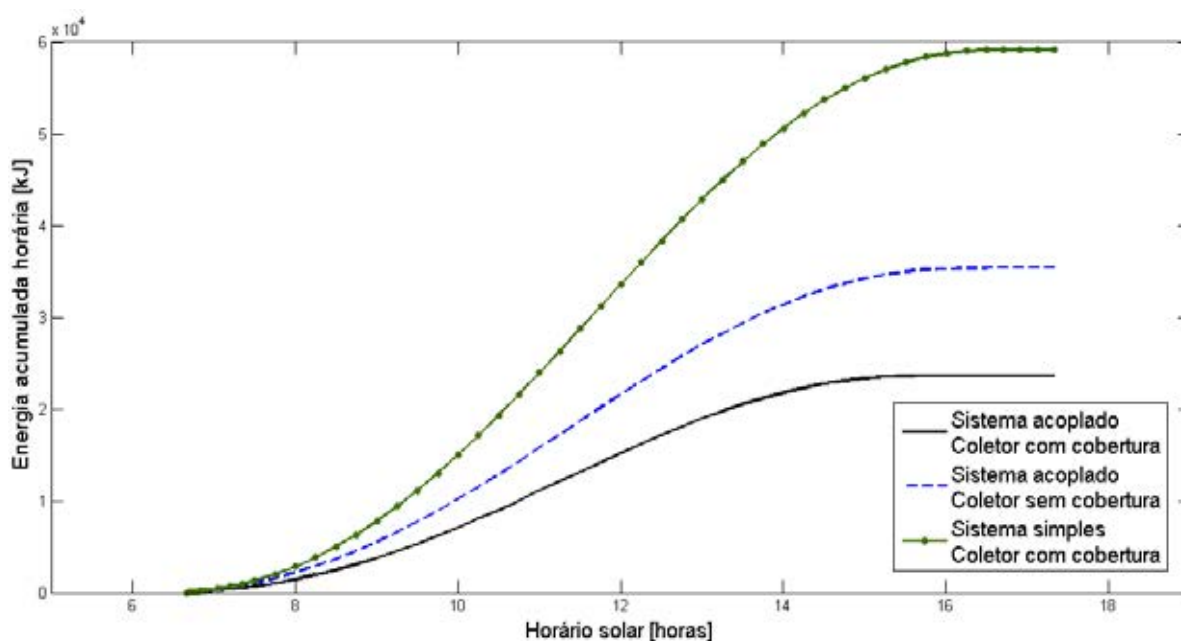


Figura 29: Energia acumulada ao longo do dia típico de junho para os sistemas acoplado e simples

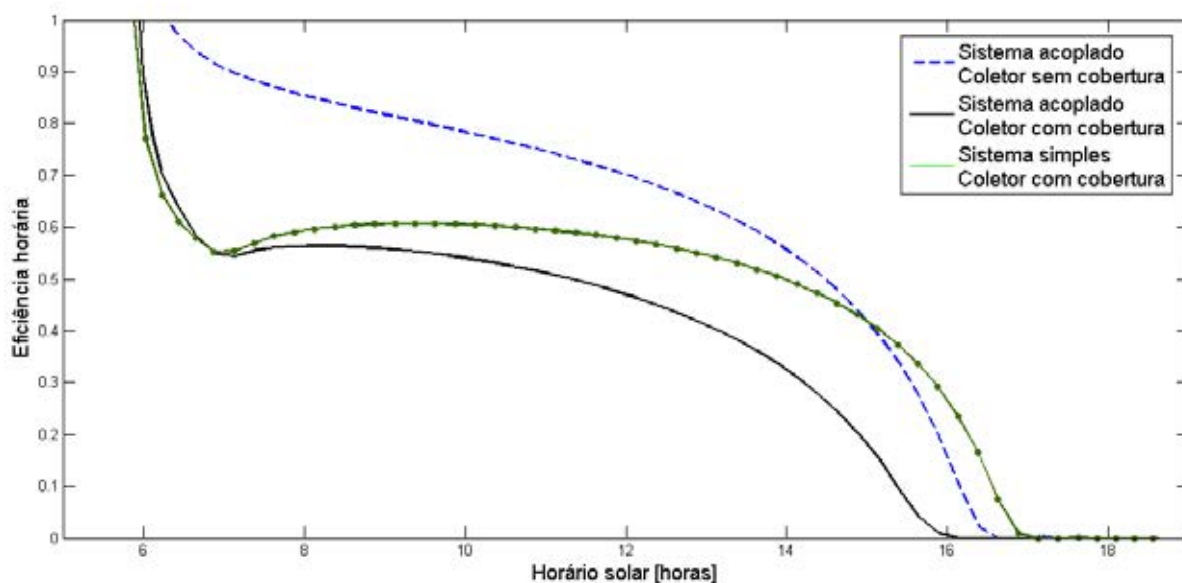


Figura 30: Eficiência horária para os sistemas simples e acoplados no dia típico de dezembro

Com os dados de energias úteis e das radiações horárias, é possível verificar as eficiências de cada coletor e cada sistema para cada dia analisado, pelas Fig. 30 e 31.

A eficiência horária é dada pela razão entre a energia útil e a radiação incidente sobre o coletor, por hora. As eficiências horárias apresentaram o mesmo comportamento para os meses analisados. Assim, no início do período de radiação solar não existe como mensurar a eficiência uma vez que a energia incidente é praticamente nula. Por conta desta característica as flutuações iniciais nos valores de eficiência foram omitidas destes gráficos. Porém, logo em seguida quando a radiação começa a se tornar significativa a energia útil captada passa ser superior a irradiação horária incidente, resultando em um valor de eficiência superior a um.

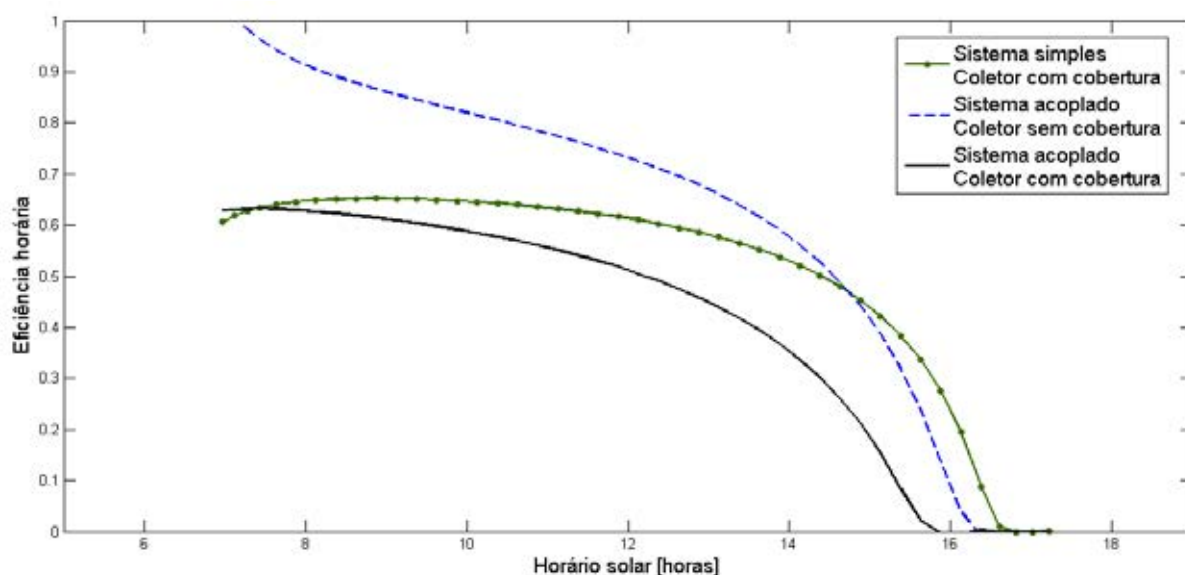


Figura 31: Eficiência horária para os sistemas simples e acoplados no dia típico de junho

Essa eficiência superior a um se deve ao fato que no início do dia a temperatura da água é inferior à ambiente e, nesta situação, o coletor deixa de perder energia para o meio e passa a recebê-la. A soma das parcelas de radiação e convecção faz com que com a eficiência atinja valores superiores a 1.

Os desempenhos dos coletores para os meses de dezembro e junho ficaram muito próximos entre si, já que se tratava dos mesmos coletores. Sendo assim, a parcela de energia útil absorvida da radiação disponível é muito similar, uma vez que seus fatores de absorção e perdas de calor são os mesmos e diferem apenas pelas condições de operação em cada caso.

O coletor sem cobertura apresentou eficiência superior ao com cobertura, uma vez que o mesmo não possui cobertura e não tem perdas por reflexão e nem alcança temperaturas elevadas. O sistema simples apresentou eficiências médias e energias úteis capturadas intermediárias entre as dos coletores do sistema acoplado.

Assim, a partir da análise térmica do sistema foi comparado para os dois sistemas a variação da fração solar ao longo de um ano, para as mesmas áreas consideradas para os dois meses analisados, como apresentado na Fig. 32. Observa-se o mesmo comportamento das frações solares quando analisados para os diferentes métodos, assim, maiores valores de frações solares para os meses mais quentes e frações solares inferiores para os meses mais frios. Os sistemas simples e acoplado apresentaram valores de frações solares muito próximos já que a energia armazenada ao final do dia apresentaram valores próximos.

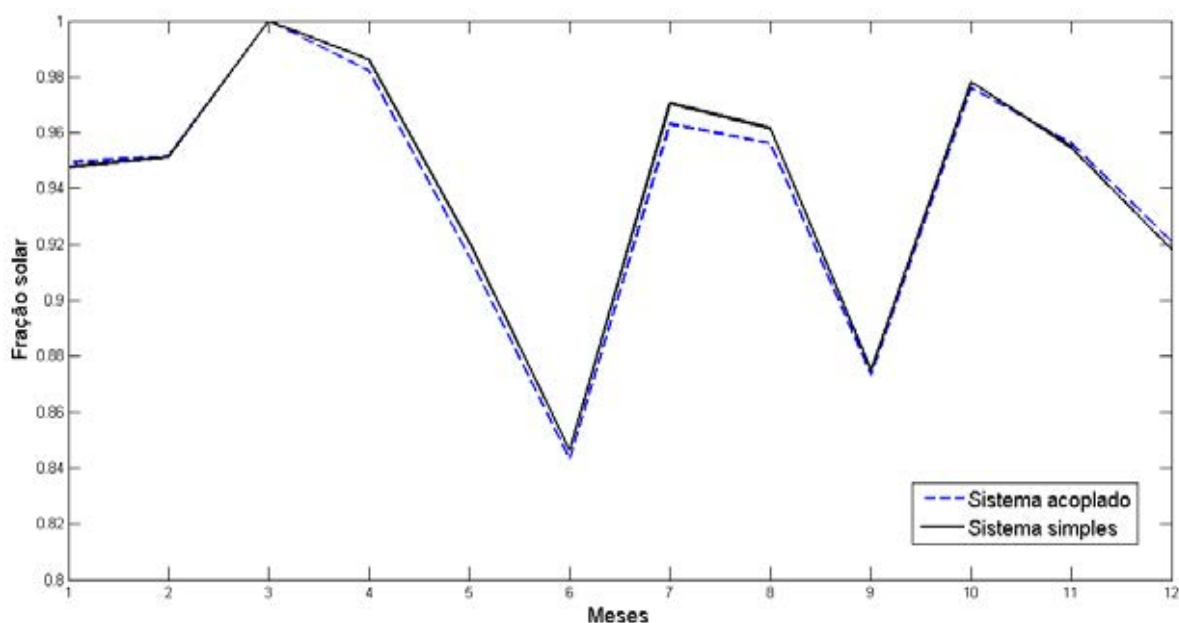


Figura 32: Variação da fração solar para os sistemas simples e acoplado ao longo de um ano

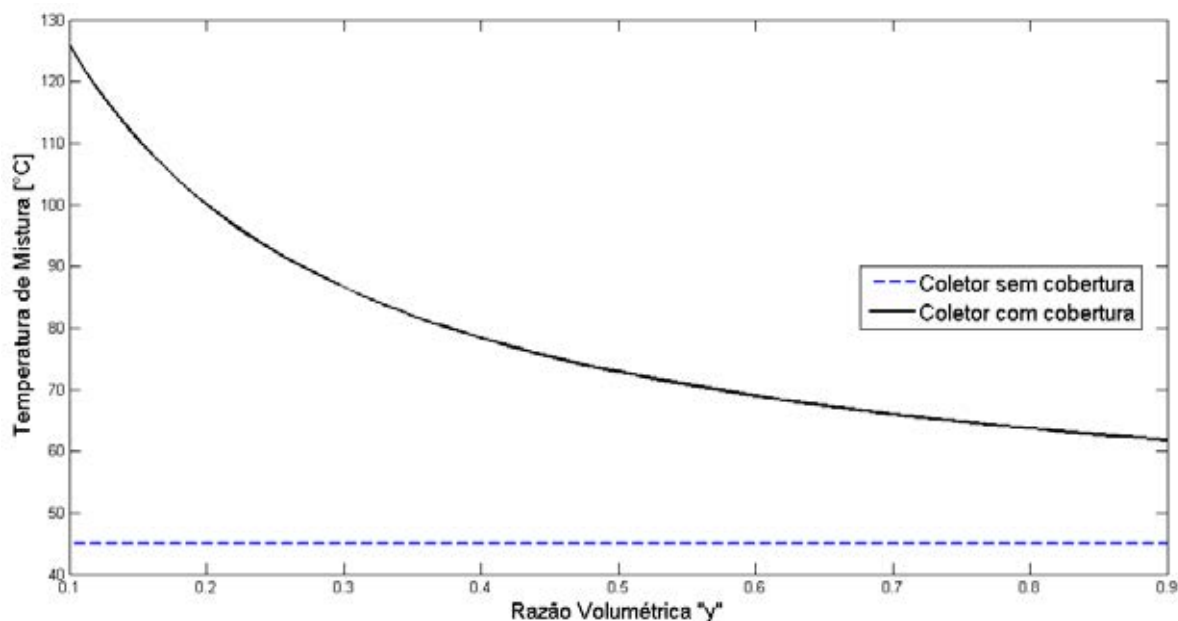


Figura 33: Variação da temperatura de mistura do reservatório térmico de acordo com a razão volumétrica y

Após analisar a validade dos resultados dos métodos dinâmicos, foi necessário observar a influência da razão volumétrica sobre o sistema acoplado. Primeiramente, pela Fig. 33 foi obtido a variação da temperatura de mistura para cada região do reservatório térmico. Como o coletor sem cobertura pré aquece toda a água do reservatório, este não apresenta alterações em sua temperatura de mistura com a variação de y . Já a proporção volumétrica em que o coletor com cobertura será responsável por elevar a temperatura da água sofre influência na variação de sua temperatura de mistura. Assim, observa-se que a temperatura decai exponencialmente com o aumento do volume em circulação no coletor. Porém, um outro fator que deve ser destacado é que com o aumento da temperatura de mistura, maiores serão as perdas para o ambiente e, conseqüentemente, uma menor energia útil é capturada.

A variação da fração solar anual média mensal de acordo com a razão volumétrica, é verificada pela Fig. 34. É possível verificar que com o aumento da fração y a demanda energética devido ao aquecimento solar aumenta, isso porque, como verificado pela Fig. 34 com a elevação de y a temperatura de mistura decresce, resultando em menores perdas de calor para o ambiente, e assim maior energia útil e uma maior fração solar, para uma mesma demanda.

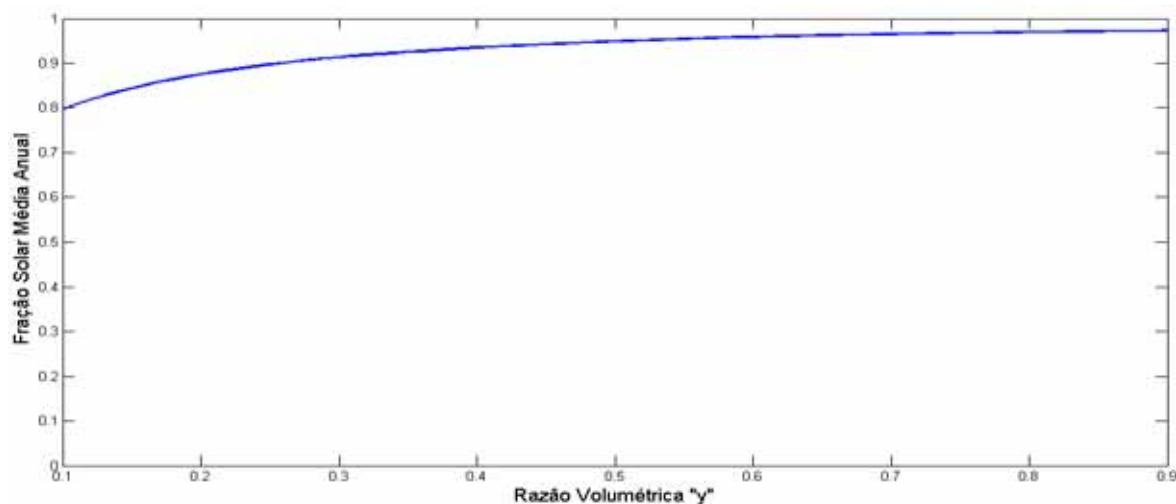


Figura 34: Variação da fração solar anual média mensal de acordo com a razão volumétrica y

2 - Otimização

A partir dos resultados apresentados, foi possível obter a variação do custo total do sistema ao longo da sua vida útil em função da área total do sistema. Dessa forma, para os sistemas simples foi analisado o custo total do sistema em função da área instalada como mostrado na Fig. 35. Deste comportamento é possível determinar que os valores otimizados para área de coletor para a demanda considerada estão entre 6 e 12 m². Além disso, é observado que a variação do custo pela área após obter os valores mínimos tendem a um valor final comum. Isso ocorre pois, os valores otimizados ocorrem quando as frações solares são próximas a 1, e quando elas se tornam 1 apenas o custo dependente da área influencia no custo total.

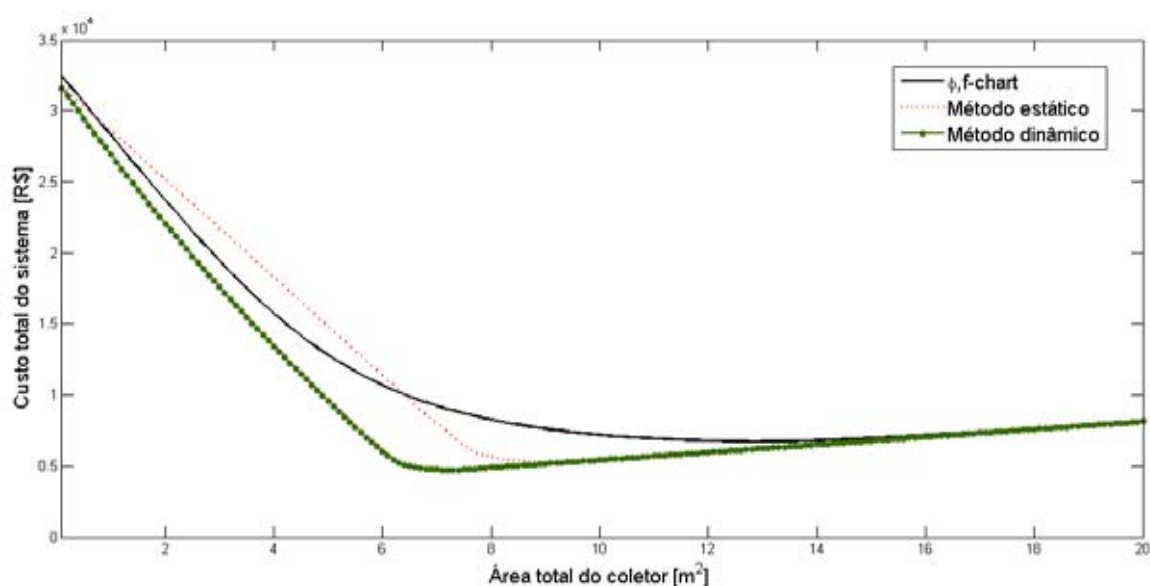


Figura 35: Variação do custo total dos sistemas simples para os métodos estudados em função da área total

Tabela 14: Valores otimizados para os sistemas simples para os diferentes métodos analisados

Método	Área otimizada	Custo total minimizado
ϕ, f -Chart	12,9081 m ²	R\$ 6717,50
Método estático	9,3556 m ²	R\$ 5242,20
Método dinâmico	7,3925 m ²	R\$ 4709,90

Com a ferramenta de otimização foi possível verificar o valor mínimo exato do custo total do sistema e assim, a área otimizada de coletor solar de simples cobertura. Tais valores, para os sistemas simples, para os métodos ϕ, f -Chart, método estático e dinâmico estão na Tab. 14.

O método dinâmico apresentou menor área otimizada e menor custo total, já que o método leva em consideração a variação da temperatura ao longo do dia e apresenta maiores energias úteis. O método estático apresentou uma área ótima e um custo intermediário, já que sua energia útil foi menor, pois utiliza a hipótese de temperatura de entrada no coletor constante durante todo o dia. Esta aproximação resulta em uma energia útil menor, pois no início do dia suas perdas são consideráveis devido à diferença de temperaturas entre a água e o ambiente. Usando hipóteses diferentes, o método dinâmico se utiliza de um método de avaliação da temperatura de entrada no coletor que no início do dia a favorece a absorção de energia, como verificado pela alta eficiência para as primeiras horas de sol. O ϕ, f -Chart apresentou maiores valores de área otimizada e de custo total, uma vez que essa metodologia considera apenas radiações acima da crítica como utilizáveis e reduz a parcela das irradiações sobre o coletor que é convertida em energia útil.

2.1 - Sistema acoplado

Após a análise térmica do sistema acoplado, foi necessário verificar sua viabilidade econômica em relação ao sistema simples. Para essa avaliação foi utilizado apenas o método dinâmico, que permitia a adaptação para este tipo dispositivo. Inicialmente foi verificada a influência de alguns fatores sobre os resultados.

O ângulo de inclinação do coletor nem sempre segue a norma sugerida como o valor absoluto da latitude mais 10°, para um maior aproveitamento das radiações nos períodos de baixas radiações. Por conta disto, além da inclinação sugerida outros três valores também foram analisados como mostrado na Tab. 15.

Tabela 15: Valores otimizados para o sistema acoplado para alguns ângulos de inclinação do coletor

Ângulo de inclinação	Área otimizada		Custo total minimizado
	Coletor sem cobertura	Coletor com cobertura	
32,32°	6,2734 m ²	1,6374 m ²	R\$ 4393,70
30°	6,2771 m ²	1,5822 m ²	R\$ 4.415,20
25°	6,3032 m ²	1,4957 m ²	R\$ 4.473,80
18°	6,4337 m ²	1,6187 m ²	R\$ 4.586,40

Foi verificada também a influência da razão volumétrica y nos sistemas otimizados, apresentado na Tab. 16. O valor de 0,5 apresentou a maior área de coletor com cobertura, porém uma menor área de coletor sem cobertura, resultando no menor custo total. A variação do custo entre as razões volumétricas não foram muito significativas, porém ao considerar a análise térmica das variações das razões volumétricas verifica-se que o sistema com 0,3 apresenta menor fração solar e maior temperatura de mistura, já o sistema com 0.7 apresenta maior fração solar e uma menor temperatura. Como o sistema com razão de 0,5 apresenta além do menor custo um maior equilíbrio entre a fração solar e a temperatura de mistura, apresentando valor superior a demanda. Desta forma, considerou-se que o sistema com razão volumétrica de 0,5 é o sistema que apresentou maior viabilidade.

Após a verificação dos parâmetros que influenciam os sistemas, foi possível obter o gráfico da variação do custo total do sistema acoplado ao longo de sua vida útil, para uma razão volumétrica de 0,5 e um ângulo de inclinação igual a 32,32°, como mostrado na Fig. 36.

Por fim, comparando os sistemas acoplados com os mesmos dados de entrada, para a mesma inclinação de coletor padronizada e para uma razão volumétrica de 0,5, resumidos na Tab. 17, observa-se que o sistema simples apresentou uma área ótima de 7,3925 m² já o sistema acoplado apresentou uma área total maior, de 7,9108 m², sendo aproximadamente 79% da área de coletor sem cobertura e 21% do coletor com cobertura. Assim, como o sistema acoplado é composto por sua maioria pelo coletor de menor custo, seu custo total minimizado é menor que em relação ao sistema simples.

Tabela 16: Valores otimizados para o sistema acoplado para alguns valores de razão volumétrica y

Razão volumétrica - y	Área otimizada		Custo total minimizado
	Coletor sem cobertura	Coletor com cobertura	
0,3	6,9163 m ²	1,2919 m ²	R\$ 4.417,20
0,5	6,2734 m ²	1,6374 m ²	R\$ 4.393,70
0,7	7,2046 m ²	1,3700 m ²	R\$ 4.407,80

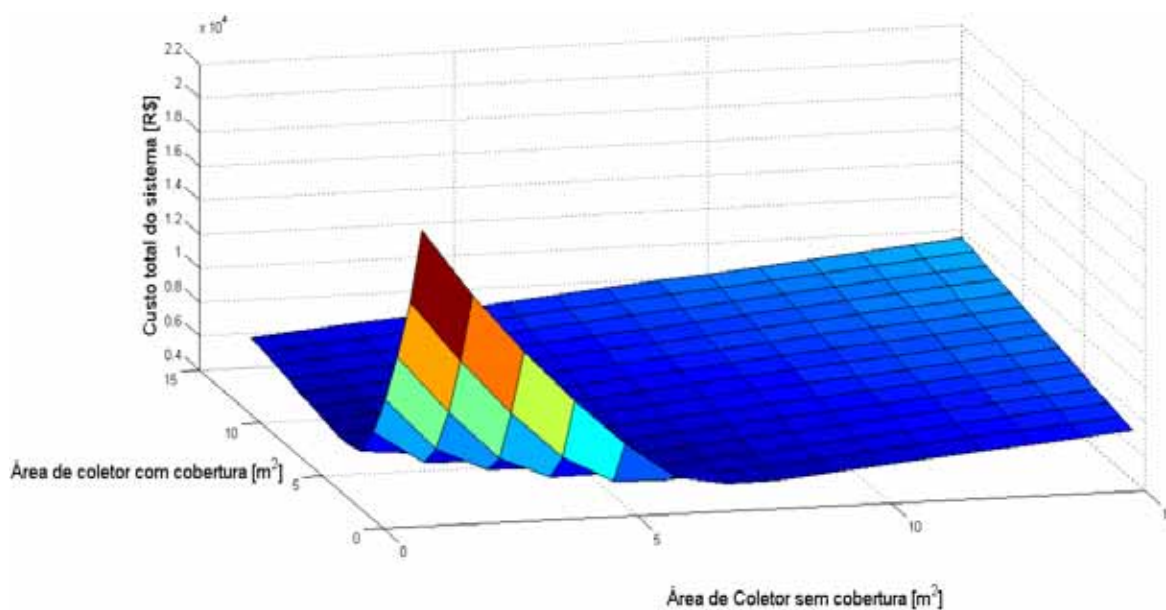


Figura 36: Variação do custo do sistema acoplado em função da área dos coletores sem e com cobertura

Assim, de acordo a análise termo-econômica do sistema de aquecimento solar de água para uso doméstico, por diferentes métodos, foi possível verificar que o sistema acoplado composto por coletores sem e com cobertura, a partir da análise dinâmica da temperatura baseada na equação da energia útil, apresentou os melhores resultados.

Tabela 17: Comparação entre os sistemas simples e acoplado otimizados

Sistema	Área otimizada		Custo total minimizado
	Coletor sem cobertura	Coletor com cobertura	
Simple	-	7,3925 m ²	R\$ 4709,90
Acoplado	6,2734 m ²	1,6374 m ²	R\$ 4393,70

CONCLUSÕES

O presente trabalho comparou diferentes métodos de dimensionamento de aquecimento de água para o uso doméstico, a partir de um aquecedor de placa plana, para a cidade de Bauru. Além disso, foi realizado o estudo de viabilidade de implementação de um sistema acoplado, composto por coletores com e sem cobertura de vidro. As análises realizadas para os diferentes métodos e sistemas propostos, permitem concluir que:

- Como pode ser observado nos resultados, as metodologias consideradas apresentaram valores próximos para as frações solares, com uma diferença máxima de 10% entre a que produzia a melhor e a pior eficiência. Tal diferenciação é justificada pela diferença dos métodos, já que cada método possui uma forma de análise. Desta forma, todos os métodos apresentados mostraram resultados consistentes entre si, que tornam viável a utilização de qualquer um deles na modelagem de sistemas de aquecimento de água.
- Dos estudos realizados, tanto para os sistemas simples como para o acoplado apenas o modelo dinâmico foi implementado. A sua formulação baseada no comportamento instantâneo do sistema que leva em consideração toda a variação que ocorre ao longo do dia, permitiu mudanças na metodologia facilmente adaptáveis ao novo conceito. Embora tenha sido tentada a realização da modelagem pelo método ϕ, f -chart, não se logrou sucesso na alteração dos seus parâmetros de forma a representar as novas condições do problema.
- O estudo dinâmico proposto apresentou valores de temperatura de mistura ao longo dos dias típicos consistentes com o verificado nos sistemas em operação. No sistema composto apenas por coletores de simples cobertura, a temperatura ao final do dia alcançava valores próximos a da demanda estabelecida nos dias mais quentes. Já no caso do sistema proposto composto por dois coletores acoplados, um sem cobertura e outro de simples cobertura, as temperaturas de misturas chegaram a ultrapassar a temperatura de demanda ao final do dia durante vários períodos do ano.

- A variação da inclinação do coletor em sistemas de menor porte (domésticos) não alterou de maneira significativa no valor do custo total do sistema. Embora, a menor área de coletores e, conseqüentemente, o menor custo tenha ocorrido para o ângulo otimizado, as variações observadas foram pequenas. No caso de sistemas menores estas diferenças seriam provavelmente absorvidas pelo próprio aumento de área necessário para adaptar o projeto a um número definido de coletores.
- O sistema acoplado apresentou bons resultados, uma vez que apresenta um custo menor para uma mesma eficiência, quando comparado ao sistema de coletor simples também analisado. Cabe destacar que mesmo apresentando uma maior área total de coletor, a maior parcela é composta por coletores sem cobertura de vidro e que possuem um custo inferior.
- A variação da altura de retorno do pré-aquecimento, ou razão volumétrica, não apresentava alterações significativas no dimensionamento do sistema acoplado. Assim, o valor indicado para o sistema foi de 50% de volume para aquecimento do coletor com cobertura, já que este apresenta um melhor volume de água quente a uma temperatura elevada e com um custo ligeiramente menor.

Como qualquer estudo sobre o tema, este trabalho foi detectando novas alternativas de estudo a medida que ia sendo realizado, ou mesmo, deficiências que poderiam ser sanadas com estudos complementares. Desta forma, sugere-se como alternativa para trabalhos futuros:

- realizar uma validação experimental do sistema acoplado proposto e, com isso também a verificação dos parâmetros dos sistemas otimizados obtidos.
- realizar uma análise do sistema proposto para outras latitudes, principalmente para maiores latitudes, onde os níveis de radiações são menores e a demanda de água quente é alta.
- e, por fim, considerar uma análise experimental do sistema proposto a longo prazo, para a verificação da vida útil dos coletores utilizados no sistema acoplado e a validade do conjunto proposto.

Referências

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Projeto e instalação – NBR 15569**. Rio de Janeiro, 2008

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares Parte 2: Métodos de ensaio – NBR 15747-2**. Rio de Janeiro, 2009

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Instalação predial de água fria – NBR 5626**. Rio de Janeiro, 1998

A vez da energia solar - Planeta Sustentável. Disponível em: <<http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/energia/certificacao-selo-economia-sustentabilidade-492784.shtml>>. Acesso em: 25 mar. 2014.

ABOU-ZEID, M. R.; HAWAS, M. M. Economic evaluation and optimization of solar systems for space and domestic water heating. **Energy Conversion and Management**, v. 23, n. 4, p. 251–256, 1983.

ALVAREZ, A. et al. Experimental and numerical investigation of a flat-plate solar collector. **Energy**, v. 35, n. 9, p. 3707–3716, set. 2010.

Balanco Energético Nacional. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal2013.aspx>>. Acesso em: 26 mar. 2014.

Cidades Solares. Disponível em: <http://www.cidadessolares.org.br/conteudo_view.php?sec_id=10>. Acesso em: 28 mar. 2014.

COLLARES-PEREIRA, M.; RABL, A. The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. **Solar Energy**, v. 22, n. 2, p. 155–164, 1979.

CRISTOFARI, C. et al. Modelling and performance of a copolymer solar water heating collector. **Solar Energy**, v. 72, n. 2, p. 99–112, fev. 2002.

DUBEY, S.; SOLANKI, S. C.; TIWARI, A. Energy and exergy analysis of PV/T air collectors connected in series. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 8, p. 863–870, ago. 2009.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. second ed. New York: [s.n.].

Energia Solar térmica e suas tecnologias | DASOL | Departamento Nacional de Aquecimento Solar da ABRAVA, [s.d.]. Disponível em: <<http://www.dasolabrava.org.br/2014/02/energia-solar-termica-e-suas-tecnologias/>>. Acesso em: 21 mar. 2014

ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. **Solar Energy**, v. 28, n. 4, p. 293–302, 1982.

FARAHAT, S.; SARHADDI, F.; AJAM, H. Exergetic optimization of flat plate solar collectors. **Renewable Energy**, v. 34, n. 4, p. 1169–1174, abr. 2009.

GAUR, M. K.; TIWARI, G. N. Optimization of number of collectors for integrated PV/T hybrid active solar still. **Applied Energy**, v. 87, n. 5, p. 1763–1772, Maio 2010.

GIOVANNETTI, F. et al. High transmittance, Low Emissivity Glass Covers for Flat Plate Collectors: Applications and Performance. **Energy Procedia**, v. 30, p. 106–115, 2012.

HOTTEL, H. C.; WHILLIER, A. Evaluation of Flat-plate Solar Collector Performance, In: The Conference on the Use of Solar Energy: The Scientific Basis. v. 2, n. 1, p. 74–104, 1958.

INMETRO. 352. Portaria INMETRO / MDIC número 352 de 06/07/2012.

Inmetro - Tabelas de consumo/Eficiência energética. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/coletores-solares.asp>>. Acesso em: 8 mar. 2013.

IQBAL, M. Hourly vs daily method of computing insolation on inclined surfaces. **Solar Energy**, v. 21, n. 6, p. 485–489, 1978.

KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. 2 edition ed. Burlington, MA: Academic Press, 2009.

KIM, Y.-D. et al. Thermal analysis and performance optimization of a solar hot water plant with economic evaluation. **Solar Energy**, v. 86, n. 5, p. 1378–1395, maio 2012.

KLEIN, S. Calculation of the Monthly-Average Transmittance-Absorptance Product. **Solar Energy**, v. 23, n. 6, p. 547–551, 1979.

KLEIN, S. A. et al. A method of simulation of solar processes and its application. **Solar Energy**, v. 17, n. 1, p. 29–37, abr. 1975.

KLEIN, S. A.; BECKMAN, W. A. A general design method for closed-loop solar energy systems. **Solar Energy**, v. 22, n. 3, p. 269–282, 1979a.

KLEIN, S. A.; BECKMAN, W. A. A general design method for closed-loop solar energy systems. **Solar Energy**, v. 22, n. 3, p. 269–282, 1979b.

KLEIN, S. A.; BECKMAN, W. A.; DUFFIE, J. A. A design procedure for solar heating systems. **Solar Energy**, v. 18, n. 2, p. 113–127, 1976.

KULKARNI, G. N.; KEDARE, S. B.; BANDYOPADHYAY, S. Determination of design space and optimization of solar water heating systems. **Solar Energy**, v. 81, n. 8, p. 958–968, Agosto 2007.

LIMA, J. B. A. **Otimização de sistema de aquecimento solar de água em edificações residenciais unifamiliares utilizando o programa TRNSYS**. Tese de mestrado — São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.

LIMA, J. B. A.; PRADO, R. T. A.; MONTORO TABORIANSKI, V. Optimization of tank and flat-plate collector of solar water heating system for single-family households to assure economic efficiency through the TRNSYS program. **Renewable Energy**, v. 31, n. 10, p. 1581–1595, Agosto 2006.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, v. 4, n. 3, p. 1–19, jul. 1960.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors: With design data for the U.S., its outlying possessions and Canada. **Solar Energy**, v. 7, n. 2, p. 53–74, abr. 1963.

LUND, P. D.; PELTOLA, S. S. SOLCHIPS—A fast predesign and optimization tool for solar heating with seasonal storage. **Solar Energy**, v. 48, n. 5, p. 291–300, 1992.

MARTINOPOULOS, G. et al. CFD modeling of a polymer solar collector. **Renewable Energy**, v. 35, n. 7, p. 1499–1508, jul. 2010.

Medeiros, M. **Simulação e avaliação de um sistema de aquecimento solar de água utilizando balanço energético**. Tese de mestrado - Paraná: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2012.

Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/>>. Acesso em: 21 mar. 2014.

Miyazato, T. **Integração do Sistema de Aquecimento Solar (SAS) ao projeto de edificações residenciais**. Tese de mestrado – São Paulo: Universidade de São Paulo, 2012.

NIKOLIĆ, N.; LUKIĆ, N. A mathematical model for determining the optimal reflector position of a double exposure flat-plate solar collector. **Renewable Energy**, v. 51, p. 292–301, mar. 2013.

PANDEY, C. K.; KATIYAR, A. K. A comparative study of solar irradiation models on various inclined surfaces for India. **Applied Energy**, v. 88, n. 4, p. 1455–1459, abr.

2011.

Potencial Energético Solar - Sundata. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php#sundata>>. Acesso em: 27 mar. 2013.

Publicação: Boas práticas em Energia Solar. Disponível em: <<http://www.vitaecivilis.org.br/index.php/programas/2011-11-25-10-25-50/publicacao-boas-praticas-em-energia-solar>>. Acesso em: 20 mar. 2014.

RODRÍGUEZ-HIDALGO, M. C. et al. Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions. Part I: Model description and experimental validation. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 14–15, p. 2394–2404, out. 2011.

SAMPATHKUMAR, K. et al. Thermal Modeling of a Solar Still Coupled with Evacuated Tube Collector under Natural Circulation Mode—An Experimental Validation. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 35, n. 15, p. 1441–1455, 2013.

SIQUEIRA, D. A. **Estudo de desempenho do aquecedor solar de baixo custo.** [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

SIQUEIRA, D. A.; VIEIRA, L. G. M.; DAMASCENO, J. J. R. Analysis and performance of a low-cost solar heater. **Renewable Energy**, v. 36, n. 9, p. 2538–2546, Setembro 2011.

SMITH, C. C.; WEISS, T. A. Design application of the Hottel-Whillier-Bliss equation. **Solar Energy**, v. 19, n. 2, p. 109–113, 1977.

Souza, A. G. L. de. **Desenvolvimento de Software Para Projeto de Sistemas Centralizados de Aquecimento Solar de Água.** Tese de mestrado Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2009.

SÖZEN, A.; MENLIK, T.; ÜNVAR, S. Determination of efficiency of flat-plate solar collectors using neural network approach. **Expert Systems with Applications**, v. 35, n. 4, p. 1533–1539, nov. 2008.

The Sun As A Source Of Energy | ITACA. Disponível em: <<http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/>>. Acesso em: 28 fev. 2014.

TÜKENMEZ, M.; DEMIRELI, E. Renewable energy policy in Turkey with the new legal regulations. **Renewable Energy**, v. 39, n. 1, p. 1–9, mar. 2012.

ANEXO A

A sintaxe da função ode45 é dada por:

- $[x,y]=ode45('nome\ da\ função', [x_0, x_f], y(x_0))$.

Suas saídas são:

- x-variação do tempo
- y-variação da Temperatura correspondente a cada valor de x

Assim:

- x_0 é o instante inicial para o calculo da variação de temperatura, ou seja, a hora do nascer do sol.
- X_f é o instante final para o calculo da variação de temperatura, ou seja, a hora do pôr do sol.
- $y(x_0)$ é o valor da temperatura para o instante inicial, nesse caso foi considerada que ela é igual ao valor da temperatura de água fria.

A ferramenta utilizada, fmin possui a seguinte sintaxe:

```
options=optimset('Display','iter','plotfncs');
[x, fval, exitflag]=fmin(@(x)fun(parâmetros), x1, x2, options);
```

Sendo x_1 o limite inferior e x_2 o limite superior para o procedimento de otimização da variável x . Os dados de entrada e saída para a ferramenta de otimização são explicados conforme a Tab. 18.

A ferramenta fminsearchbnd possui a sintax abaixo e os dados de entrada e saída são os mesmos apresentados na Tab. 18, definidos para o procedimento univariável.

```
options=optimset('Display','iter','plotfncs');
[x, fval, exitflag]=fminsearchbnd(@(x)fun(parâmetros), LB, UB, options);
```

Tabela 18: Parâmetros de entrada e saída da ferramenta de otimização fmin

Dados de Entrada	Display	off Não apresenta nenhuma saída 'iter' Apresenta uma saída a cada iteração 'final' Exibe apenas o resultado final 'notify' Exibe a saída apenas se não convergir
	FunValCheck	'on' Exibe um erro quando a função retornar um valor complexo ou não tiver um resultado 'off' Não exibe erro
	MaxFunEvals	Define o número máximo de avaliações permitidas
	MaxIter	Define o número máximo de iterações permitidas
	OutputFcn	Função limitadora definida pelo usuário chamada a cada iteração
	PlotFcns	Se não definido não apresenta gráfico das iterações 'Optimplotx' Plota o x mínimo 'Optimplotfval' Plota o valor da função a cada iteração 'Optimplotfunccount' Plota a função contador
	Tolx	Tolerância de x
Dados de Saída	fval	Retorna o valor da função no ponto de mínimo
	exitflag	Retorna 1 se a solução convergiu devido a tolerância de x 0 se foi atingido o número máximo de avaliações ou iterações -1 se o algoritmo foi encerrado devido a função de saída -2 se as condições de contorno são inconsistentes

Sendo LB o vetor do limite inferior e UB o vetor do limite superior para o vetor de variáveis x .

ANEXO B

Os programas utilizados para as diferentes metodologias e sistemas serão apresentados a seguir.

1 - Método estático

1.1 - Função de definição dos parâmetros

%GERAL

% Definição dos Parâmetros

lat=-22.9;

Tl=60;

QL=400;

beta=abs(lat)+10;

rog=0.2;

Frtalalfa=0.709;

FRUL=6.443;

%Dados custo

custodep=237.5; %Custo dependente da área do Coletor Com Cobertura

custoind=2370; %Custo independente da Área (reservatório térmico, intalação, tubulação)

custoe=0.3175; %Custo da energia elétrica por kWh para consumo médio (por volta de 150kWh)

i=0.07; %Juros

j=0.10; %Inflação

vidautil=20; %Vida útil do coletor - 20 anos

%OTIMIZAÇÃO

[Acotim,custoot]=fminbnd(@(Ac) custo(Ac, lat, rog, QL, beta, Frtalalfa, FRUL, Tl, custoind, custodep, custoe, i, j, vidautil),1,30);

1.2 - Função custo

function

```

[CUSTO,f]=custo(Ac,lat,rog,Ql,beta,FRtalalfa,FRUL,Tl,custoind,custodep,custoe,i,j,vidautil)
[F,Load,f]=Fanual(Ac,lat,beta,rog,FRtalalfa,FRUL,Tl,Ql);
customan=0.01*(custoind+(custodep*Ac));% 1% do custo inicial do sistema
Lac=Load*2.78*10^-4; %Conversão da demanda de kJ para kWh
Cmanac=0; %Custo Acumulado com Manutenção
Ceaux=((1-F)*12*Lac*custoe);%Custo Energia Auxiliar anual
Ceauxac=0; %Custo Acumulado com Energia Auxiliar
for k=1:vidautil %Gastos com manutenção e energia auxiliar durante a vida útil
Cmanac=Cmanac+((customan*((1+i)^(k-1)))/((1+j)^k));
Ceauxac=Ceauxac+((Ceaux*((1+i)^(k-1)))/((1+j)^k));
end
CUSTO=custoind+(custodep*Ac)+Cmanac+Ceauxac;
end

```

1.3 - Calculo da fração solar

```

function [F,L_mes,f]=Fanual(Ac,lat,beta,rog,FRtalalfa,FRUL,Tl,Ql)
mes = [31 28 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31];
load hbarra.m;
load diatip.m;
save hbarra.mat hbarra;
save -ascii diatip.mat diatip;
Hbarra=hbarra(1,:);
Ta=hbarra(2,:);
F_soma=0;
L_soma=0;
for MM=1:12
Taf=Ta(MM)-1;
Tme=(Tl+Taf)/2;
[QuD hmed]=EnergiaUD(Ac, diatip(MM), MM, lat, beta, rog, Hbarra(MM), Tme, Ta(MM),
Frtalalfa, FRUL);%Energia útil ao longo de um dia em KJ
Qtotal=trapz(hmed,QuD);
L=demanda(Ql,Taf,Tl);%Demanda dia em KJ
n=mes(MM);
L_soma=L_soma+(demanda(Ql,Taf,Tl)*n);

```

```

f(MM)=Qttotal/L;
if f(MM)>1
f(MM)=1;
end
F_soma=F_soma+f(MM)*L*n;
end
F=F_soma/L_soma;
L_mes=L_soma/12;

```

1.4 - Calculo da demanda de água quente

```

function demanda=demanda(QL,Taf,Tl)
demanda = QL*4.18*(Tl-Taf);
end

```

1.5 - Calculo da energia útil horária

```

function [QuD hmed]=EnergiaUD(Ac,DD,MM,lat,beta,rog,Hbarra,Tme,Ta,FRtalalfa,FRUL)
N = DiaAno(DD,MM);
DELTA=delta(N);
%Duração do dia
hss=acosd(-(tand(lat)*tand(DELTA)));
Horas_Dia=(2*hss)/15;
NHoras_Dia=floor(Horas_Dia);
inch=Horas_Dia/NHoras_Dia;
QT=0;
h=-hss+inch*15/2;
hs=[h];
for i=1:NHoras_Dia
[Ktheta_B,Ktheta_G,Ktheta_D]=Ktheta(lat,h,DELTA,beta);
I_c=(IrradiacaoH(DD, MM, lat, Ktheta_B, Ktheta_G, Ktheta_D, Hbarra, DELTA, beta, hss, h,
rog))*10^3;
Qu_H(i)=max(EnergiaUH(Ac,FRtalalfa,I_c,FRUL,Tme,Ta),0);
hmed(i)=(h/15)+12;
h=h+inch*15;
end

```

1.6 - Calculo do número do dia no ano

```
function N = DiaAno(DD,MM)
%-- Tabela com o somatório dos dias do ano, para cada mês--
mes = [0 31 59 90 120 151 181 212 243 273 304 334];
N = mes(MM) + DD;
end
```

1.7 - Calculo do ângulo de declinação

```
function DELTA=delta(N)
DELTA=23.45*sind((360*(284+N))/365);
end
```

1.8 - Calculo dos produtos transmitância absortância horária

```
function [Ktheta_B,Ktheta_G,Ktheta_D]=Ktheta(lat,h,delta,beta)
b0=0.1; %Para coletor de simples cobertura
%cálculo dos ângulos de incidencia das radiações direta(B), difusa(D) e refletida(G)
theta_B=acosd((cosd(lat+beta)*cosd(delta)*cosd(h))+(sind(lat+beta)*sind(delta)));
theta_G=90-0.5788*beta+0.002693*(beta^2);
theta_D=59.68-0.1388*beta+0.001497*(beta^2);
% Radiação direta
if theta_B>80
Ktheta_B=0.5;
else
Ktheta_B=1-(b0*((1/cosd(theta_B))-1));
end
% Radiação refletida
if theta_G>80
Ktheta_G=0.5;
else
```

```

Ktheta_G=1-(b0*((1/cosd(theta_G))-1));
end
%Radiação difusa
if theta_D>80
Ktheta_D=0.5;
else
Ktheta_D=1-(b0*((1/cosd(theta_D))-1));
end
end

```

1.9 - Calculo da energia útil

```

function
I_c=IrradiacaoH(DD,MM,lat,Ktheta_B,Ktheta_G,Ktheta_D,Hbarra,DELTA,beta,hss,h,rog)
N = DiaAno(DD,MM);
Hext = H0(lat,N,DELTA,hss);
KT=(Hbarra*10^6)/Hext;% Hbarra MW
%Correção da radiação difusa segundo Erbs
if hss<=81.4
razaoHDbarra=1.391-3.56*KT+4.189*(KT^2)-2.137*(KT^3);
else
razaoHDbarra=1.311-3.022*KT+3.427*(KT^2)-1.821*(KT^3);
end
HDbarra=razaoHDbarra*Hbarra;
[r,rd,RB]=razoesr(h,hss,lat,DELTA,beta);
I_T=Hbarra*r;
I_D=HDbarra*rd;
I_B=I_T-I_D;

```

```
I_c=I_B*RB*Ktheta_B+I_D*Ktheta_D*((1+cosd(beta))/2)+I_T*rog*Ktheta_G*((1-
cosd(beta))/2);
```

```
end
```

1.10 - Calculo da radiação extraterrestre

```
function H0 = H0(lat,N,delta,hss)
```

```
Gsc=1366.1;
```

```
H0=((24*3600*Gsc)/pi)*(1+0.033*cosd((360*N)/365))*(cosd(lat)*cosd(delta)*sind(hss)+
((pi*hss) / 180)*sind(lat)*sind(delta));
```

```
end
```

1.11 - Calculo das razões r

```
function [r,rd,RB]=razoesr(h,hss,lat,DELTA,beta)
```

```
alfa=0.409+0.5016*sind(hss-60);
```

```
BETA=0.6609-0.4767*sind(hss-60);
```

```
r=((pi/24)*(alfa+BETA*cosd(h))*(cosd(h)-cosd(hss)))/(sind(hss)-((2*pi*hss)/360)*
cosd(hss));
```

```
rd=((pi/24)*(cosd(h)-cosd(hss)))/(sind(hss)-((2*pi*hss)/360)*cosd(hss));
```

```
if lat<0
```

```
RB=((sind(lat+beta)*sind(DELTA))+cosd(lat+beta)*cosd(DELTA)*cosd(h))/((sind(lat)*
sind(DELTA)) + cosd(lat)*cosd(DELTA)*cosd(h));
```

```
else
```

```
RB=((sind(lat-beta)*sind(DELTA))+cosd(lat-beta)*cosd(DELTA)*cosd(h))/((sind(lat)*
sind(DELTA))+cosd(lat)*cosd(DELTA)*cosd(h));
```

```
end
```

```
end
```

2 - Método dinâmico

2.1 - Função de definição dos parâmetros

```
% GERAL
```

% Definição dos Parâmetros

global arquivo;

arquivo=['jan'; 'fev'; 'mar'; 'abr'; 'mai'; 'jun'; 'jul'; 'ago'; 'set'; 'out'; 'nov'; 'dez'];

lat=-22.32;

Tl=60;

QL=400;

beta=abs(lat)+10;

rog=0.2;

Frtalalfa=0.709;

FRUL=6.443;

mr=400;

%Dados custo

custodep=86.25;%Custo dependente da área do Coletor Com Cobertura

custoind=1970;%Custo independente da Área (reservatório térmico, intalação, tubulação)

custoe=0.3175; %Custo da energia elétrica por kWh para consumo médio (por volta de 150kWh)

i=0.07; %Juros

j=0.10; %Inflação

vidautil=20; %Vida útil do coletor

% Otimização

[Acotim,custoot]=fminbnd(@(x) custo(x, mr, lat, rog, QL, beta, Frtalalfa, FRUL, Tl, custoind, custodep, custoe, i, j, vidautil), 1, 30);

2.2 - Função custo

Function CUSTO=custo(x, lat, rog, QL, mr, beta, Frtalalfa, FRUL, Tl, custoind, custodep1, custodep2, custoe, i, j, vidautil, y)

[F,L_mes]=Fanual_Acop(mr,x,lat,beta,rog,Frtalalfa,FRUL,Tl,QL,y);

customan=0.01*(custoind+(custodep2*x(2))+(custodep1*x(1)));

```

Lac=(L_mes*2.78*10^-7); %Conversão da demanda média anual, mensal de J para kWh
Cmanac=0; %Custo Acumulado com Manutenção
Ceaux=((1-F)*12*Lac*custoe);%Custo Energia Auxiliar anual
Ceauxac=0; %Custo Acumulado com Energia Auxiliar
for k=1:vidautl %Gastos com manutenção e energia auxiliar durante a vida útil
Cmanac=Cmanac+((customan*((1+i)^(k-1)))/((1+j)^k));
Ceauxac=Ceauxac+((Ceaux*((1+i)^(k-1)))/((1+j)^k));
end
CUSTO=custoind+(custodep2*x(2))+(2*custodep1*x(1))+Cmanac+Ceauxac;
end

```

2.3 - Calculo da fração solar

```

function [F L_mes f]=Fannual_Acop(mr,x,lat,beta,rog,FRtalalfa,FRUL,Tl,Ql,y)
global arquivo
mes = [31 28 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31];
load hbarra.m;
load diatip.m;
save hbarra.mat hbarra;
save -ascii diatip.mat diatip;
Hbarra=hbarra(1,:);
Ta=hbarra(2,:);
F_soma=0;
Load=0;
L_soma=0;
for MM=1:12
Taf=Ta(MM)-1;
[Tdia, hs, Qu_TOTAL] = IenergiaD(mr, x, diatip(MM), MM, lat,beta, rog, Hbarra(MM),

```

```

Ta(MM), Frtalalfa, FRUL, y); %Energia útil ao longo de um dia em KJ
L=demanda(Ql,Taf,Tl);%Demanda DIA em KJ
n=mes(MM);
L_soma=L_soma+(demanda(Ql,Taf,Tl)*n);%Somatória da Demanda ao longo do ano, por
mês
f(MM)=Qu_TOTAL/L;%Fração Solar em um DIA TÍPICO = AO MÊS
if f(MM)>1
f(MM)=1;
end
F_soma=F_soma+f(MM)*L*n;%Soma da Fração solar multiplicada pela demanda mês
end
F=F_soma/L_soma;%Fração Solar média anual, mensal
L_mes=L_soma/12;
nome_arq=sprintf('fracao_solar.dat');
csvwrite(nome_arq, [f])
end

```

2.4 - Cálculo da energia ao longo do dia

```

function [Tdia hs Qac]=IEnergiaD(mr, x, DD, MM, lat, beta, rog, Hbarra, Ta, Frtalalfa,
FRUL, y)
global arquivo
N = DiaAno(DD,MM);
DELTA=delta(N);
%Duração do dia
hss=acosd(-(tand(lat)*tand(DELTA)));
Horas_Dia=(hss)/15;
NHoras_Dia=floor(2*Horas_Dia);
param=odeset('RelTol',0.01, 'AbsTol',0.01, 'InitialStep', 0.1, 'MaxStep',1);

```

```

[hs, saida]=ode45(@(h,T)Taxa_Energia_T(h,T,mr, hss, x, DD, MM, lat, beta, rog,
Hbarra,Ta,FRtalalfa,FRUL,y),[12-Horas_Dia,12+Horas_Dia],[Ta-1,Ta-1,0,0,0],param);

Tdia=saida(:,1:2);

Ql = saida(:,3:4);

Rad=saida(:,5);

for i=1:length(Ql)-1

hsmed(i,1)=(hs(i+1)+hs(i))/2;

radmed(i,1)=IrradiacaoH(DD,MM,lat,1,1,1,Hbarra,DELTA,30,hss,(hsmed(i)-12)*15, rog) *
1000/3.6;

deltaq(i,1:2)=(Ql(i+1,:)-Ql(i,:))./x/(hs(i+1)-hs(i))/3.6;

efic(i,1:2) = deltaq(i,:)./radmed(i);

end

%nome_arq=sprintf('%s',arquivo(MM,:));

nome_arq=sprintf('%s_acum.dat',arquivo(MM,:));

csvwrite(nome_arq, [hs saida])

nome1=sprintf('%s_deltas.dat',arquivo(MM,:));

csvwrite(nome1, [hsmed radmed deltaq efic])

%Energia útil DIA

Qac1=Ql(end,1);

Qac2=Ql(end,2);

Qac=Qac1+Qac2;

end

```

OBS: O calculo do dia do ano, do ângulo de declinação e da demanda são iguais ao método estático.

2.5 - Calculo da energia útil instantânea

```

function saida=Taxa_Energia_T(hora, Tme, mres, hss, x, DD, MM, lat, beta, rog, Hbarra, Ta,
Frtalalfa, FRUL, y)

```

```

N = DiaAno(DD,MM);
DELTA=delta(N);
cpag=4.186;
h=(hora-12)*15;
Te=(Tme+Ta)/2;
%Calculo da taxa de variação na temperatura
[Ktheta_B,Ktheta_G,Ktheta_D]=Ktheta(lat,h,DELTA,beta);
Ic=(IrradiacaoH(DD,MM,lat,Ktheta_B,Ktheta_G,Ktheta_D,Hbarra,DELTA,beta,hss,h,rog))*10^3;
dQl=max(EnergiaUH(x,FRtalalfa',Ic,FRUL',Te,Ta),0);
Tl=dQl/mres/cpag;
S=[Tl dQl Ic];
saida=S';
end

```

2.6 - Calculo dos produtos transmitância absorptância instantânea

```

function [Ktheta_B,Ktheta_G,Ktheta_D]=Ktheta(lat,h,delta,beta)
b0=0.1; %Para coletor de simples cobertura
%cálculo dos ângulos de incidencia das radiações direta(B), difusa(D) e refletida(G)
theta_B=acosd((cosd(lat+beta)*cosd(delta)*cosd(h))+(sind(lat+beta)*sind(delta)));
theta_G=90-0.5788*beta+0.002693*(beta^2);
theta_D=59.68-0.1388*beta+0.001497*(beta^2);
% Radiação direta
if theta_B>80
Ktheta_B=0.5;
else
Ktheta_B=1-(b0*((1/cosd(theta_B))-1));

```

```

end

% Radiação refletida

if theta_G>80

Ktheta_G=0.5;

else

Ktheta_G=1-(b0*((1/cosd(theta_G))-1));

end

%Radiação difusa

if theta_D>80

Ktheta_D=0.5;

else

Ktheta_D=1-(b0*((1/cosd(theta_D))-1));

end

end

```

2.7 - Calculo da energia útil

```

function
I_c=IrradiacaoH(DD,MM,lat,Ktheta_B,Ktheta_G,Ktheta_D,Hbarra,DELTA,beta,hss,h,rog)

N = DiaAno(DD,MM);

Hext = H0(lat,N,DELTA,hss);

KT=(Hbarra*10^6)/Hext;% Hbarra MW

%Correção da radiação difusa segundo Erbs

if hss<=81.4

razaoHDbarra=1.391-3.56*KT+4.189*(KT^2)-2.137*(KT^3);

else

razaoHDbarra=1.311-3.022*KT+3.427*(KT^2)-1.821*(KT^3);

end

```

```

HDbarra=razaoHDbarra*Hbarra;
[r,rd,RB]=razoesr(h,hss,lat,DELTA,beta);
I_T=Hbarra*r;
I_D=HDbarra*rd;
I_B=I_T-I_D;
I_c=I_B*RB*Ktheta_B+I_D*Ktheta_D*((1+cosd(beta))/2)+I_T*rog*Ktheta_G*((1-
cosd(beta))/2);
end

```

OBS: A radiação extraterrestre é calculada pela mesma função que o método estático.

2.8 - Calculo das razões r

```

function [r,rd,RB]=razoesr(h,hss,lat,DELTA,beta)
alfa=0.409+0.5016*sind(hss-60);
BETA=0.6609-0.4767*sind(hss-60);
r=((pi/24)*(alfa+BETA*cosd(h))*(cosd(h)-cosd(hss)))/(sind(hss)-((2*pi*hss)/360)
*cosd(hss));
rd=((pi/24)*(cosd(h)-cosd(hss)))/(sind(hss)-((2*pi*hss)/360)*cosd(hss));
if lat<0
RB=((sind(lat+beta)*sind(DELTA))+cosd(lat+beta)*cosd(DELTA)*cosd(h))/((sind(lat)*
sind(DELTA))+(cosd(lat)*cosd(DELTA)*cosd(h)));
else
RB=((sind(lat-beta)*sind(DELTA))+cosd(lat-beta)*cosd(DELTA)*cosd(h))/((sind(lat)*
sind(DELTA))+cosd(lat)*cosd(DELTA)*cosd(h));
end
end

```

3 - Método dinâmico – sistema acoplado

Para o método dinâmico há apenas diferenciação na definição dos parâmetros e no cálculo das energias instantâneas.

3.1 - Função geral de definição de parâmetros

```

%GERAL

% Definição dos Parâmetros

global arquivo;

arquivo=['jan'; 'fev'; 'mar'; 'abr'; 'mai'; 'jun'; 'jul'; 'ago'; 'set'; 'out'; 'nov'; 'dez'];

lat=-22.32;

Tl=60;

QL=400;

beta=abs(lat)+10;

rog=0.2;

FRtalalfa=[0.91;0.709];

FRUL=[22.57;6.443];

mr=400;

y=0.5;

%Dados custo

custodep1=86.25;%Custo dependente da área do Coletor Com Cobertura

custodep2=237.5;%Custo dependente da área do Coletor Com Cobertura

custoind=1970;%Custo independente da Área (reservatório térmico, intalação, tubulação)

custoe=0.3175; %Custo da energia elétrica por kWh para consumo médio (por volta de
150kWh)

i=0.07; %Juros

j=0.10; %Inflação

vidautil=20; %Vida útil do coletor - 20 anos para coletores com cobertura e 10 para sem

% Otimização Multivariável

[xotim,custoot]=fminsearchbnd(@(x) custo(x, lat, rog, QL, mr, beta, Frtalalfa, FRUL, Tl,
custoind, custodep1, custodep2, custoe, i, j, vidautil, y),[0,0.1],[0,0.1],[inf,0.99]);

```

3.2 - Calculo da energia útil instantânea

```

function saida=Taxa_Energia_T(hora, Tme, mres, hss, x, DD, MM, lat, beta, rog, Hbarra, Ta,
Frtalalfa, FRUL, y)

N = DiaAno(DD,MM);

DELTA=delta(N);

cpag=4.186;

h=(hora-12)*15;

Te=[(Tme(1)+Ta)/2 (Tme(2)+Tme(1))/2];

%Calculo da taxa de variação na temperatura

[Ktheta_B,Ktheta_G,Ktheta_D]=Ktheta(lat,h,DELTA,beta);

Ic1=(IrradiacaoH(DD,MM,lat,1,1,1,Hbarra,DELTA,beta,hss,h,rog))*10^3;

Ic2=(IrradiacaoH(DD,MM,lat,Ktheta_B,Ktheta_G,Ktheta_D,Hbarra,DELTA,beta,hss,h,rog))*
10^3;

I_c=[Ic1 Ic2];

dQl=max(EnergiaUH(x,FRtalalfa',I_c,FRUL',Te,Ta),[0 0]);

Tl1=dQl(1)/mres/cpag;

Tl2=(dQl(2)/(y*mres)/cpag)+(dQl(1)/mres/cpag);

Tl=[Tl1 Tl2];

S=[Tl dQl Ic1];

saida=S';

end

```

4 - Método ϕ , f -Chart

```

% Definição dos Parâmetros

%Dados Locais

lat=-22.32;

rog=0.2;

QL=400;

```

```
%Dados do Coletor
```

```
Vt=400;
```

```
beta=abs(lat)+10;
```

```
FRtalalfa=0.709;
```

```
FRUL=6.443;
```

```
Tmin=30;
```

```
Tl=60;
```

```
%Dados custo
```

```
custodep=237.5; %Custo dependente da área do Coletor Com Cobertura
```

```
custoind=2370; %Custo independente da Área (reservatório térmico, instalação, tubulação)
```

```
custoe=0.3175; %Custo da energia elétrica por kWh para consumo médio (por volta de  
150kWh)
```

```
i=0.07; %Juros
```

```
j=0.10; %Inflação
```

```
vidautl=20;
```

```
%OTIMIZAÇÃO
```

```
[Acotim,custoot]=fminbnd(@(Ac) custo(Ac, lat, rog, QL, Vt, beta, FRtalalfa, FRUL, Tmin, Tl,  
custoind, custodep, custoe, i, j, vidautl), 1, 30);
```

4.1 - Função custo

```
function custo=custo(Ac, fac_sc, Lac, custoind, custodep, customan, custoe, i, j, vidautl)
```

```
[fac_sc,Lac,f]=fanual(Ac,lat,rog,QL,Vt,beta,FRtalalfa,FRUL,Tmin,Tl);
```

```
customan=0.01*(custoind+(custodep*Ac));
```

```
Lac=(Lac*2.78*10^-7); %Conversão da demanda de J para kWh
```

```
Cmanac=0; %Custo Acumulado com Manutenção
```

```
Ceaux=((1-fac_sc)*12*Lac*custoe);%Custo Energia Auxiliar anual
```

```
Ceauxac=0; %Custo Acumulado com Energia Auxiliar
```

```
for k=1:vidautl %Gastos com manutenção e energia auxiliar durante a vida útil
```

```

Cmanac=Cmanac+((customan*((1+i)^(k-1)))/((1+j)^k));
Ceauxac=Ceauxac+((Ceaux*((1+i)^(k-1)))/((1+j)^k));
end
CUSTO=custoin+(custodep*Ac)+Cmanac+Ceauxac;
end

```

4.2 - Calculo da fração solar

```

function [FAC,Lac,ff]=fanual(Ac,lat,rog,QL,Vt,beta,Frtalalfa,FRUL,Tmin,Tl)
fac=0;
load hbarra.m;
load diatip.m;
save -ascii hbarra.mat hbarra;
save -ascii diatip.mat diatip;
Hbarra=hbarra(1,:);
Ta=hbarra(2,:);
Load=0;
for mes=1:12;
Taf=Ta(mes)-1;
[fimaxY,Xlinha,Rs,L]=parametrosad(Hbarra(mes),Ta(mes),diatip(mes),mes,lat,rog,QL,Vt,bet
a, Frtalalfa, FRUL, Tmin, Tl, Taf);
ff(mes)=f(Ac, Xlinha, fimaxY,Rs);
fac=fac+(ff(mes)*L);
Load=Load+L ;
end
FAC=fac/Load;
Lac=Load/12;
end

```

4.3 - Equação empírica da fração solar

```
function ff=f(Ac,Xlinha,fimaxY,Rs)
fun=inline('a-(fimaxY*Ac)+(0.015*(exp(3.85*a)-1)*(1-exp(-0.15*Xlinha*Ac)) *((Rs * Ac)^
0.76))');
ff=fzero(@(a) fun(Ac,Rs,Xlinha,a,fimaxY),0);
if (ff>1) ff=1; end
end
```

4.4 - Calculo dos parâmetros adimensionais

```
function [fimaxY,Xlinha,Rs,L]=parametrosad (Hbarra, Ta, DD, MM, lat, rog, QL, Vt, beta,
Frtalalfa, FRUL, Tmin, Tl, Taf)
N=DiaAno(DD,MM);
delta1=delta(N);
[hss1,hsslinha]=hss(lat,delta1,beta);
%Radiação Extraterrestre
Gsc=1366.1;
H01=H0(Gsc,lat,N,delta1,hss1);
Kt=(Hbarra*10^6)/H01;
% Relação entre radiação difusa sobre a radiação total em função do índice Kt, sendo
HDbarra a média mensal e HD diária mensal
[razaoHDbarra,razaoHD1]=razaoHD(hss1,Kt);
% Razões r de conversão:
%Fator Médio Mensal para Radiação Direta sobre um Plano Inclinado em relação a uma
Superfície Horizontal (RBbarra)
RBbarra1=RBbarra(lat,delta1,beta,hss1,hsslinha);
%Razão da radiação total por hora pela radiação total diária ao meio dia (rn)
%Razão da radiação difusa horária pela radiação difusa diária ao meio dia (rdn)
%Fator de radiação direta sobre uma superfície inclinada ao meio dia(RBn)
```

```

[rn,rdn,RBn]=razoesr(0,hss1,lat,delta1,beta);
%Fator de radiação total mensal sobre uma superfície inclinada (Rbarra)
Rbarra1=Rbarra(razaoHD1,RBbarra1,beta,rog);
%Taxa de radiação ao meio dia sobre uma superfície inclinada pela radiação sobre uma
superfície horizontal, para um determinado dia (Rn)
Rn1=Rn(rdn,rn,razaoHD1,RBn,beta,rog);
% Produto Transmitância Absortância médio
talalfabarra1=talalfabarra(lat,delta1,Hbarra,razaoHDbarra,RBbarra1,Rbarra1,beta,rog);
%Demanda de Água Quente
L=demanda(MM,QL,Taf,Tl);
% Parâmetros Adimensionais Do Método fi,f-Chart
% Utilizabilidade diária máxima (fimax)
% Parâmetros adimensionais, X e Y do Método f-Chart (fimaxY e Xlinha)
% Fator de correção para o Reservatório Térmico (Rs)
[fimaxY,Xlinha,Rs]=fimax(MM, Kt, Rn1, Rbarra1, Tmin, Ta, rn, H01, Frtalalfa, FRUL,
talalfabarra1, Hbarra, L,Vt);
end

```

O calculo para o dia do ano, do ângulo de declinação, da radiação extraterrestre e da demanda são iguais as funções utilizadas mostradas nos métodos anteriores.

4.5 - Ângulo do pôr do sol

```

function [hss,hsslinha]=hss(lat,delta,beta)
hss=acosd(-(tand(lat)*tand(delta)));
if lat>0
x=acosd(-tand(lat-beta)*tand(delta));
else
x=acosd(-tand(lat+beta)*tand(delta));
end

```

```

if hss<x
hsslinha=hss;
else
hsslinha=x;
end

```

4.6 - Calculo das relações das radiações

```

function [razaoHDbarra,razaoHD]= razaoHD(hss,Kt)
if hss<=81.4
razaoHDbarra=1.391-3.56*Kt+4.189*(Kt^2)-2.137*(Kt^3);
else
razaoHDbarra=1.311-3.022*Kt+3.427*(Kt^2)-1.821*(Kt^3);
end
if hss<=81.4
if Kt<0.715
razaoHD=1.0-0.2727*Kt+2.4495*(Kt^2)-11.9514*(Kt^3)+9.3879*(Kt^4);
else
razaoHD=0.143;
end
else
if Kt>=0.722
razaoHD=0.175;
else
razaoHD=1.0+0.2832*Kt-2.5557*(Kt^2)+0.8448*(Kt^3);
end
end
end

```

4.7 - Funções das relações empíricas de correções das radiações

```

function RB_barra=RBbarra(lat,delta,incl,hss,hsslinha)

if lat>0

RB_barra=(cosd(lat-incl)*cosd(delta)*sind(hsslinha)+(pi/180)*hsslinha*sind(lat-incl)*
sind(delta))/(cosd(lat)*cosd(delta)*sind(hss) + (pi/180)*hss*sind(lat)*sind(delta));

else

RB_barra=(cosd(lat+incl)*cosd(delta)*sind(hsslinha)+(pi/180)*hsslinha*sind(lat+incl)*
sind(delta))/(cosd(lat)*cosd(delta)*sind(hss)+(pi/180)*hss*sind(lat)*sind(delta));

end

end

function [r,rd,RB]=razoesr(h,hss,lat,delta,beta)

alfa=0.409+0.5016*sind(hss-60);

gama=0.6609-0.4767*sind(hss-60);

r=((pi/24)*(alfa+gama*cosd(h))*(cosd(h)-cosd(hss)))/(sind(hss)-((2*pi*hss)/360)*cosd(hss));

rd=((pi/24)*(cosd(h)-cosd(hss)))/(sind(hss)-((2*pi*hss)/360)*cosd(hss));

if lat>0

RB=(sind(lat-beta)*sind(delta)+cosd(lat-beta)*cosd(delta)*cosd(h))/(sind(lat)*sind(delta)
+cosd(lat)*cosd(delta)*cosd(h));

else

RB=(sind(lat+beta)*sind(delta)+cosd(lat+beta)*cosd(delta)*cosd(h))/(sind(lat)*sind(delta)
+cosd(lat)*cosd(delta)*cosd(h));

end

end

function Rbarra=Rbarra(razaoHDbarra,RBbarra,incl,rog)

Rbarra=(1-razaoHDbarra)*RBbarra+razaoHDbarra*((1+cosd(incl))/2)+rog*((1-
cosd(incl))/2);

end

```

```
function Rn=Rn(rdn, rn, razaoHD, RBn, incl, rog)
Rn=(1-(rdn/rn)*razaoHD)*RBn+((rdn/rn)*razaoHD)*((1+cosd(incl))/2)+rog*((1-
cosd(incl))/2);
end
```

4.8 - Produto transmitância absorptância

```
function talalfabarra=talalfabarra(lat, delta, Hbarra, razaoHDbarra, RBbarra, Rbarra, beta, rog)
h=0; %Meio dia - Média
%cálculo dos ângulos de incidência das radiações difusa e refletida
tetaB=acosd((cosd(lat+beta)*cosd(delta)*cosd(h))+(sind(lat+beta)*sind(delta)));
tetaD=59.68-0.1388*beta+0.001497*(beta^2);
tetaR=90-0.5788*beta+0.002693*(beta^2);
%cálculo do produto transmitância absorptância para radiação direta (B), difusa (D) e refletida
(R)
taualfaB=-8.7*10^-8*(tetaB^4)+1.03*10^-5*(tetaB^3)-0.0004762*(tetaB^2) +0.00851*tetaB
+0.94967;
taualfaD=-8.7*10^-8*(tetaD^4)+1.03*10^-5*(tetaD^3)-0.0004762*(tetaD^2) +0.00851*tetaD
+0.94967;
taualfaR=-8.7*10^-8*(tetaR^4)+1.03*10^-5*(tetaR^3)-0.0004762*(tetaR^2)+0.00851*tetaR
+0.94967;
if taualfaB>1
taualfaB=1;
end
if taualfaD>1
taualfaD=1;
end
if taualfaR>1
taualfaR=1;
```

end

%cálculo das radiações difusa e direta e sobre o coletor inclinado a partir da radiação global

HDbarra=razaoHDbarra*Hbarra;

HBbarra=Hbarra-HDbarra;

Htbarra=Hbarra*Rbarra;

%Cálculo da razão Produto Transmitância Absortância média sobre o Produto Transmitância Absortância Normal.

Talalfabarra = (Hbbarra/Htbarra) *Rbbarra *taualfaB +(Hdbarra/Htbarra) *taualfaD
*((1+cosd(beta))/2) + (Hbarra/Htbarra)*rog*taualfaR*((1-cosd(beta))/2);

end

4.9 - Parâmetros adimensionais

function [fimaxY,Xlinha,Rs]=fimax(MM, Kt, Rn, Rbarra, Tmin, Ta, rn, H0barra, Frtalalfa, FRUL, razaotalalfabarra, Hbarra, L, Vt)

mes = [31 28 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31];

n=mes(MM);

Xcmin=((FRUL*3600*(Tmin-Ta))/(FRtalalfa*razaotalalfabarra))/(rn*Rn*Kt*H0barra);

A=2.943-9.271*Kt+4.031*(Kt^2);

B=-4.345+8.853*Kt-3.602*(Kt^2);

C=-0.170-0.306*Kt+2.936*(Kt^2);

fimax=exp((A+(B*(Rn/Rbarra)))*(Xcmin+(C*(Xcmin^2))));

fimaxY=(fimax*FRtalalfa*razaotalalfabarra*n*Hbarra*10^6*Rbarra)/L;

Xlinha=(FRUL*100*n*24*3600)/L;

Rs=350/(Vt*4.19);

end