

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

APERFEIÇOAMENTO DE UM PROGRAMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL
PARA ANÁLISE DE SISTEMAS TÉRMICOS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA
POR ENERGIA SOLAR

Felipe Barin Pozzebon

2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

APERFEIÇOAMENTO DE UM PROGRAMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL
PARA ANÁLISE DE SISTEMAS TÉRMICOS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA
POR ENERGIA SOLAR

por

Felipe Barin Pozzebon

Dissertação de Mestrado

2009

APERFEIÇOAMENTO DE UM PROGRAMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL
PARA ANÁLISE DE SISTEMAS TÉRMICOS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA
POR ENERGIA SOLAR

por

Felipe Barin Pozzebon
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Aprovada por:

Prof. Dr. Samuel Luna de Abreu, CEFET, SC

Prof. Dra. Rejane de César Oliveski, UNISINOS

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer, PROMEC

Prof. Dr. Horácio Antônio Vielmo
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, fevereiro de 2009.

Dedico este trabalho aos meus pais Adasir e Maria de Lurdes por sua dedicação, preocupação e confiança em mim. À minha esposa, Cássia, pela sua ajuda, compreensão, amor e incentivo para alcançar este objetivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente ao meu orientador, Arno Krenzinger, por sua dedicação, compreensão e conhecimentos adquiridos em suas aulas e durante o trabalho realizado.

Agradeço ao secretário do PROMEC, Paulo Kuter, pela colaboração e dedicação aos assuntos de interesse dos alunos.

Também agradeço pelos amigos e colegas do laboratório de Energia Solar, Luis Vera, Alexandre Buhler, Giuliano Rampinelli, Rafael Haag, Fabiano Gasparin e César Prieb, pelos conhecimentos adquiridos, pela ajuda durante o trabalho, e por serem um exemplo de dedicação e comprometimento a ser seguido.

A todos que de alguma forma contribuíram para o início e a conclusão deste trabalho.

RESUMO

O potencial dos sistemas de aquecimento de água por energia solar no Brasil é excelente devido às características climáticas favoráveis do país. A performance destes sistemas é bastante influenciada também pelos materiais empregados e dimensões de seus equipamentos e componentes.

Diante do aquecimento global, a energia solar ganha maior atenção sendo umas das energias renováveis a ser empregada em grande escala para substituir alguns tipos de energias poluentes.

Neste trabalho, apresenta-se o aperfeiçoamento de um programa computacional para simulação de sistemas térmicos de aquecimento de água utilizando energia solar em regime de termossifão ou circulação forçada, programa este que teve seu desenvolvimento iniciado no âmbito do Laboratório de Energia Solar da UFRGS, chamado TermoSim, sendo esta sua versão 3.0. A partir desta versão este software é capaz de realizar simulações com seis diferentes possibilidades de arranjos combinados com o tipo de energia auxiliar utilizada: sistemas com coletores solares com energia auxiliar a gás de passagem, elétrico de passagem, elétrico interno ao tanque, elétrico em série na linha de consumo, a gás em série na linha de consumo, e sem energia auxiliar.

O programa é uma ferramenta de auxílio para estudos e análises de sistemas de aquecimento solar, com uma interface amigável e de fácil entendimento e utilização dos resultados. Além disso, esta nova versão permite também realizar simulações levando em conta as perdas de calor à noite, situação em que a circulação reversa pode ocorrer resultando na redução da eficiência, dependendo do sistema simulado.

Foram realizadas diversas simulações com os modelos matemáticos empregados e feitas comparações entre os sistemas utilizando dados climáticos da cidade de Caxias do Sul, no Rio Grande do Sul, determinando-se o sistema com a configuração mais eficiente para um dado perfil de consumo de água. Finaliza-se o trabalho com análises econômicas simples com o objetivo de prever o tempo de retorno do investimento, levando-se em conta o preço para tarifa de energia elétrica e as possíveis economias mensais com um sistema utilizando a energia solar.

ABSTRACT

The potential of solar water heating systems through solar energy in Brazil is excellent due to the climatic features of the country. The performance of these systems is highly influenced also by the materials used to build it and by the dimension of its equipments and components.

In face of global warming, solar energy gains more attention, since it's one of the renewable energy that will be largely used to replace some of the existing polluting types of energy.

This paper presents the improvement of a software that conducts simulations of water heating systems using solar energy in thermosiphon regime or forced circulation. TermoSim, as it is called, was initiated at the Solar Labs, and is in its version 3.0. The current version is capable of simulating 6 different arrangements' possibilities combined with auxiliary energy: systems with solar collectors with auxiliary energy with gas, electric energy, internal electric energy, electric energy in series with the consumption line, and no auxiliary energy.

The software is a tool to aid studies and analysis of solar heating systems, it has a friendly interface that is easy to comprehend and results are simple to use. Besides that, this version also allows simulations that consider heat losses at night, situation in which a reverse circulation can occur and mean efficiency loss, depending on the simulated system type.

There were many simulations with the mathematical models used and comparisons were made with the climatic data of the city of Caxias do Sul, in Rio Grande do Sul state, in Brazil. This way we were able to determine the system with the most efficient configuration for the simulated water consume profile. The paper is finalized with simple economic analyses with the intention of foreseeing the time for payback on the investment, taking into account the current prices for electrical energy in the simulated area and the possible monthly economy provided with the use of a solar energy heating system.

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação.....	2
1.2	Objetivos.....	5
1.3	Escopo da dissertação.....	5
2.	FUNDAMENTOS DA ENERGIA SOLAR TÉRMICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Características da radiação solar.....	7
2.2	Componentes de um sistema de aquecimento de água por energia solar.....	8
2.2.1	Coletores solares com tubos evacuados.....	8
2.2.2	Coletores solares planos.....	10
2.2.3	Reservatório térmico.....	12
2.2.4	Tubulações térmicas.....	14
2.2.5	Fonte de energia auxiliar.....	15
2.3	Sistemas de aquecimento de água com energia solar.....	16
2.3.1	Sistemas ativos.....	16
2.3.2	Sistemas passivos.....	17
2.4	Programas computacionais de simulação de sistemas térmicos.....	18
3.	PROGRAMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: TERMOSIM.....	21
3.1	Origem do programa.....	21
3.2	Estrutura do programa.....	23
3.2.1	Dados do coletor solar.....	25
3.2.2	Dados do reservatório térmico.....	26
3.2.3	Dados do perfil da demanda de água quente.....	27
3.2.4	Dados da geometria do sistema e tubulações hidráulicas.....	29
3.2.5	Dados do aquecedor auxiliar.....	30
3.2.5	Dados meteorológicos.....	33
3.2.6	Gráficos e relatórios.....	35
3.2.7	Parâmetros financeiros.....	39
4.	MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS NO PROGRAMA TERMOSIM.....	42
4.1	Modelagem matemática nos coletores solares.....	42
4.2	Modelagem no reservatório térmico.....	46
4.3	Modelagem do balanço energético das tubulações hidráulicas.....	51
4.4	Modelagem para circulação reversa.....	53
4.5	Modelagem para o aquecedor auxiliar.....	61

4.5.1	Sistema auxiliar elétrico interno	62
4.5.2	Sistema auxiliar em série	64
4.5.3	Sistema auxiliar em paralelo	65
4.5.4	Modelagem da análise econômica	66
5.	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	69
5.1	Procedimento para as simulações no TermoSim	69
5.2	Simulação anual para análise do comportamento energético dos sistemas.....	76
5.3	Análise de simulações com temporizadores.....	80
5.3.1	Análise de simulações com temporizadores pela variável de consumo.....	81
5.3.2	Análise de simulações com temporizadores de acordo com a radiação solar	87
5.3.3	Acionamento do temporizador de acordo com o horário matinal – fator 6-9h	89
5.4	Análise econômica dos sistemas de aquecimento de água.....	91
5.5	Influência do número de coletores no ganho de energia.....	95
5.6	Análise das perdas térmicas devido ao fluxo reverso em coletores solares planos	98
6.	CONCLUSÃO.....	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
	CONSULTAS	110

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Área do coletor	$[m^2]$
$A_{lateral}$	Área lateral das tubulações do aquecedor auxiliar	$[m^2]$
A_{mat}	Área da seção transversal da parede do reservatório	$[m^2]$
A_{reserv}	Área da superfície interna da parede do reservatório	$[m^2]$
C_{access}	Custo dos acessórios de uma instalação de aquecimento solar	$[R\$]$
$C_{água}$	Capacidade térmica da água	$[J/kg K]$
C_b	Condutância da solda entre chapas e tubos	$[W/m K]$
C_{cobre}	Capacidade térmica do cobre	$[J/kg K]$
C_{col}	Custos do coletor solar	$[R\$]$
$C_{consumo}$	Consumo de energia acumulado	$[kWh]$
C_{ef}	Capacidade térmica efetiva	$[J/kg K]$
C_{en}	Custo da energia elétrica	$[R\$]$
c_i	Funções de controle no modelamento do reservatório térmico	$[-]$
C_I	Custo inicial total	$[R\$]$
C_M	Taxa de manutenção anual	$[\%]$
C_p	Calor específico	$[kJ/kg K]$
C_{reserv}	Custos do reservatório de água quente	$[R\$]$
D	Diâmetro externo do tanque	$[m]$
d_i	Funções de controle no modelamento do reservatório térmico	$[-]$
D_{tub}	Diâmetro interno da tubulação	$[m]$
d_x	Coordenada espacial na direção do escoamento	$[-]$
E_{con}	Economias mensais	$[R\$]$
E_{isol}	Espessura do isolamento	$[m]$
f	Fator de atrito	$[-]$
F	Fator de eficiência para aletas	$[-]$
F'	Fator de eficiência do coletor solar	$[-]$
F_i	Funções de controle no modelamento do reservatório térmico	$[-]$
F_R	Fator de remoção do coletor solar	$[-]$
FTM	Valor acumulado pelas economias mensais.	$[R\$]$
g	Aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
G_i	Funções de controle no modelamento do reservatório térmico	$[-]$

G_T	Radiação solar incidente no plano inclinado	[W/ m ²]
h	Coeficiente de transferência de calor convectivo	[W/m ² K]
H	Altura do tanque	[m]
H_1	Distância vertical do nível do solo à entrada dos coletores	[m]
H_2	Distância vertical do nível do solo à saída dos coletores	[m]
H_3, H_5	Distância vertical do nível do solo à entrada de água quente no tanque	[m]
H_4	Distância vertical do nível do solo à base do tanque	[m]
H_6	Distância vertical do nível do solo ao topo do tanque	[m]
h_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção linearizado entre o absorvedor e o vidro	[W/m ² K]
H_{col}	Altura da tubulação de retorno da água quente proveniente dos coletores solares	[m]
H_f	Perda de carga	[m]
H_i	Altura para uma camada i no reservatório térmico.	[m]
h_r	Coeficiente de transferência de calor por radiação	[W/m ² K]
$h_{r,c-a}$	Coeficiente de transferência de calor por radiação linearizado entre o vidro e o ambiente	[W/m ² K]
$h_{r,p-c}$	Coeficiente de transferência de calor por radiação térmica linearizado entre o absorvedor e o vidro	[W/m ² K]
H_t	Carga de termossifão induzida	[m]
h_w	Coeficiente de transferência de calor por convecção com exterior	[W/m ² K]
I_T	Irradiância solar incidente na superfície inclinada do coletor	[W/ m ²]
k	Condutividade térmica do material	[W/m K]
$k_{\text{água}}$	Condutividade térmica da água	[W/m K]
k_{ar}	Condutividade térmica do ar	[W/m K]
k_e	Condutividade térmica efetiva	[W/m K]
k_{isol}	Condutividade térmica do material isolante	[W/m K]
k_{mat}	Condutividade térmica do material	[W/m K]
K_p	Coeficiente próprio do elemento causador da perda de carga	[m]
L	Comprimento do conduto fechado (tubulação)	[m]
L_C	Comprimento do coletor solar	[m]
L_{col}	Largura do coletor	[m]
L_{isol}	Espessura do material isolante	[m]
$M_{\text{água}}$	Massa de água	[kg]

\dot{m}_c	Vazão mássica do fluido que circula no sistema	[kg/s]
M_{cobre}	Massa de cobre	[kg]
\dot{m}_{cons}	Vazão mássica de consumo de água	[kg/s]
\dot{m}_d	Vazão mássica da demanda	[kg/s]
$m_{\text{gás}}$	Vazão nominal do gás	[m ³ /min]
M_i	Massa da camada i	[kg]
NM	Número de meses simulados	[-]
n_r	Número de camadas definidas para o reservatório	[-]
NT	Número de tubos do coletor	[-]
n_t	Número de tubos do coletor solar	[-]
Nu	Número de Nusselt	[-]
OeM	Custo de operação e manutenção de uma instalação de aquecimento solar	[R\$]
PC	Poder calorífico	[J/m ³]
P_{erdas}	Perdas térmicas nas tubulações	[W]
P_{res}	Potência da resistência elétrica	[W]
$Q_{\text{água}}$	Energia utilizada para aquecimento da água na temperatura de consumo	[J]
Q_{aux}	Potência fornecida pelo aquecedor auxiliar	[W]
Q_c	Taxa de transferência de calor por convecção externa	[W]
$Q_{\text{gás}}$	Energia do gás utilizada para aquecer a água	[J]
Q_p	Perdas térmicas no coletor	[W]
Q_r	Taxa de transferência de calor por radiação	[W]
Q_{tub}	Perdas térmicas nas tubulações conectadas aos coletores	[W]
Q_u	Energia útil proveniente dos coletores solares	[J]
Re	Numero de Reynolds	[-]
S	Radiação solar absorvida pelos coletores solares	[W]
SG	Massa específica relativa para água	[-]
T	Temperatura média do fluido dentro do coletor	[°C]
T_a	Temperatura ambiente	[°C]
t_{ac}	Tempo de acionamento	[s]
T_{aux}	Temperatura após acionamento do aquecedor auxiliar	[°C]
T_{base}	Temperatura da água na base do reservatório	[°C]
$T_{\text{col}(t)}$	Temperatura média do coletor do tempo t	[°C]
$T_{\text{col}(t+\Delta t)}$	Temperatura média do coletor no incremento de tempo $t+\Delta t$	[°C]

T_d	Temperatura de água quente para o consumo	[°C]
T_e	Temperatura de entrada da água no coletor	[°C]
T_{ent}	Temperatura de entrada no aquecedor auxiliar	[°C]
T_i	Temperatura da água na camada i do reservatório	[°C]
T_m	Temperatura média da água no reservatório	[°C]
T_p	Temperatura da placa absorvedora	[°C]
T_r	Temperatura de água fria de reposição no tanque	[°C]
T_s	Temperatura de saída da água no coletor	[°C]
T_{sky}	Temperatura do céu	[°C]
UA	Coefficiente global médio de transferência de calor	[W/K]
U_b	Perdas na parte traseira do coletor	[W/m K]
U_e	Perdas para as laterais do coletor	[W/m K]
U_i	Coefficiente global de perdas na camada i	[W/m K]
U_L	Coefficiente global de perdas térmicas dos coletores para o ambiente	[W/m K]
UP_{TUB}	Coefficiente de perdas global médio da tubulação	[W/m K]
U_T	Perdas de energia pelo topo do coletor	[W/m K]
v	Velocidade do escoamento	[m/s]
V_{res}	Valor residual do sistema solar de aquecimento ao final da vida útil	[R\$]
W	Distância entre os centros de dois tubos consecutivos	[m]
y	Coordenada espacial ao longo da tubulação na direção do escoamento do fluido	[m]
Y_{tub}	Comprimento dos tubos do coletor	[m]

Caracteres gregos

\varnothing_{ext}	Diâmetro externo do tubo	[m]
\varnothing_{int}	Diâmetro interno do tubo	[m]
α	Absortância	[-]
δ	Espessura dos tubos	[m]
δ_{col}	Espessura do absorvedor	[m]
ΔT	Varição de temperatura	[°C]
δ_{Tbo}	Espessura do tubo	[m]
η_{aq}	Rendimento do aquecedor	[-]
ι	Espessura do isolamento lateral	[m]

λ	Perímetro do coletor	[m]
$\rho_{\text{água}}$	Massa específica da água	[kg/m ³]
ρ_{cobre}	Massa específica do cobre	[kg/m ³]
τ	Transmitância	[-]
$\tau\alpha$	Produto transmitância-absortância	[decimal]

Nomenclatura

a , b	Índices definidos como constantes de distribuição da água entre as camadas do tanque.
EF	Fator para cálculo da degradação de energia térmica nas tubulações por atrito e conexões
LCW	Camada do tanque cuja altura é a mais próxima da entrada da água quente proveniente dos coletores solares.
LCW _{eq}	Camada de equilíbrio do tanque onde a temperatura é mais próxima daquela de entrada da água quente.
LSW	Camada do tanque onde a altura é mais próxima da posição de entrada da água fria oriunda da rede.
LSW _{eq}	Camada do tanque cuja temperatura é mais próxima daquela de entrada da água fria.
OeM	Operação e Manutenção
TIR	Taxa interna de retorno
TUB2-3	Tubulação localizada entre a saída do fluido aquecido dos coletores e sua entrada no reservatório térmico
TUB4-1	Tubulação que liga a saída da água do fundo do tanque com sua entrada nos coletores solares

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Matriz energética.....	02
Figura 1.2 Aplicações da energia solar.....	03
Figura 1.3 Uso da energia elétrica nas residências no Brasil.....	04
Figura 2.1 Coletor solar de tubos evacuados.	09
Figura 2.2. Componentes de coletor evacuado tipo <i>heat pipe</i>	10
Figura 2.3. Componentes principais de um coletor plano.	11
Figura 2.4. Configurações utilizadas para sistema auxiliar de aquecimento.	15
Figura 2.5. Esquema de um sistema ativo.	17
Figura 2.6. Esquema de um sistema operando por termossifão.	17
Figura 3.1. Diagrama dos programas formados pelo grupo SolarCad.	21
Figura 3.2. Menu dos principais módulos do programa.	24
Figura 3.3. Tela inicial do software que permite a escolha do sistema térmico a simular...	24
Figura 3.4. Módulo de entrada de dados do coletor solar plano e gráfico de eficiência instantânea.	25
Figura 3.5. Entrada de dados do reservatório térmico.	26
Figura 3.6. Perfil de consumo de água.	28
Figura 3.7. Entrada de dados das tubulações do sistema.	29

Figura 3.8. Tela para definição dos parâmetros geométricos da instalação.	30
Figura 3.9. Parâmetros para um sistema de apoio a gás.	31
Figura 3.10. Parâmetros da resistência elétrica para apoio auxiliar elétrico.	32
Figura 3.11. Tela inicial do programa de dados climáticos: SeqMetBr.	34
Figura 3.12. Formulário para seleção dos dados meteorológicos da cidade desejada a simular.	35
Figura 3.13. Interface para análise gráfica das simulações executadas.	36
Figura 3.14. Relatório tipo tabela gerado através da simulação realizada.	37
Figura 3.15. Relatório tipo gráfico de barras mensal gerado através da simulação realizada.	38
Figura 3.16. Relatório tipo gráfico de barras anual gerado através da simulação realizada.	38
Figura 3.17. Relatório tipo resumo dos resultados da simulação realizada.	39
Figura 3.18. Parâmetros financeiros.	40
Figura 3.19. Relatório do resumo financeiro.	41
Figura 4.1. Balanço térmico no reservatório de água quente.	47
Figura 4.2. Representação das camadas do tanque estratificado.	49
Figura 4.3. Perfil de temperatura das camadas de um tanque de armazenamento.....	50

Figura 4.4. Perfil de temperatura em um reservatório ao longo de um dia.....	50
Figura 4.5. Representação geométrica das alturas do sistema.....	54
Figura 4.6. Diagrama do algoritmo de cálculo para circulação reversa.	55
Figura 4.7. Perdas térmicas por radiação e convecção.	56
Figura 4.8. Circuito do sistema de termossifão simulado.	58
Figura 4.9. Representação esquemática do aquecedor auxiliar: a) resistência elétrica de passagem ou gás de passagem; b) resistência elétrica interna; c) resistência elétrica de passagem ou gás de passagem pré-aquecendo o tanque em paralelo.	61
Figura 4.10. Algoritmo de programação para o cálculo do acionamento dos temporizadores.	63
Figura 5.1. Diagrama dos dados de entrada e saída para os modelos de uma simulação. ..	70
Figura 5.2. Diagrama simplificado da geração dos dados meteorológicos.	70
Figura 5.3. Algoritmo de programação simplificado da simulação do programa.	71
Figura 5.4. Radiação solar incidente nos coletores solares no verão, com inclinação de 45°.	72
Figura 5.5. Radiação solar incidente nos coletores solares no inverno, com inclinação de 45°.	73
Figura 5.6. Radiação solar inclinada anual na cidade de Caxias do Sul.	74
Figura 5.7. Representação da geometria para um sistema com aquecimento auxiliar em paralelo.	77

Figura 5.8. Representação da geometria para um sistema com aquecimento auxiliar em série com o consumo.	77
Figura 5.9. Gráfico do consumo de energia auxiliar dos sistemas simulados.	78
Figura 5.10. Energia desperdiçada nos sistemas simulados.	79
Figura. 5.11. Perfil de temperatura de temporizador variável com consumo para 3 dias de inverno.	81
Figura. 5.12. Perfil de temperaturas para temporizador variável com consumo para 2 dias de verão.	82
Figura. 5.13. Perfil anual da utilização de temporizadores em sistema a gás.	83
Figura. 5.14. Perfil de temperaturas para temporizador com variável de consumo para 2 dias de verão.	84
Figura. 5.15. Sistema com temporizador com variável de consumo para 2 dias de inverno.	84
Figura. 5.16. Perfil anual de energia com temporizadores em sistema auxiliar elétrico em paralelo.	85
Figura. 5.17. Perfil de temperaturas para temporizador variável de consumo para 2 dias de verão.	86
Figura. 5.18. Perfil de temperaturas para temporizador variável de consumo para 2 dias de inverno.	86
Figura. 5.19. Perfil anual de energia na utilização de temporizadores em sistema auxiliar elétrico com resistência interna no tanque.	87
Figura. 5.20. Energia gasta com temporizador para baixa radiação.	88

Figura. 5.21. Comportamento no sistema auxiliar a gás em paralelo externamente ao tanque para cinco dias de verão.	89
Figura. 5.22. Energia auxiliar para temporizador não liga entre 6-9 horas da manhã.	90
Figura. 5.23. Perfil de consumo vespertino para sistema auxiliar a gás em paralelo externo.	90
Figura. 5.24. Taxa de retorno anual e economia mensal para sistema solar com energia de apoio elétrica.	93
Figura. 5.25. Taxa de retorno anual e economia mensal para sistema solar com energia de apoio a gás.	93
Figura. 5.26. <i>Payback</i> para sistema solar com energia de apoio elétrica.	94
Figura. 5.27. <i>Payback</i> para sistema solar com energia de apoio a gás.	95
Figura. 5.28. Comparação energética para os sistemas simulados com 4 coletores solares.	96
Figura. 5.29. Comparação energética entre os sistemas simulados com 6 coletores solares.	97
Figura. 5.30. Comparação energética entre os sistemas simulados com 8 coletores solares.	97
Figura. 5.31. Circuito do sistema de termossifão simulado.	99
Figura. 5.32. Vazão da circulação reversa na condição de temperatura do tanque 80°C. ...	99
Figura. 5.33. Perdas pela circulação reversa na condição de temperatura do tanque a 80°C.	99

Figura 5.34. Distribuição de temperaturas no reservatório nas duas configurações simuladas.	100
Figura 5.35. Vazão do sistema ao longo do dia.	101
Figura. 5.37. Distribuição de temperaturas no reservatório com perfil de consumo diário. $H_1=1\text{m}$ e $H_2=200\text{ mm}$	102
Figura. 5.39. Eficiência dos sistemas para cinco dias de Janeiro.	102

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Estrutura dos sistemas do programa TermoSim.	22
Tabela 2. Propriedades características dos materiais do tanque e isolantes térmicos.....	27
Tabela 3. Dados da instalação de um sistema de aquecimento de água por energia solar....	75
Tabela 4. Dados dos aquecedores auxiliares.	76
Tabela 5. Parâmetros das simulações.	76
Tabela 6. Consumo de energia auxiliar anual dos sistemas simulados em MJ.....	80
Tabela 7. Tarifas médias por classe de consumo / região.....	91
Tabela 8. Parâmetros financeiros utilizados.	92
Tabela 9. Especificações técnicas do sistema solar simulado.	98

1. INTRODUÇÃO

O constante uso de combustíveis fósseis até os dias atuais tem causado várias consequências para nosso meio ambiente. O aumento da temperatura global, com dias muito quentes, alteração dos regimes das chuvas, retração de geleiras, aumento de emissões de CO₂ e gases responsáveis pelo efeito estufa, caracterizaram o final do século XX.

Pesquisas apontam para uma nova tendência energética com inclusão das energias renováveis como fonte alternativa, destacando-se principalmente a eólica, a solar térmica e fotovoltaica, PCH's e biomassa. A energia eólica já se apresenta economicamente viável no cenário mundial e no Brasil. Aqui, programas como o PROINFA, são formas de importantes incentivos dos governos.

A energia solar térmica, apesar de parecer ser uma tecnologia simples, se confronta com os altos custos de seus materiais para obter melhores eficiências na conversão da energia. As PCH's, já bastante difundidas principalmente no Brasil com seu vasto potencial hidroelétrico, assumem papel importante para a economia e no abastecimento de energia elétrica localizado em regiões estratégicas. Por sua vez, a biomassa vem a cada dia sendo mais divulgada na mídia como uma opção barata e ecologicamente correta, e a tendência para o futuro é um aumento muito grande na sua aplicação em termelétricas e para produção de combustíveis.

Enfim, a utilização das energias renováveis é certamente bastante vantajosa para o meio ambiente e deverá ser economicamente viável para todos estes tipos de tecnologia, pois além de serem praticamente inesgotáveis, e com impacto ambiental quase inexistente, facilitam a chegada da energia elétrica em comunidades afastadas e podem diminuir a demanda nos horários de pico de energia.

O Brasil é favorecido por concentrar fontes naturais de tais energias, porém ainda investe muito pouco em relação ao potencial eólico e solar de sua geografia. A Fig. 1.1 mostra o estágio atual das energias renováveis no mundo e no Brasil, demonstrando que a matriz energética brasileira já possui uma parcela grande de utilização dos recursos renováveis em relação aos países Europeus e da América do Norte.

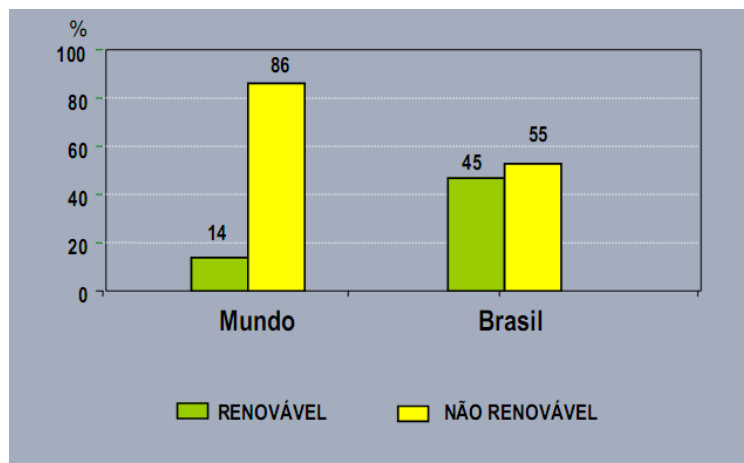


Figura 1.1 Matriz energética. CEPEL (2008).

Interessante notar que, apesar de o Brasil não ser um investidor arrojado nas energias alternativas, apresenta uma matriz energética de renováveis invejável para qualquer país de primeiro mundo. Isto se deve à história política do país que definiu como base energética a construção de centrais hidrelétricas. Atualmente, da oferta de energia elétrica no Brasil, 75% advém de hidrelétricas. Sendo esta uma fonte renovável de energia, o Brasil desponta como um dos principais colaboradores na luta contra o aquecimento global.

1.1 Motivação

Sabe-se que o potencial de energias alternativas é muito grande e, além da hidrelétrica, destaca-se a solar. Analisando a disponibilidade da energia solar no Brasil segundo Martins *et al* (2007), por exemplo, o fluxo de radiação solar global incidente no território brasileiro é superior ao de países da União Européia, onde projetos para aproveitamento de recursos solares são disseminados.

No que se refere à energia solar térmica, esta pode ser otimizada para aquecimento de água, de ambientes, secagem de sementes e em processos industriais, como co-geração energética em termelétricas, ou no que se refere à conversão fotovoltaica, utilizada para geração de energia elétrica com painéis fotovoltaicos, conforme sugere a Fig. 1.2.

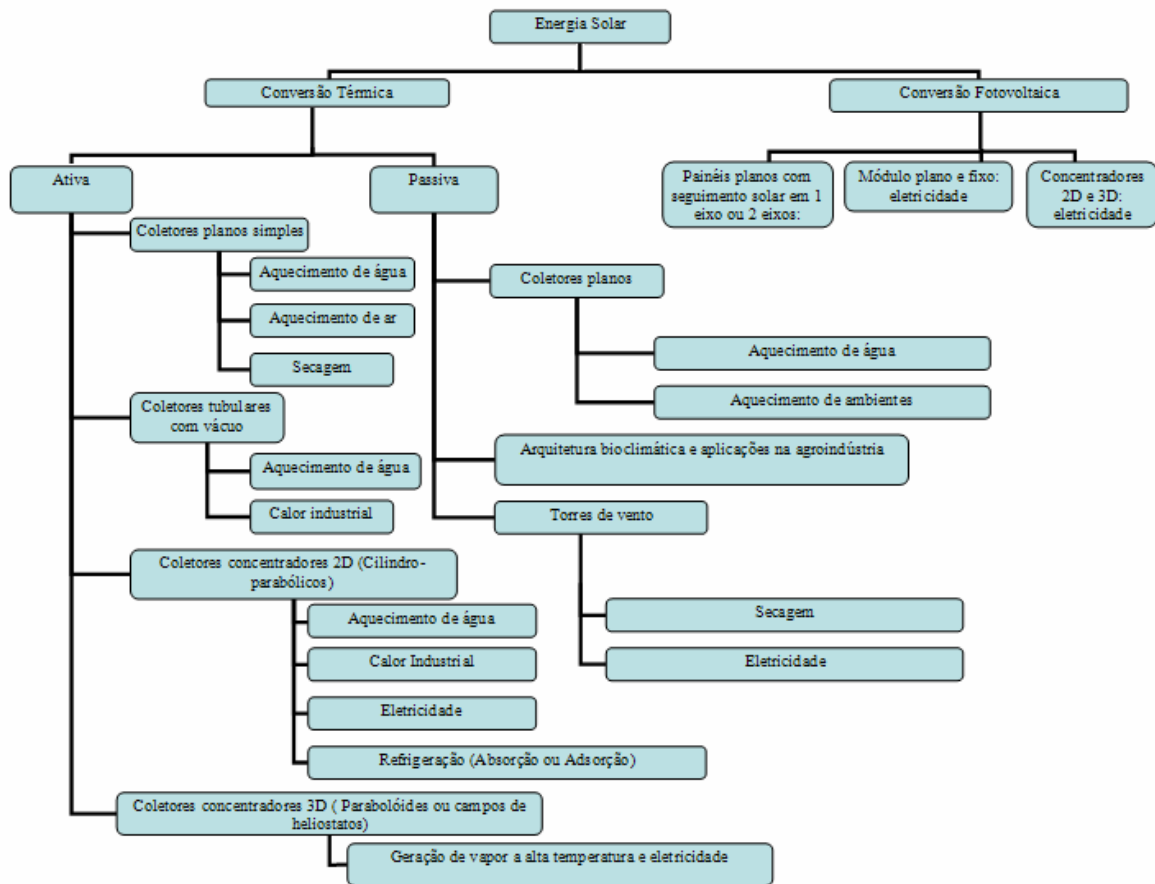


Figura 1.2. Exemplos de aplicações da energia solar.

O aquecimento de água por energia solar, tema desta dissertação tratada, é a tecnologia solar mais consolidada e desenvolvida segundo a WEC – *World Energy Council* (Conselho Mundial de Energia, com sede em Londres, comitês em mais de 100 países, e principal entidade no mundo hoje que abrange todos os tipos de energia). Entretanto, seus custos iniciais são maiores que os custos de um sistema de aquecimento elétrico convencional.

Em resposta a este problema, muitos países, estados e cidades estão adotando leis e mecanismos para facilitar o acesso e incentivar maior utilização de aquecimento com coletores solares. No Brasil, há entidades como a ONG Cidades Solares que, com campanhas do tipo *Ligando em Energia Solar*, procuram disseminar as boas práticas do uso da tecnologia de aquecimento solar residencial, dando suporte as leis que tornam obrigatório o uso de coletores solares em novas edificações, já vigente em algumas das principais cidades brasileiras, como São Paulo.

De acordo com o CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), do Grupo Eletrobrás, o Brasil possui a sétima maior área de coletores solares instalados no mundo, com 3,1 milhões de m², sendo 84% no setor residencial, 15% no setor terciário (hotéis e serviços) e 1% no setor industrial.

A Fig. 1.3 apresenta como as pessoas usam energia elétrica de um modo geral nas residências brasileiras.

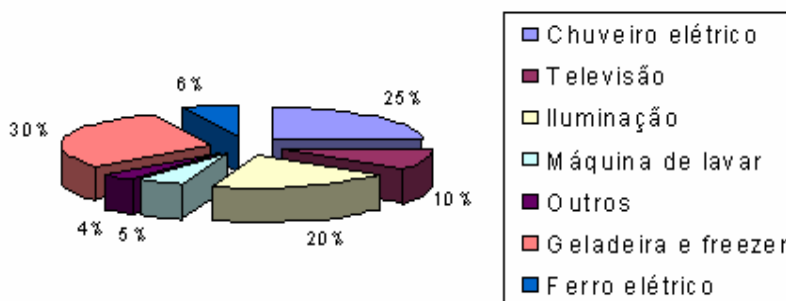


Figura 1.3. Uso da energia elétrica nas residências no Brasil. Fonte: CEPEL (2008).

Naspolini (2008) destaca que o aquecimento de água utilizando chuveiro elétrico está presente em 67% das moradias, atingindo cerca de 18 milhões de famílias, e representa, em média, 23% do consumo da energia por moradia. Assim, pode ser considerado um dos grandes vilões da economia de energia. Vale destacar que cada kWh que deixa de ser consumido no chuveiro elétrico levaria à redução de emissão de aproximadamente 0,6 kg de CO₂ nas novas usinas termelétricas acionadas por gás natural.

Como conclusão, a substituição da energia elétrica pela solar para o aquecimento de água colabora com o meio ambiente ao mesmo tempo em que torna possível uma considerável economia de energia elétrica, sendo assim de grande interesse e aproveitamento o seu estudo.

Uma das principais atividades que se desenvolve com relação a este tipo de energia são as pesquisas acadêmicas. A Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS -, em alinhamento atual às novas políticas do governo brasileiro adotadas em grandes cidades brasileiras, trabalha com linhas de pesquisa em energia solar térmica, fotovoltaica e radiação solar, juntamente com o desenvolvimento de softwares para análise e de modelos matemáticos

apropriados à simulação computacional dos sistemas de aproveitamento da energia solar e seus componentes.

Esta dissertação segue a linha de pesquisa na área térmica para aquecimento de água pela energia solar, cuja contribuição é a finalização de um software de energia térmica para análise do comportamento térmico de instalações de coletores solares para o território brasileiro, que deverá ser uma ferramenta disponível para pesquisadores, estudantes e interessados na ajuda ao entendimento e estudos para cada tipo de configuração de instalação no programa definidos.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é a finalização do programa existente TermoSim, que no início deste trabalho se apresentava incompleto para sua aplicação e disponibilização ao usuário.

O objetivo específico do trabalho é realizar estudos do comportamento térmico de diferentes configurações de instalações de coletores solares planos para aquecimento de água residencial.

Caracterizam-se como itens para cumprimento dos objetivos gerais e específicos:

- Corrigir os erros de programação e tornar o programa pré-existente na linguagem Visual Basic executável para simulações;
- Revisar os modelos matemáticos empregados e aplicar correções se necessário;
- Desenvolver modelagens matemáticas e análises para o fenômeno da circulação reversa que pode ocorrer nos coletores solares à noite;
- Incluir modelagem matemática e análises para o aquecimento auxiliar elétrico e a gás para as configurações com apoio elétrico interno ao reservatório, com apoio elétrico e a gás em série com a linha de consumo;
- Desenvolver algoritmos para cálculo do comportamento térmico das instalações com utilização de temporizadores como sistema de controle do acionamento das energias auxiliares.
- Incluir modelagem econômica simples para análises dos diferentes tipos de configuração.

1.3 Escopo da dissertação

Além desta introdução, a presente dissertação está distribuída em mais cinco capítulos com os conteúdos descritos a seguir:

- O capítulo 2 aborda os conceitos fundamentais da energia solar térmica e pesquisa bibliográfica descrevendo os principais componentes de um sistema de aquecimento de água residencial, os principais sistemas utilizados e programas de simulação conhecidos desta área térmica;
- O capítulo 3 apresenta o programa TermoSim desenvolvido, descrevendo sua estrutura e interfaces de funcionamento: dados do coletor, dados do reservatório, dados do aquecedor auxiliar, dados da geometria, dados do perfil de água quente, dados meteorológicos, gráficos e relatórios e parâmetros financeiros;
- O capítulo 4 descreve os modelos matemáticos aplicados no programa TermoSim, balanços energéticos e algoritmos de programação;
- O capítulo 5 apresenta a metodologia das simulações aplicadas, os dados das variáveis adotadas e as análises e discussões dos resultados obtidos;
- O capítulo 6 apresenta as conclusões finais desta dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTOS DA ENERGIA SOLAR TÉRMICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um sistema de aquecimento solar é composto por coletores solares, um reservatório térmico, tubulações para circuito de circulação da água, controles eletrônicos e, em muitos casos, de um sistema de apoio auxiliar de energia. O projeto para aquecimento de água é fundamental para um melhor rendimento final do sistema, pois diversas variáveis, como tipo de isolamento térmico, materiais utilizados, controladores de vazão, posicionamento da instalação dentre outros parâmetros, afetam sensivelmente o seu desempenho.

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos teóricos da energia solar térmica para aquecimento de água em conjunto com uma pesquisa bibliográfica neste assunto, listando os principais trabalhos na área relevantes à dissertação.

2.1 Características da radiação solar

A principal fonte de energia de nosso planeta é o Sol. Suas constantes reações internas produzem uma quantidade de energia a altas temperaturas que são transferidas e irradiadas para o espaço chegando à superfície terrestre.

Para se utilizar de modo eficiente e otimizado a radiação solar como fonte de energia, é necessário conhecer suas características, bem como as das superfícies que estarão sendo usadas como absorvedores desta energia, transformando-a em energia útil.

O Sol é constituído de gases, principalmente o hidrogênio, e pode-se aproximar o comportamento da radiação emitida por ele ao de um corpo negro de temperatura de aproximadamente 5777 K. A energia recebida, por unidade de tempo, no topo da atmosfera terrestre, é denominada de constante solar ou radiação extra-terrestre, e assume o valor de 1367 W/m². Segundo Duffie e Beckman (1991), como a distância entre a Terra e o Sol varia durante os dias do ano, gera-se uma variação em torno de 3% no fluxo de energia que chega em nossa atmosfera.

A irradiância solar incidente em uma determinada superfície de nosso planeta, por exemplo, na superfície de um coletor solar, ao atravessar as camadas da atmosfera terrestre, parte da radiação é absorvida, refletida e dispersa por constituintes da atmosfera como poeira, ar, nuvens, vapor d'água e aerossóis.

Para calcular a radiação solar incidente é necessário o conhecimento dos parâmetros de localização da superfície desejada (latitude e longitude) e a aplicação de relações matemáticas para encontrar a radiação incidente em qualquer hora do dia. Dessa forma obtém-se a

distribuição média mensal extra-terrestre, com as parcelas determinadas de radiação direta e difusa, conforme apresentado por Duffie e Beckman (1991) e que serão apresentados nesta dissertação nos modelos matemáticos dos coletores solares.

Atualmente, o principal equipamento utilizado para conversão térmica da energia do Sol são os coletores solares. Basicamente, um tanque com isolamento térmico, e uma placa absorvedora com vidro na cobertura caracterizam uma instalação de coletores solares para a absorção da radiação solar. Sua utilização, com os avanços da tecnologia e preços mais acessíveis, está se popularizando juntamente com outras formas de energia renováveis. No Brasil, estão em desenvolvimento bases legais com fins de garantir e difundir a utilização da energia solar térmica nas residências brasileiras.

2.2 Componentes de um sistema de aquecimento de água por energia solar

O processo de aquecimento da água para fins de uso na cozinha, no banho, na piscina, etc, ocorre com a energia do sol absorvida por uma placa, chamada de absorvedor, componente do coletor solar, transformando-se em calor que aquece a água que está percorrendo o interior dos tubos no coletor. A água quente, por ser mais leve, começa a se movimentar sempre para a parte superior dos coletores, dando início à circulação da água, que dura enquanto houver irradiância solar.

Os equipamentos necessários para que este fenômeno aconteça, buscando sempre melhor eficiência, como as tubulações, o reservatório de água, o coletor solar, chuveiro, entre outros, constituem o sistema de aquecimento de água por energia solar.

2.2.1 Coletores solares com tubos evacuados

O coletor solar é o equipamento responsável pela absorção e transferência de calor para o fluido de trabalho, geralmente, a água. O aumento do mercado de aquecedores solares nestes últimos anos promoveu o desenvolvimento de novas tecnologias e a fabricação em larga escala da produção.

Há dois principais tipos de coletores solares utilizados: o coletor plano, mundialmente mais empregado, e os coletores a vácuo, com mercado crescente pela sua boa performance e baixas perdas, principalmente aplicado em climas mais frios.

Os coletores solares com tubos evacuados vem a ser uma tecnologia para se obter melhor eficiência que os coletores solares planos, especialmente nos casos em que há necessidade de

temperaturas elevadas da água e em climas frios. Há modelos diferenciados sendo produzidos com esse conceito, dentre os quais o *water in glass* e o *heat pipe*.

Bastante presente e fabricado na China, o coletor do tipo *water in glass*, conforme Fig. 2.1, é configurado de forma que todos os tubos de vácuo estejam inseridos diretamente no reservatório térmico horizontal. A troca de calor é realizada com o regime de termossifão e, segundo Morrison (2004), a principal limitação deste sistema é que só pode ser usado para sistemas de baixas pressões.

Entretanto, Morrison (2006) desenvolveu uma metodologia para simulação da eficiência desse tipo de coletor e comparou com coletores solares planos. E no final, concluiu que um sistema com 30 tubos evacuados operando em Sidney, Austrália, apresentou uma economia de energia pouco menor que os coletores planos, além de ter apresentado menor sensibilidade ao tamanho do tanque que os mesmos.



Figura 2.1 Coletor solar de tubos evacuados. Fonte: Morrison (2006).

Outra aplicação de tubulação envolvida por tubos a vácuo é o sistema tipo *heat pipe*. Seu conceito, definido por Dunn e Reay (1976), é muito similar com o do termossifão, porém é constituído de um tubo de calor envolvido por um tubo de vácuo. Com o ar retirado, eliminam-se as perdas por convecção e condução, restando apenas as perdas por radiação que são minimizadas com o uso de superfícies seletivas. De acordo com estudos da NREL - *National Renewable Energy Laboratory* – (2004), os coletores com tubo de calor funcionam como um diodo térmico, no qual sem a presença do sol as perdas térmicas da água são mantidas num valor mínimo. Isso se deve ao fato de que o calor é perdido apenas no cabeçote (*header*), que deve

estar isolado termicamente, e não na superfície absorvedora. Na Fig. 2.2 apresenta-se o princípio de funcionamento de um sistema *heat pipe*.

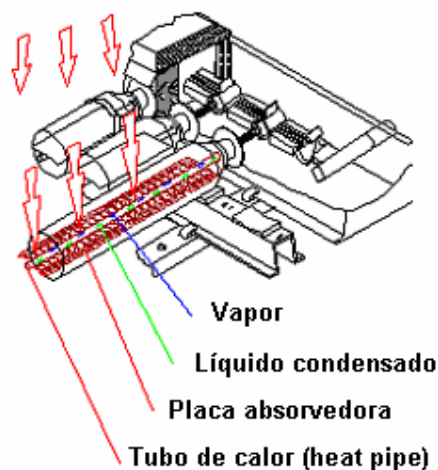


Figura 2.2. Componentes de coletor evacuado tipo *heat pipe*. Fonte: NREL (2004).

Também é muito comum a utilização de refletores abaixo dos tubos de vácuo – concentradores - para maximizar a absorção da radiação solar incidente. A água é rapidamente aquecida dentro do tubo de aquecimento e, como não há fluido no tubo de vácuo, não há falhas de funcionamento em um inverno rigoroso. A descrição deste tipo de coletor solar não será tratado como objeto de estudo neste trabalho.

2.2.2 Coletores solares planos

Os coletores planos podem ser classificados em dois grupos: coletores abertos e coletores fechados.

Os coletores abertos não utilizam cobertura de vidro no coletor. Geralmente operam em baixas temperaturas de aquecimento, em torno dos 30°C. A utilização da cobertura de vidro e isolamento limitam a influência da ação do vento no rendimento, ou seja, sem cobertura o coletor solar torna-se muito sensível à velocidade do vento. Por outro lado, para fins de temperaturas próximas à ambiente, o coletor solar sem cobertura apresenta vantagens, com bom desempenho e menor custo de investimento.

O coletor solar plano convencional, objeto de estudo nesta dissertação, é formado pelos seguintes componentes: caixa externa, tubos de cobre (também denominados por *headers* e

risers), material isolante, placa absorvedora e tinta preta, cobertura de vidro transparente e vedação. A Fig. 2.3 apresenta um coletor plano e detalhes de seus componentes principais.

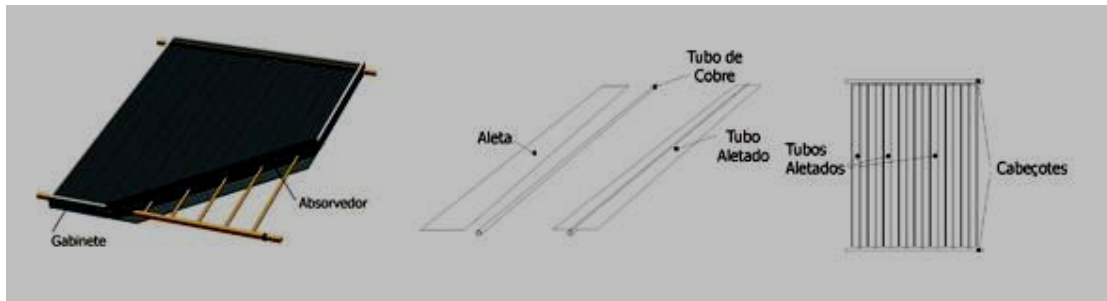


Figura 2.3. Componentes principais de um coletor plano. Fonte: www.solaresonline.com.br

O cálculo básico para determinar a energia útil produzida (Q_u) por um coletor de área A_c , por unidade de tempo, é dado pela diferença entre a radiação solar absorvida (S) e as perdas térmicas, conforme é representado pela Eq. (2.1).

$$Q_u = A_c (S - U_L (T_p - T_a)) \quad (2.1)$$

A radiação solar absorvida é calculada pela multiplicação da radiação solar incidente no plano pelo produto transmitância-absortância ($\tau\alpha$), sendo que U_L é o coeficiente global de perdas térmicas do coletor, T_p é a temperatura da placa absorvedora e T_a é a temperatura ambiente.

Pela dificuldade de se medir e calcular a temperatura da placa absorvedora, é conveniente definir a quantidade de ganho de energia do coletor pelo ganho na situação em que a temperatura da placa absorvedora do coletor estiver na mesma temperatura do fluido de entrada. Faz-se então uma correção deste valor, portanto, com um fator de correção denominado F_R . Por sua vez, este fator, definido por Duffie e Beckman (1991), é uma função das dimensões, parâmetros físicos conhecidos do coletor, como diâmetro interno dos tubos, condutividade e espessura da solda, coeficiente de transferência de calor entre o fluido e a parede do tubo, assim como vazão, coeficiente global de perdas e área do coletor.

A medida da eficiência de um coletor plano é definida na Eq. (2.2) como a razão do ganho útil de energia em um determinado período de tempo pela radiação solar incidente, G_T , no mesmo período de tempo dt .

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G_T dt} \quad (2.2)$$

A norma ABNT NBR 10184 (1988) estabelece os procedimentos para a determinação da eficiência instantânea do coletor e propõe que os testes sejam realizados o mais próximo das condições reais de operação, estabelecendo métodos experimentais, incertezas de medições e condições meteorológicas.

2.2.3 Reservatório térmico

O reservatório térmico é destinado ao armazenamento da água aquecida pelos coletores solares durante o dia. Usualmente é fabricado em aço inoxidável, galvanizado ou cobre, entre outros, e deve possuir um eficiente isolamento térmico para minimizar as perdas para o ambiente, principalmente no período noturno. Em alguns casos, utiliza-se uma fonte auxiliar de energia para a manutenção de sua temperatura, como em dias de pouco sol ou situações em que ocorre maior consumo de água que o projetado.

Para instalações de aquecimento solar com capacidade superior a 1500 litros, recomenda-se a utilização de um sistema de bombeamento para circulação da água entre os coletores e o reservatório térmico.

Lourenço (2000) realizou experimentos avaliando a curva de resfriamento nos reservatórios térmicos e os efeitos das conexões de cobre na parte superior e inferior, estimando experimentalmente o coeficiente global de transferência de calor (UA).

Vieira (2001) estudou as estratégias para minimizar o consumo de energia elétrica no apoio a sistemas de aquecimento solar. Dentre suas conclusões, afirma que tanques pequenos resultam em temperaturas mais altas, trazendo como consequência um funcionamento menos eficiente dos coletores solares e um maior consumo de energia elétrica. Ao mesmo tempo, o consumo de energia elétrica depende da relação entre a área dos coletores, do volume do reservatório e do consumo de água quente. Também a proporção do reservatório em relação ao volume de água consumido afeta a posição da resistência elétrica, casos em que o usuário deve fazer um estudo para obter o melhor desempenho do sistema e as menores perdas.

Existem dois tipos de reservatórios quanto à sua posição de instalação: horizontais e verticais. A ASHRAE (*apud* Lafay, 2005) afirma que o projeto e seleção do equipamento de armazenamento é um dos elementos mais negligenciados nos sistemas de energia solar. Além disso, recomenda o uso de reservatórios na vertical, pois, dessa forma, propicia-se a estratificação térmica mais acentuada, apresentando um importante efeito no desempenho dos sistemas térmicos.

Do campo de pesquisas na área de sistemas de coletores solares para aquecimento de água, utilizou-se neste trabalho conceitos e modelamentos provenientes de trabalhos experimentais de autores importantes, referenciados a seguir.

Existem muitos modelos de estratificação térmica, porém os mais empregados são os apresentados por Duffie e Beckman (1991), que dividem-se em duas categorias para seu cálculo: teoria dos múltiplos nós e deslocamento do volume das várias seções do reservatório. Para o tanque multinodal, é necessário fazer hipóteses de controles de como a água entra no tanque e é distribuída para os vários nós. Siqueira (2003) utilizou o modelo de múltiplos nós realizando o balanço térmico de energia em cada camada do reservatório térmico, com convecção e condução entre as camadas, no desenvolvimento de um programa de simulação computacional para sistemas de aquecimento solar para água. Este modelo é o aplicado no programa TermoSim devido aos resultados satisfatórios obtidos em suas comparações com dados experimentais de temperaturas do tanque.

Morrison e Braun (1984), analisando o parâmetro da fração solar em reservatórios verticais e horizontais, verificaram que os reservatórios verticais apresentam fração solar em torno de 7% maior que os horizontais, indicando como motivo da baixa performance dos tanques horizontais o fato de que o caminho de condução é menor entre o topo do reservatório e a parte inferior intermediária, sendo este tipo de tanque sensível ao perfil de demanda de água quente. Este dado motivou o presente trabalho a realizar simulações na configuração predominantemente com reservatórios térmicos verticais nas análises.

Oliveski (2000) realizou ensaios experimentais em um tanque vertical de razão de aspecto (H/D) 1,4, submetido às condições de operação aberto e fechado, observando a importância que a convecção exerce no campo de temperatura no interior do reservatório e possibilitando uma maior compreensão nos fenômenos envolvidos na formação e manutenção da estratificação.

Apresentou também um estudo da estratificação em tanques verticais, simulando 40 reservatórios com diferentes razões de aspecto, volume e espessura de isolamento, com um modelo bidimensional utilizando método dos volumes finitos, obtendo o coeficiente de convecção interno destes reservatórios e correlacionando-os através da razão de aspecto e perdas térmicas para o ambiente, demonstrando que os modelos de múltiplos nós podem ser utilizados desde que incluam artifícios de cálculo para que não ocorra inversão das camadas de temperatura e, portanto evitando-se erros significativos nos resultados de uma simulação computacional.

Hussein (2002) elaborou uma proposta para as equações que reproduzem o comportamento do reservatório térmico e das tubulações hidráulicas das conexões. Estas

equações foram modificadas por Krenzinger *et al* (2003), após um estudo teórico e experimental em um sistema de aquecimento de água por energia solar operando em regime de termossifão.

Hussein (2002) concluiu também que a separação vertical entre os coletores e o reservatório térmico apresenta um valor ótimo em torno de 200 mm. Morrison (1984), utilizando um modelo matemático adaptado ao software *TRNSYS*, analisou as condições em que a circulação reversa, devido às perdas de calor para ambiente durante a noite, pode ocorrer nos coletores solares e constata a necessidade de se manter uma separação mínima de 250 mm entre o topo dos coletores e a base do reservatório térmico para minimizar os efeitos das perdas por este fenômeno. Este assunto será abordado com mais detalhes no capítulo 4, sobre os modelos matemáticos.

2.2.4 Tubulações térmicas

As tubulações utilizadas nos sistemas de aquecimento solar de água residencial devem ser capazes de suportar altas temperaturas do fluido operante, sendo o máximo em torno de 100°C. O cobre é o material geralmente utilizado pois possui uma ótima resistência à corrosão com um custo relativamente baixo.

As conexões dos equipamentos com as tubulações devem ser realizadas de acordo com as normas aplicadas para qualquer encanamento e devem haver purgadores instalados com fácil acessibilidade e adequados à pressão do sistema. O isolamento térmico das tubulações é fundamental para um melhor funcionamento do sistema, de forma a minimizar as perdas por condução, através das uniões das conexões, por convecção e por radiação ao ambiente. Isolantes como lãs de vidro, polietileno e poliuretano expandido com condutividade térmica em torno 0,03 W/m K são os mais utilizados para diminuir as perdas térmicas.

O aço inox também seria uma ótima opção de material com boa resistência mecânica e condutividade térmica, em torno de 14 W/m K, apresentando, portanto, menores perdas de calor. Mas como seu custo é muito elevado, ele acaba sendo o menos empregado para este fim.

Outros materiais bastante empregados para as tubulações é o CPVC (*cloreto polyvinyl chlorinated*) rígido, o alumínio e PPR (Polipropileno Copolímero Random), substituindo as tubulações em cobre utilizadas para água quente principalmente pelo seu baixo custo. Para o CPVC, entretanto, sua durabilidade estaria limitada à temperatura de consumo do sistema, que não pode atingir valores que possam contribuir para sua deterioração. A opção de fibra de vidro revestida com pintura epóxi também já é largamente empregada.

2.2.5 Fonte de energia auxiliar

Para que o usuário de um sistema solar para aquecimento de água tenha a confiabilidade necessária para que seu perfil de consumo de água quente na temperatura desejada seja atendido é essencial a combinação de um projeto de coletores eficiente com uma fonte auxiliar de energia. Essa fonte auxiliar de energia pode ser elétrica, a gás ou gerada por uma bomba de calor. Em geral, a utilização de uma fonte elétrica é a mais comum devido à sua facilidade de aquisição e custo. Porém muitos estudos revelaram que a combinação gás e energia solar pode ser a mais viável e eficiente para a maioria das aplicações.

A energia auxiliar pode ser instalada no sistema solar de aquecimento de água com diversos formatos de configuração. Duffie e Beckman (1991) definem, conforme Fig. 2.4, quais os mais utilizados.

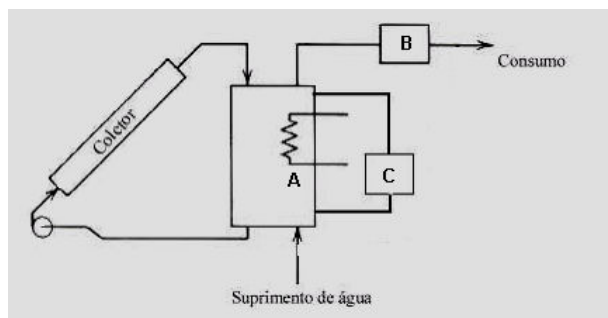


Figura 2.4. Configurações utilizadas para sistema auxiliar de aquecimento.

A configuração *A*, com o aquecedor no interior do reservatório, é uma configuração simples e com custos não muito elevados. Possui um termostato que controla a temperatura de acionamento do aquecedor para manter a parte superior do reservatório a uma temperatura pré-estabelecida.

Na configuração *B*, o aquecedor na linha de consumo deve complementar a energia necessária para que a água atinja a temperatura desejada.

Na configuração *C*, o aquecedor externo ao reservatório opera em paralelo ao tanque, sendo acionado sempre que um termostato apresentar uma temperatura do tanque menor que a temperatura pré-determinada.

Ter o conhecimento de qual a configuração de um sistema é a melhor é pouco provável sem analisar-se o perfil de consumo. Diversas variáveis são decisivas para a obtenção de respostas. Parâmetros como o ajuste da temperatura do termostato, a altura do termostato, o tipo de reservatório, o isolamento, a necessidade de conforto, as temperaturas sazonais do ambiente, e

muitos outros interferem no resultado. Ou seja, afirmar que um sistema é melhor, ou mais econômico que outro exige uma análise detalhada.

Guigas e Dalemback (1998) sugerem que para o dimensionamento de sistemas solares para aquecimento de água, a energia convertida do sol em térmica deve atender em torno de 50 a 70% da demanda de aquecimento.

Martin *et al* (2004) analisou os impactos da utilização de aquecedores a gás de passagem em um sistema com energia solar. Uma adequação dos materiais constituintes do aquecedor para suportarem temperaturas mais elevadas seria necessário, além da instalação de dispositivos eletrônicos para misturar ou desviar a água para o controle da temperatura desejada.

Lafay (2005) afirma que um resultado bem adequado seria um dimensionamento que busque não desperdiçar a energia fornecida pelos coletores, adotando uma menor fração solar (razão entre a energia térmica fornecida pela conversão da energia solar e a energia térmica total). Isto implica em menor investimento inicial (menor número de coletores) e melhor aproveitamento dos mesmos.

2.3 Sistemas de aquecimento de água com energia solar

A circulação da água em uma instalação de aquecimento solar é realizada por termossifão ou com um sistema de bombeamento. Quando o sistema é por termossifão, ele é também chamado de passivo, e quando é com bombeamento, de ativo.

2.3.1 Sistemas ativos

Devido ao fato da circulação da água ser feita por uma bomba, conforme Fig. 2.5, o tanque pode estar localizado em qualquer posição em relação aos coletores. É muito comum a utilização de termostatos diferenciais para o controle do acionamento da bomba, ou seja, a bomba é acionada somente quando um diferencial de temperatura entre o coletor e o reservatório atinge um valor pré-estabelecido e o mesmo para seu desligamento.

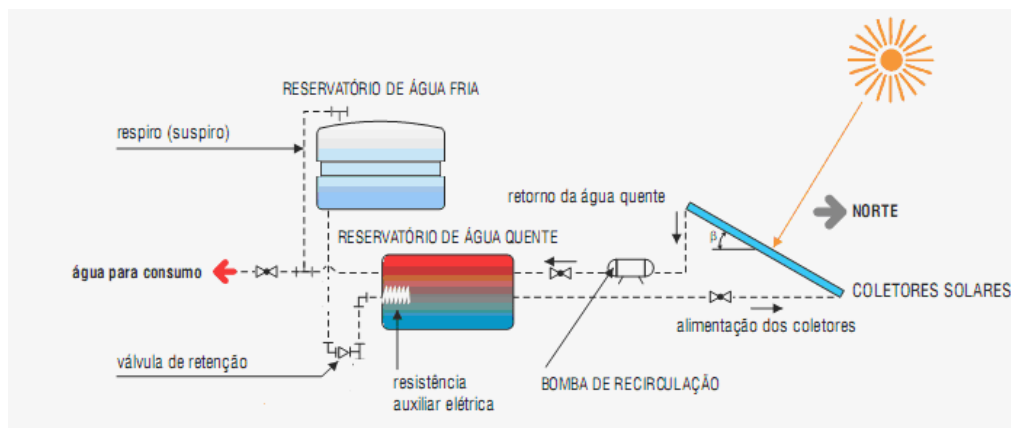


Figura 2.5. Esquema de um sistema ativo. Fonte: Lima (2003).

Em alguns casos esse tipo de sistema pode ser mais caro devido à quantidade de acessórios necessários, como os controles eletrônicos. Em climas mais frios, com grandes possibilidades de congelamento da água, um fluido refrigerante é usado para receber calor do coletor e transferir à água através de um trocador de calor, sendo este sistema chamado de sistema ativo indireto.

2.3.2 Sistemas passivos

É o tipo de instalação predominante no Brasil devido à sua simplicidade e ao clima tropical predominante. O conceito de seu funcionamento baseia-se no gradiente de pressão provocado pela diferença de temperatura entre o coletor solar e o reservatório térmico. A Fig. 2.6 representa um sistema passivo com uma fonte auxiliar de energia interna no reservatório térmico.

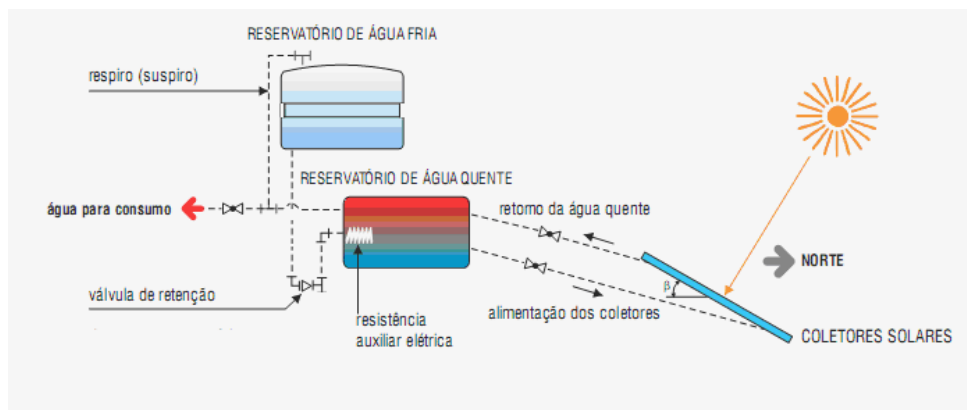


Figura 2.6. Esquema de um sistema operando por termosifão. Fonte: Lima (2003).

Nesse tipo de sistema também existe o chamado sistema passivo indireto, que utiliza um fluido refrigerante e um trocador de calor para fins de evitar o congelamento em regiões de clima com temperaturas negativas.

2.4 Programas computacionais de simulação de sistemas térmicos

Devido aos altos custos de testes de sistemas de aquecimento de água, protótipos, ensaios e a necessidade de redução de tempo, os métodos de cálculos computacionais são poderosas ferramentas empregadas para simular as variações sazonais de temperatura, obtendo, em um curto tempo de processamento, a distribuição de temperatura no tanque, as perdas nos sistemas e os ganhos energéticos em um ano de operação.

Para desenvolver programas de simulação de sistemas térmicos é imprescindível o conhecimento do comportamento e dos modelos matemáticos de cada componente dos sistemas, além de realizar as análises e comparações dos resultados encontrados para se ter certeza de que o software resulta em resultados confiáveis e realistas. A qualidade dos resultados depende de muitos fatores, principalmente da confiabilidade dos dados de entrada e da implementação dos modelos matemáticos utilizados. As incertezas dos resultados e seus desvios geralmente não são apresentados nos gráficos ou tabelas dos simuladores, e muitos programas não possuem uma bibliografia completa para análise dos modelos presentes por parte do usuário.

Atualmente, existem diversos programas de simulação de sistemas de aquecimento de água operando com energia solar. É difícil fazer uma lista completa dos mesmos pelo fato de que alguns são elaborados para fins específicos, outros apenas disponíveis para o meio acadêmico que o desenvolveu, alguns não estão concluídos e também contêm determinadas instalações personalizadas que não se justificam para aplicação em certas localidades.

Com o advento do mercado de sistemas solares para aquecimento de água residencial, os usuários interessados se questionam frequentemente sobre o possível retorno de investimento, economia de energia, e eficiência de sua instalação. Se quiser mudar a configuração, qual o efeito obtido? Valeria a pena utilizar gás ou eletricidade como energia auxiliar? Até que ponto um sistema é mais vantajoso que outro? Estas perguntas poderiam ser respondidas facilmente com um programa computacional de fácil interatividade, intuitivo e agradável para o usuário. A

seguir, são descritos alguns dos principais programas de simulação para a área de energia solar térmica.

O T*SOL da Valentin Energie Software é um programa comercial de simulação de sistemas térmicos para aquecimento de água, também existindo a versão para conversão fotovoltaica, aquecimento de ambientes, e aquecimento de água operando em regime de circulação forçada, e, mais recentemente, contemplando o regime de termossifão. Bastante voltado para sistemas aplicados a climas mais frios, ele possui opção com configurações de sistemas com trocadores de calor, com um ou dois tanques e um sistema de energia solar *stand-by*. Com cinco tipos de coletores solares, é também um software de dimensionamento de coletores e do reservatório conforme a demanda de água quente e o local escolhido para a simulação. Como dados de saída, ainda pode-se realizar uma análise financeira e determinar a contribuição do sistema simulado com a redução de emissão de CO₂ na atmosfera.

O software TRNSYS (*Transient System Simulation Program*), atualmente na versão 16, é um conjunto modular de programas, o que permite uma flexibilidade nas modelagens dos sistemas conforme o grau de complexidade. O usuário pode também incluir componentes ao sistema com diferentes modelos matemáticos não incluídos na sua biblioteca original. É escrito em linguagem FORTRAN e também pode ser programado em linguagem C++. Desse modo, é pré-requisito o conhecimento prévio de programação e de cálculos envolvendo a simulação térmica para se incluir algoritmos necessários e haver a compatibilidade necessária das sub-rotinas no programa.

O Solar Pro 2.0 da Maui Solar Software é uma ferramenta para simulação de aquecedores solares com circulação forçada. Esse software foi originalmente desenvolvido para simular grandes instalações solares operando em regime de circulação forçada.

O GetSolar, na versão 8.2, é um programa alemão desenvolvido para simulação de sistemas de aquecimento solar de água residencial, além de piscinas e calefação em ambientes. Utiliza dados horários de radiação direta e difusa, e as temperaturas ambiente são geradas pelo processador climático WetSyn.

Em Portugal, o SolTerm 5 é um software desenvolvido para análise de sistemas térmicos e fotovoltaicos, proporcionando simulações com circulação forçada e com coletores solares evacuados e planos.

No Brasil, a Green Solar desenvolve pesquisas em parceria com diversas instituições na área de energia solar. Em parceria com a PUC de Minas Gerais, foi desenvolvido o software

SISCOS, para simulação de sistemas de aquecimento de água bombeados e para instalações solares de médio e grande porte.

O F-Chart - Solar Systems Analysis software -, desenvolvido pela University of Wisconsin e com os modelos apresentados por Duffie e Beckman (1991), na versão atual, utiliza uma plataforma bastante simples e compacta para análise de sistemas de aquecimento ativos e passivos, para piscinas e edifícios e sistemas integrados.

O RETScreen é um programa desenvolvido em Excel, para análise de projetos de energias renováveis, focando bastante na viabilidade econômica e na relação custo-benefício. A maior dificuldade é o entendimento de sua aplicação e conversão de parâmetros para os modelos monetários do Brasil.

O desenvolvimento dos programas de simulação computacional nesta área estão presentes com grande importância nos centros de pesquisas das universidades. Faz-se necessário para o desenvolvimento no assunto o estímulo de experimentos práticos e computacionais para geração de conhecimento. Neste foco, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no Laboratório de Energia Solar, se destaca no desenvolvimento destas ferramentas computacionais.

Em fase de conclusão, pelo laboratório de energia solar da UFRGS, apresenta-se o programa TermoSim, para análise de sistemas térmicos de aquecimento de água em regime de termossifão e forçado, objeto de análise nesta dissertação, disponível no site www.solar.ufrgs.br para usuários interessados.

3. PROGRAMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: TERMOSIM

O programa TermoSim faz parte de um pacote de softwares criado pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, chamado SolarCad, conforme Fig. 3.1, e abrange programas para sistemas térmicos e fotovoltaicos.

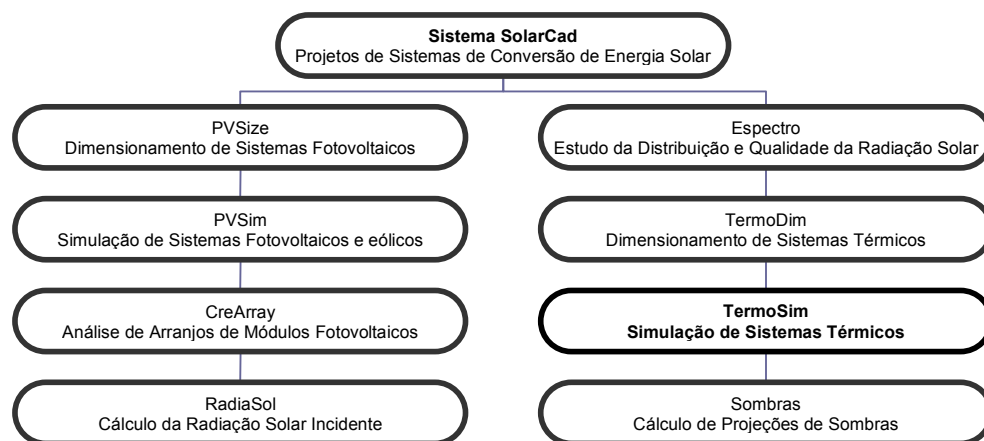


Figura 3.1. Diagrama dos programas formados pelo grupo SolarCad

Neste capítulo, será apresentada a origem do programa TermoSim, sua atual estrutura, na versão 3.0, disponível para o usuário na internet, como deve ser efetuada a entrada de dados dos componentes do sistema a simular e como se realiza a simulação e a análise dos resultados.

3.1 Origem do programa

Com a finalidade de estudar o comportamento dos sistemas de aquecimento de água com energia solar, o Laboratório de Energia Solar da UFRGS desenvolve há alguns anos programas computacionais em linguagem Visual Basic e disponibiliza os mesmos para a comunidade interessada na pesquisa em energia solar. Relacionados com a área térmica do pacote SolarCad estão os programas RadiaSol e TermoDim, para estudos da radiação solar incidente e para dimensionamento de sistemas de aquecimento de água com energia solar, respectivamente.

O desenvolvimento do programa TermoSim teve início com Siqueira (2003), que elaborou os modelos matemáticos e balanços de energia com os componentes de um sistema de aquecimento solar e validou experimentalmente os resultados obtidos. A modelagem matemática desenvolvida foi utilizada no projeto de desenvolvimento do software AQUESOLGÁS, Krenzinger (2003), para a PETROBRÁS e FINEP. Aita (2006) realizou inúmeras simulações

com o software buscando determinar os efeitos dos parâmetros construtivos dos coletores na eficiência dos sistemas e os efeitos do consumo de água quente, obtendo ao final uma correlação para a eficiência térmica sem a necessidade de efetuar diversas simulações.

As principais diferenças entre as versões antigas e a atualmente desenvolvida serão mencionadas durante o texto explicativo neste trabalho. Na versão 3.0 do programa, estão presentes os sistemas de aquecimento de água listados na Tab. 1, a seguir:

Tabela 1. Estrutura dos sistemas do programa TermoSim.

Sistema com coletores solares	Tanque Horizontal	- Energia auxiliar: <ul style="list-style-type: none"> • A gás de passagem • Elétrica de passagem • A gás em série com o consumo • Elétrica em série com o consumo • Elétrica interna ao tanque - Sem energia auxiliar
	Tanque Vertical	
Sistema sem coletores solares	Tanque Horizontal	Aquecimento com: <ul style="list-style-type: none"> • Gás de passagem • Resistência elétrica de passagem • Gás em série com o consumo • Resistência elétrica em série com o consumo • Resistência elétrica interna ao tanque
	Tanque Vertical	

O programa permite que o usuário realize avaliações dos sistemas simulados em um ambiente gráfico de fácil entendimento. Os dados de entrada necessários para o início da simulação são:

- Seleção do coletor solar;
- Definição do perfil de consumo de água quente;
- Tipo e volume do reservatório térmico;
- Definição dos parâmetros geométricos do sistema;
- Localidade
- Tipo de sistema de energia auxiliar, se for o caso.

3.2 Estrutura do programa

O software TermoSim, escrito na linguagem Visual Basic 5.0, foi desenvolvido de forma que o usuário possa definir individualmente os componentes da instalação.

A estrutura do programa contém sete módulos, conforme mostram as Fig. 3.2 e Fig. 3.3. Nesses módulos, são definidos os parâmetros necessários para a simulação, podendo-se então analisar diversos tipos de configurações e seus resultados, como por exemplo, alterando alturas da resistência elétrica ou do termostato no tanque, diferentes perfis de consumo, volume do reservatório, material de isolamento, orientação do coletor, etc. Ao iniciar o programa, é apresentada uma configuração *default* com coletores planos e tanque vertical. Caso o usuário selecione uma configuração com tanque horizontal, necessariamente deve conferir os dados de cada módulo para efetuar uma simulação conforme interesse.

Na Fig. 3.2, observa-se algumas opções de atalho, dentre as quais algumas em que o usuário que já simulou um sistema e salvou esses dados simulados poderá abrir o arquivo e ir direto ao módulo gráfico do programa. Na mesma tela inicial, e conforme a Tab. 1, ao selecionar o tipo desejado de configurações para simulação e clicando em *Carregar*, o programa apresenta as opções disponíveis em seu banco de dados. As configurações de um sistema sem energia solar, sem apoio de energia auxiliar ou com eletricidade são itens novos acrescentados na última versão do software.

São diversos os parâmetros construtivos que o usuário deve conhecer, os quais geralmente são fornecidos nos catálogos técnicos dos fabricantes dos componentes, sendo necessário um conhecimento prévio de conceitos técnicos de energia solar.

Definidos todos os parâmetros dos módulos de um sistema selecionado, basta clicar em *Nova Simulação* para avançar e realizar o estudo desejado no período determinado.

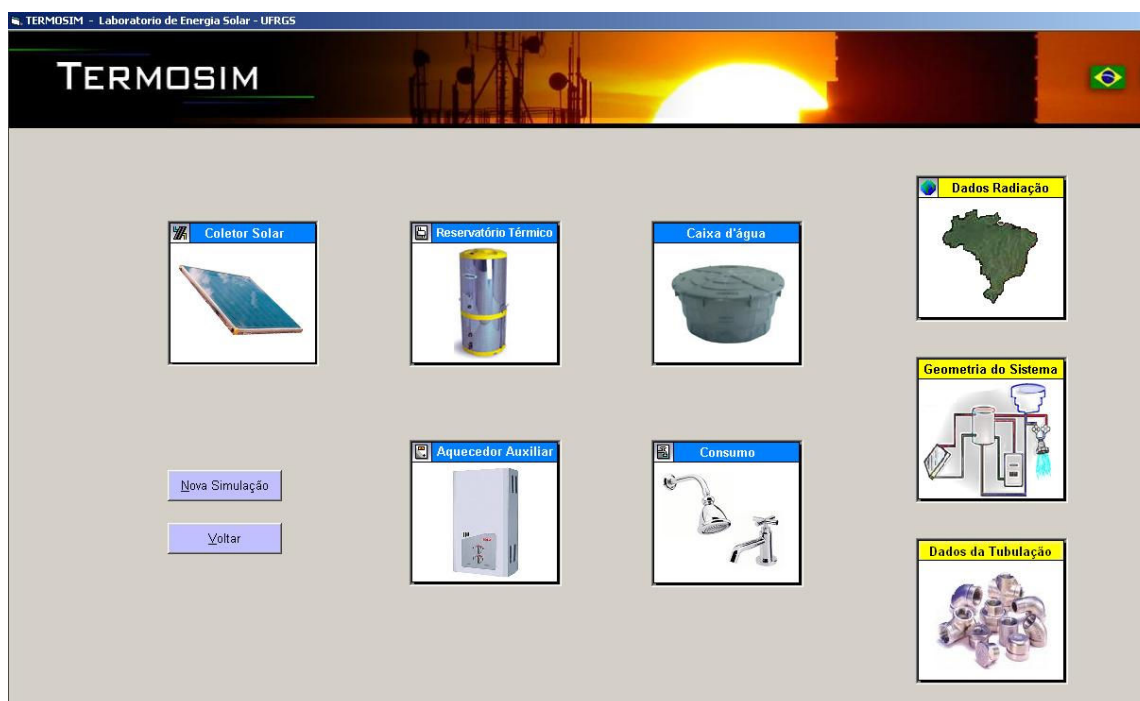


Figura 3.2. Menu dos principais módulos do programa.

Após a simulação, o usuário tem acesso aos valores das temperaturas de entrada e saída dos componentes a cada dia e em uma base horária. Uma ferramenta gráfica permite a visualização de gráficos e de um relatório dos resultados do comportamento térmico da configuração simulada.

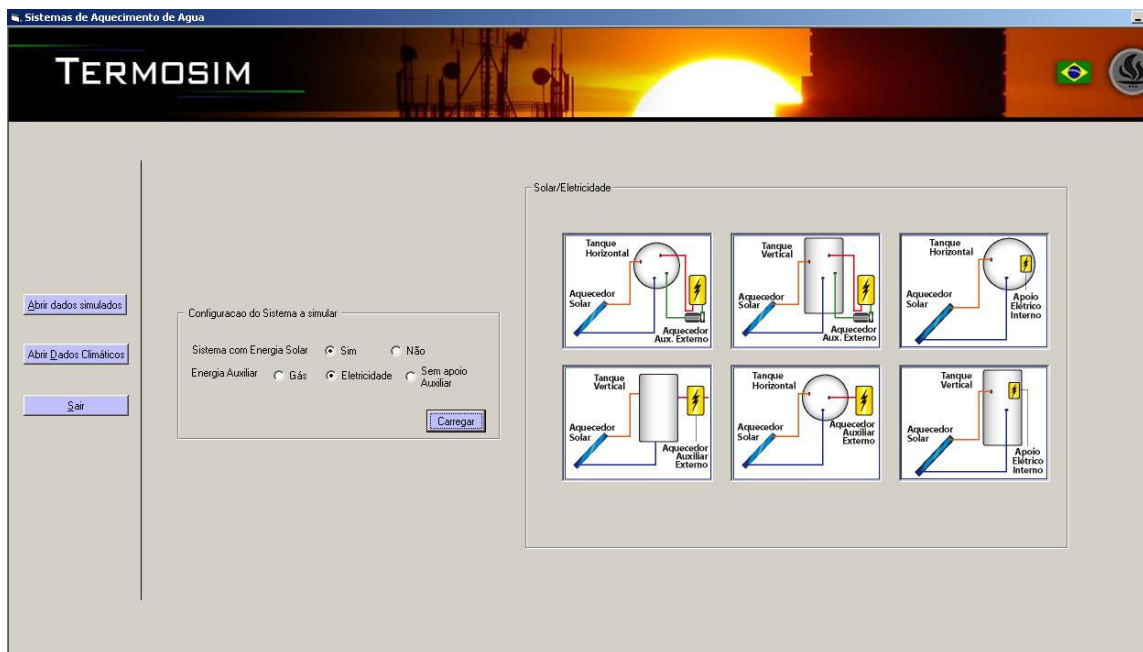


Figura 3.3. Tela inicial do software que permite a escolha do sistema térmico a simular.

3.2.1 Dados do coletor solar

O módulo de entrada de dados do coletor solar possibilita informar as propriedades dos materiais do coletor utilizado, os parâmetros construtivos ou também os dados resultantes das curvas características experimentalmente medidas, e assim realizar a determinação da curva de rendimento instantânea, conforme Fig. 3.4. Na sua versão atual, o programa simula apenas coletores planos convencionais.

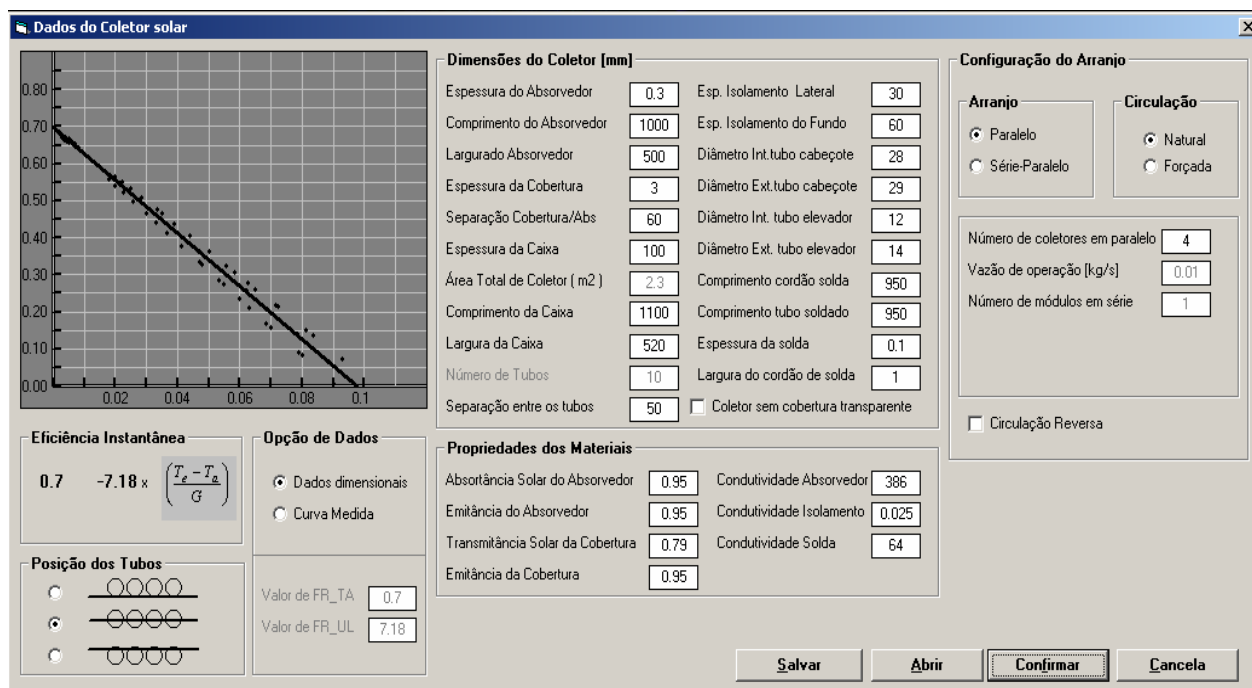


Figura 3.4. Módulo de entrada de dados do coletor solar plano e gráfico de eficiência instantânea.

O conhecimento de todos os dados dimensionais para este módulo seria a parte mais difícil para o usuário em geral. Como um programa de simulação que tenta evitar a necessidade de ensaios para a obtenção dos parâmetros de eficiência de um coletor, o TermoSim permite determiná-los a partir das especificações das dimensões do coletor e das propriedades térmicas e óticas dos materiais, utilizando-se de artifícios iterativos nos algoritmos de cálculo.

Alguns dados podem ser obtidos de catálogos quando os mesmos apresentam os valores de $F_R(\tau\alpha)$ e $F_R U_L$ que o usuário pode inserir diretamente pela opção de dados de curva medida, conforme Fig. 3.4, necessitando adicionalmente apenas alguns dados da geometria do coletor como comprimento, largura e diâmetro dos tubos elevadores e da tubulação do cabeçote.

Além de poder salvar os dados de entrada em um arquivo para posterior utilização, tem-se as opções de realizar uma simulação levando em consideração as perdas de energia à noite –

marcando-se a opção *circulação reversa* -, desenvolvida neste trabalho, e também de selecionar o tipo de arranjo dos coletores e o tipo de circulação da instalação.

3.2.2 Dados do reservatório térmico

Para selecionar o módulo do reservatório térmico, conforme Fig. 3.5, existem vários parâmetros que devem ser definidos pelo usuário, como por exemplo: características do isolamento térmico, coeficiente de perdas térmicas, material do tanque, dimensões do tanque e temperaturas iniciais.

Figura 3.5. Entrada de Dados do Reservatório Térmico.

Os materiais disponíveis, nas opções desta tela, para o tanque são aqueles considerados os mais empregados na fabricação dos mesmos, como por exemplo o aço inoxidável, galvanizado e o cobre. Na Tab. 2 são apresentadas as propriedades desses materiais e também dos isolantes térmicos que são utilizados para minimizar as perdas térmicas durante seu funcionamento.

O funcionamento do TermoSim considera que a água, depois de passar pelo arranjo de coletores solares, retorna ao tanque dirigindo-se para a porção do reservatório mais próxima da

temperatura da água vinda dos coletores, através de um número suficiente de volumes nodais que possibilitam um grau de estratificação máximo.

A homogeneização da temperatura no interior do tanque ocorrerá de forma lenta por difusão térmica entre as camadas de água e por condução nas paredes do reservatório.

O modelo de estratificação utilizado para o cálculo é o multinodal, no qual o reservatório é dividido em um número pré-determinado de nós, ou camadas, onde é realizado um balanço térmico nestes individualmente, determinando-se a temperatura média da água em cada nó. Esta modelagem inclui a influência das conexões com o tanque, inclusive do sistema de apoio auxiliar externo.

Tabela 2. Propriedades características dos materiais do tanque e isolantes térmicos.

Material do Tanque				Material Isolante	
	Condutividade Térmica (W/m K)	Capacidade Térmica (J/kg°C)	Massa Específica (kg/m ³)		Condutividade Térmica (W/m K)
Aço Inoxidável	14,4	476,25	8043	Lã de Vidro	0,043
Aço Galvanizado	47,6	440	7992	Poliuretano Expandido	0,034
Cimento-Amianto	0,58	900	1920	Lã de Rocha	0,046
Cobre	384	390	8900		
Polímero	0,58	900	950		

Além dos dados dimensionais como o volume do tanque, diâmetro e altura, o usuário também deve determinar um perfil de temperatura inicial nas camadas do reservatório para fins de simulação numérica do programa. Estes dados estão relacionados com as variáveis geométricas do sistema, no qual o usuário pode variar as alturas das conexões das tubulações de entrada e saída do reservatório e da energia de apoio.

Lafay (2005) demonstrou que os modelos matemáticos aplicados no balanço de energia no reservatório se apresentam em conformidade com os resultados experimentais realizados no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, validando deste modo a utilização deste modelo no software TermoSim.

3.2.3 Dados do perfil da demanda de água quente

Querer analisar um sistema de aquecimento de água e comparar os resultados para avaliar se um sistema se comporta melhor que outro é muito perigoso quando não se leva em conta o perfil de demanda de água quente.

Nesse sentido, o programa possibilita que o usuário defina a demanda de água quente na configuração a ser estudada, conforme Fig. 3.6, especificando o volume de consumo, diário ou mensal, a hora de consumo e também o valor da temperatura desejada para o consumo da água.

Para a temperatura de consumo, a temperatura indicada para o uso doméstico é de 40°C, destinada à água quente para o banho, conforme pesquisas realizadas pela CEMIG (1993). É de conhecimento nas instalações hidráulicas, em geral, a existência de uma bactéria chamada *Legionella Pneumophila*. A *Legionella* é uma bactéria associada à contaminação do ar e tem sido encontrada em instalações de chuveiros, *jacuzzis* e em outros equipamentos de água como sistemas de aquecimento com energia solar, podendo provocar pneumonias graves nas pessoas. Siqueira (2003) afirma que a partir de 46°C ocorre um decaimento na proliferação desta bactéria e, devido a esse fator, a temperatura de projeto pode chegar a até 70°C. Desse modo, o controle de temperatura para o usuário é realizado por misturadores, sendo que a água fria da rede é adicionada à água quente da linha de saída do tanque até a temperatura desejada de consumo.

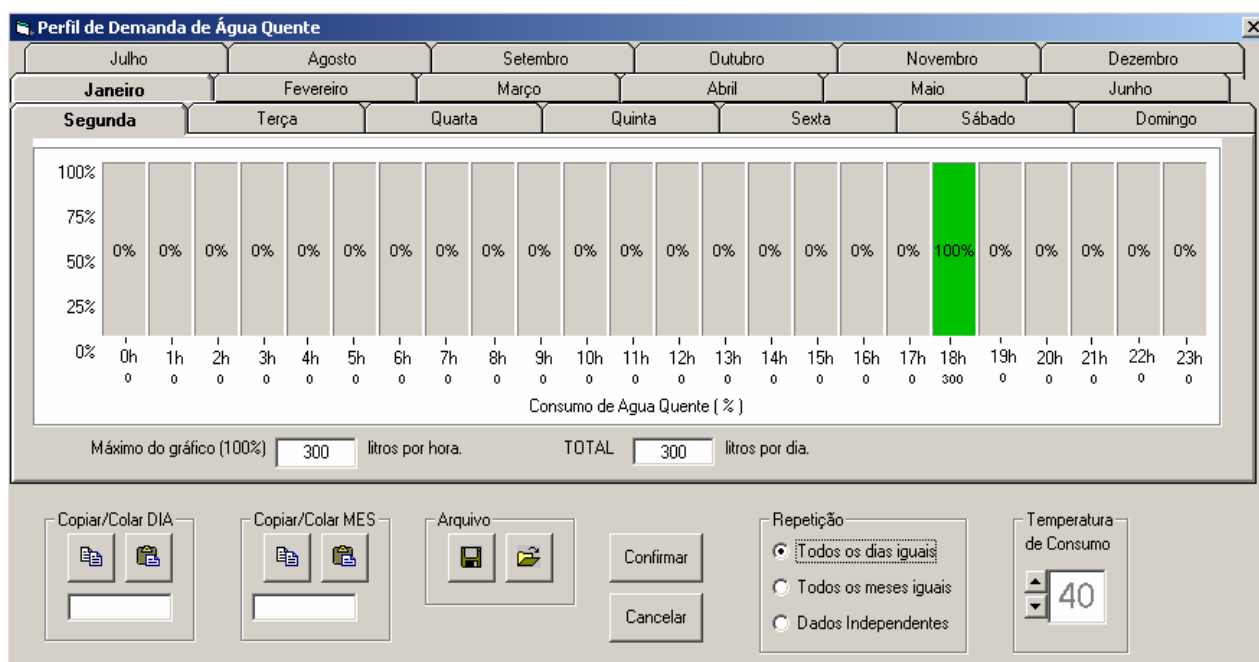


Figura 3.6. Perfil de consumo de água.

O usuário pode criar inúmeros perfis de consumo e salvá-los em um arquivo que poderá ser utilizado em outras simulações para comparações e análises do sistema. Segundo a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), cada pessoa necessitaria cerca de 110 litros de água por dia para atender as necessidades de consumo e higiene. No entanto, no Brasil, o consumo por pessoa pode chegar a mais de 200 litros/dia.

3.2.4 Dados da geometria do sistema e tubulações hidráulicas

A posição de entrada e saída dos circuitos de aquecimento e de consumo influencia na distribuição da temperatura da água no interior do reservatório. Para determinado arranjo geométrico da instalação, o perfil de temperatura no interior do tanque dependerá da vazão e das temperaturas de entrada da água nos dois circuitos no reservatório - retorno da água quente do coletor e do aquecedor auxiliar.

O TermoSim também considera as perdas térmicas que ocorrem ao longo da tubulação para o ar ambiente, avaliando o tipo de isolamento das tubulações e as perdas de carga do sistema.

Para considerar os elementos que compõem a instalação, especialmente para o cálculo das perdas de carga, o usuário deve fornecer os dados de comprimento das tubulações, diâmetro e características do isolamento das tubulações hidráulicas de conexão entre os coletores solares e o reservatório térmico e entre o reservatório térmico e o aquecedor de passagem, quando houver. Na consideração das perdas térmicas pelas tubulações, deve-se especificar a espessura utilizada em cada tubulação e suas propriedades de condutividade térmica, tanto para o material do tubo, quanto para seu isolamento. As interfaces gráficas que permitem definir os dados das tubulações e as características geométricas podem ser vistas nas Figs. 3.7 e 3.8, respectivamente.

Dimensões	
Comprimento do tubo "a" [m]	3.4
Comprimento do tubo "b" [m]	5.1
Comprimento do tubo "c" [m]	3
Comprimento do tubo "d" [m]	4.5
Diâmetro interno do tubo "a" (mm)	22
Diâmetro interno do tubo "b" (mm)	22
Diâmetro interno do tubo "c" (mm)	12
Diâmetro interno do tubo "d" (mm)	8
Nº de conexões na tubulação "a"	3
Nº de conexões na tubulação "b"	4

Isolamento Térmico			
Tubo "a"	Tubo "b"	Tubo "c"	Tubo "d"
Espessura isolamento	4	4	4
Cond. Térm. isolamento	0.043	0.043	0.043
Cond. Térmica parede	385	385	385

Espessura em [mm], Condutividade Térmica em [W/m K]

Confirmar Cancelar

Figura 3.7. Entrada de dados das tubulações do sistema.

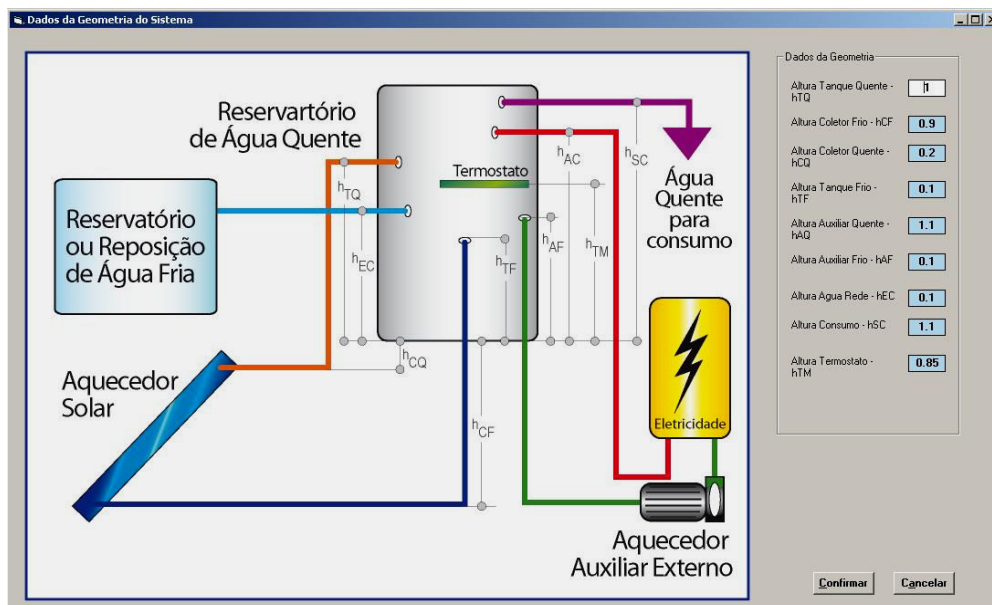


Figura 3.8. Tela para definição dos parâmetros geométricos da instalação.

As cotas das alturas são especificadas em relação à base do reservatório térmico, sendo conforme Fig. 3.8:

- h_{TQ} a altura entre a saída do coletor e a base do tanque;
- h_{CQ} a altura entre o topo do coletor e a base do tanque;
- h_{EC} a altura da água de reposição disponível da rede;
- h_{CF} a altura da entrada de água fria no coletor, entre a base do tanque e o fundo do coletor;
- h_{TF} a altura de saída da água do tanque referente a base do reservatório;
- h_{AF} a altura de saída da água do tanque para o aquecedor auxiliar;
- h_{AC} a altura de retorno da água do aquecedor auxiliar para o reservatório;
- h_{SC} a altura entre tubulação de consumo e a base do tanque;
- h_{TM} a altura do termostato;

3.2.5 Dados do aquecedor auxiliar

A praticidade de manuseio, a facilidade de instalação, a garantia do fornecimento, os custos iniciais e os gastos de manutenção são fatores determinantes na escolha do sistema auxiliar a ser adotado.

Os sistemas de aquecimento de água por energia solar são geralmente instalados com alguma fonte auxiliar de energia para suprir os períodos em que a radiação solar não é suficiente para aquecer a água na temperatura desejável para o consumo.

O programa oferece a opção de o usuário definir se o aquecimento de apoio é elétrico ou a gás, nas configurações descritas anteriormente. Quando selecionado o gás, Fig. 3.9, por exemplo, devem ser informados os dados de vazão, rendimento do aquecedor e consumo nominal de gás. Quando for utilizado um aquecedor elétrico Fig. 3.10, deverá ser informada a potência da resistência elétrica.

Figura 3.9. Parâmetros para um sistema de apoio a gás.

Para as diversas configurações, faz-se necessário o uso de um termostato que determinará a temperatura de acionamento do aquecimento auxiliar. Para o controle do acionamento do termostato têm-se a opção do uso de temporizador, na busca de uma instalação com economia de energia.

As perdas térmicas relativas ao aquecedor e à sua eficiência são consideradas e sua modelagem matemática é apresentada nesta dissertação no próximo capítulo.

Conforme Aita (2006), um aquecedor a gás de passagem pode estar instalado em série ou em paralelo ao tanque. A instalação em série condiciona a colocação do aquecedor na linha de consumo e a em paralelo, em uma posição mais próxima ao tanque. Esses dois sistemas foram incluídos na presente versão do programa TermoSim, observando-se que, na condição em série,

é necessário um controle eletrônico de temperatura com chama modulada, que consegue estabelecer uma temperatura constante para o usuário. Seu custo, que está decrescendo com um mercado ascendente, ainda está um pouco elevado, se comparado aos aquecedores convencionais. Em relação a esses fatores econômicos, o software TermoSim é capaz de avaliar as viabilidades dos sistemas simulados através de seu resumo financeiro após a simulação, assunto detalhado no capítulo a seguir, na modelagem matemática do mesmo.

Dados da Resistencia Eletrica

Aquecimento Auxiliar por Resistencia Eletrica

Modelo

Vazão Nominal da bomba [l/min]

Potencia da Resistencia [watts]

Acionamento do Termostato [°C]

Utilização de Temporizador

Perfil do Controle Digital

Controle por Termostato Ativado

Não Ligar Apoio das 6-9 horas

Aciona Apoio com Radiação Baixa das 06-18 horas

Acionar Apoio de acordo com Consumo

Figura 3.10. Parâmetros da resistência elétrica para apoio auxiliar elétrico.

Portanto, a respeito do artifício presente no software TermoSim, de utilização de temporizadores, o usuário pode simular situações com controles eletrônicos digitais de temperatura, disponíveis no mercado, avaliando os efeitos do sistema simulado em seu desempenho térmico e financeiro. Dentre as hipóteses apresentadas para o usuário tem-se:

- A energia auxiliar não é ligada das 6 às 9 horas da manhã, admitindo-se que seria um horário em que a radiação solar começaria a esquentar a água circulante. Esta hipótese se

- justifica pelo fato de que o acionamento do apoio auxiliar de energia neste período estaria comprometendo a eficiência do coletor com uma energia do sol não aproveitada;
- O acionamento da energia auxiliar com radiação baixa, através de um dispositivo elaborado para tal função, otimizaria sua utilização, não dependendo das temperaturas atingidas no tanque. Portanto, quando a radiação é dita baixa, sendo insuficiente para aquecer e manter o sistema com a temperatura desejada, a energia auxiliar é obrigatoriamente acionada. E portanto, quando a radiação presente está elevada, o sistema opera normalmente, porém sem acionamento da energia de apoio.
 - A opção de personalizar a simulação de acordo com o consumo funciona como um controle pré-agendado de uma demanda bem definida, de forma que o sistema é acionado de acordo com a necessidade e no período antecedente ao uso programado pelo usuário. O usuário assim busca caminhar para uma economia de energia auxiliar. Porém este sistema também pode requisitar um potencial maior de temperatura em um curto período de tempo, causando um consumo maior.

Todos estes sistemas serão analisados em detalhe no capítulo 5 deste trabalho.

3.2.5 Dados meteorológicos

No TermoSim, a simulação térmica pode ser analisada em diferentes localidades do Brasil utilizando-se paralelamente o software SeqMetBr, também desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da UFRGS. Esse programa, incluído no programa TermoSim, sintetiza os dados climáticos, a partir de dados em médias mensais, em sequências meteorológicas com intervalos de uma hora.

Existem muitos métodos para estimar a radiação solar média na superfície terrestre, tais como as correlações entre número diário de horas de brilho de sol, modelos estatísticos baseados em dados adquiridos por satélites e os métodos baseados em modelos físicos. Entretanto, todos esses se referem a dados médios e não a sequências de radiação.

Neste sentido, o programa SeqMetBr (veja Fig. 3.11) utiliza modelos estocásticos para a sintetização de dados de forma a gerar dados de radiação solar diária sequencial através de Matrizes de Transição de Markov (MTM). Nessa metodologia, considera-se a correlação de primeira ordem entre dados medidos depois de classificar os dados segundo o índice de transparência médio mensal.

Collares-Pereira e Rabl (1979) propuseram equações universalmente adotadas para calcular o valor médio estimado da radiação incidente em cada hora a partir da radiação diária. A

partir desta distribuição média, foi proposto (Krenzinger, 1994) o modelo que é utilizado no programa TermoSim que soma uma componente aleatória cuja amplitude é modulada pelo valor do índice de transparência atmosférica diário.

A combinação dos modelos de radiação diária e de radiação horária permitem que, através de doze dados de médias mensais de radiação solar, seja produzida uma sequência anual de dados de radiação horária. A transformação dos dados de radiação horizontal em radiação inclinada é feita com utilização do modelo de Perez *et al* (apud Duffie e Beckman, 1991).

Os dados climáticos utilizados para gerar as sequências meteorológicas pelo software são: temperatura média, médias das temperaturas máximas diárias, médias das temperaturas mínimas diárias, umidade relativa média e média da radiação solar diária horizontal.

Os pontos vermelhos na Fig. 3.12, no detalhe do Estado do Rio Grande do Sul, representam cidades com ausência de alguns dados climáticos, e os pontos amarelos, as cidades com todos os parâmetros climáticos necessários para a simulação.

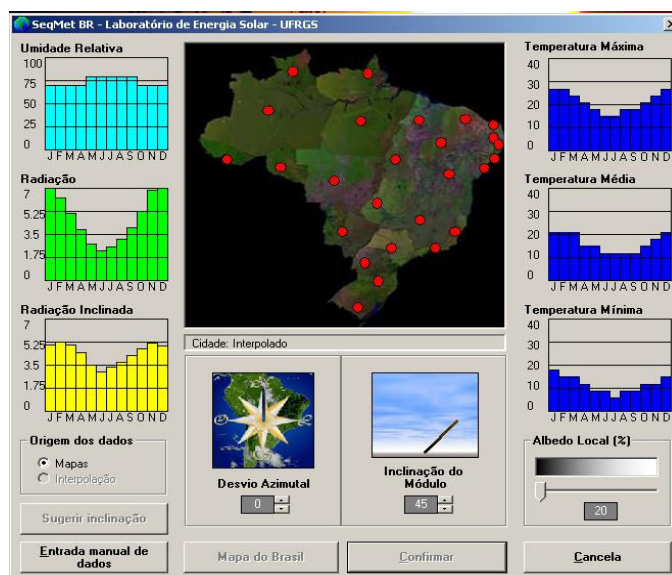


Figura 3.11. Tela inicial do programa de dados climáticos: SeqMetBr.

Se a localidade não estiver presente no mapa apresentado, o usuário poderá ampliar o banco de dados do programa, fornecendo manualmente com dados novos de sua cidade ou região, como latitude, longitude, radiação solar média de cada mês, temperaturas máxima, mínima e média. Entretanto, nem todas as cidades possuem arquivos climáticos disponíveis. Nesse sentido, o programa possibilita a escolha de outra localidade, preferivelmente de clima semelhante, para a interpolação dos dados de cidades próximas à escolhida através de uma média ponderada com o inverso da distância do ponto pretendido à cidade de referência.

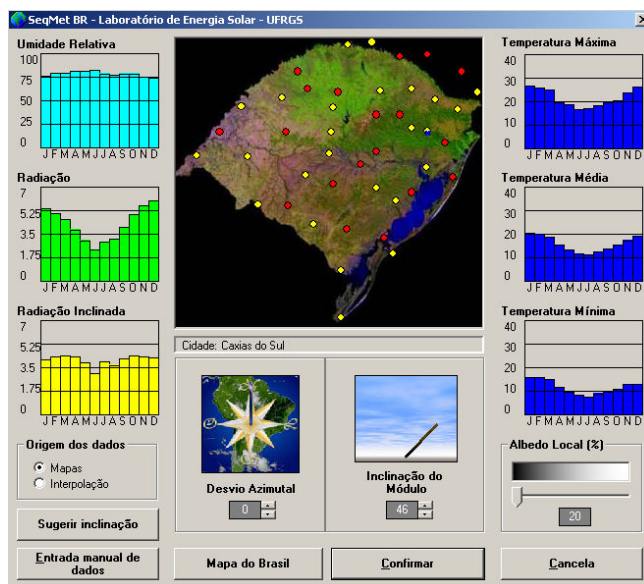


Figura 3.12. Formulário para seleção dos dados meteorológicos da cidade desejada a simular.

3.2.6 Gráficos e relatórios

Depois de concluída a simulação, fica disponível ao usuário a opção de gráficos, conforme apresenta a Fig. 3.13. Nesta janela, pode-se obter os gráficos desejados no menu flutuante ou nos ícones laterais mostrados, listados abaixo:

- Temperaturas das camadas do reservatório, definidas em cinco divisões igualmente espaçadas em relação a altura do mesmo;



- Temperatura média do tanque;



- Temperatura de consumo;



- Temperatura ambiente;



- Temperatura de entrada e saída do coletor, respectivamente;



- Temperatura ambiente nas vizinhanças do tanque;



- Temperatura da água fria;



- Radiação solar inclinada;



- Temperatura de entrada e saída do aquecedor auxiliar, respectivamente;



- Vazão de consumo de água fria, quente e total respectivamente;



- Eficiência dos coletores solares;



- Acionamento do termostato e consumo de energia auxiliar, respectivamente;



Além disso, todos estes gráficos podem ser visualizados simultaneamente, o que facilita análises detalhadas de um comportamento. Para desabilitar um gráfico selecionado, basta clicar no seu ícone novamente para limpá-lo da tela.

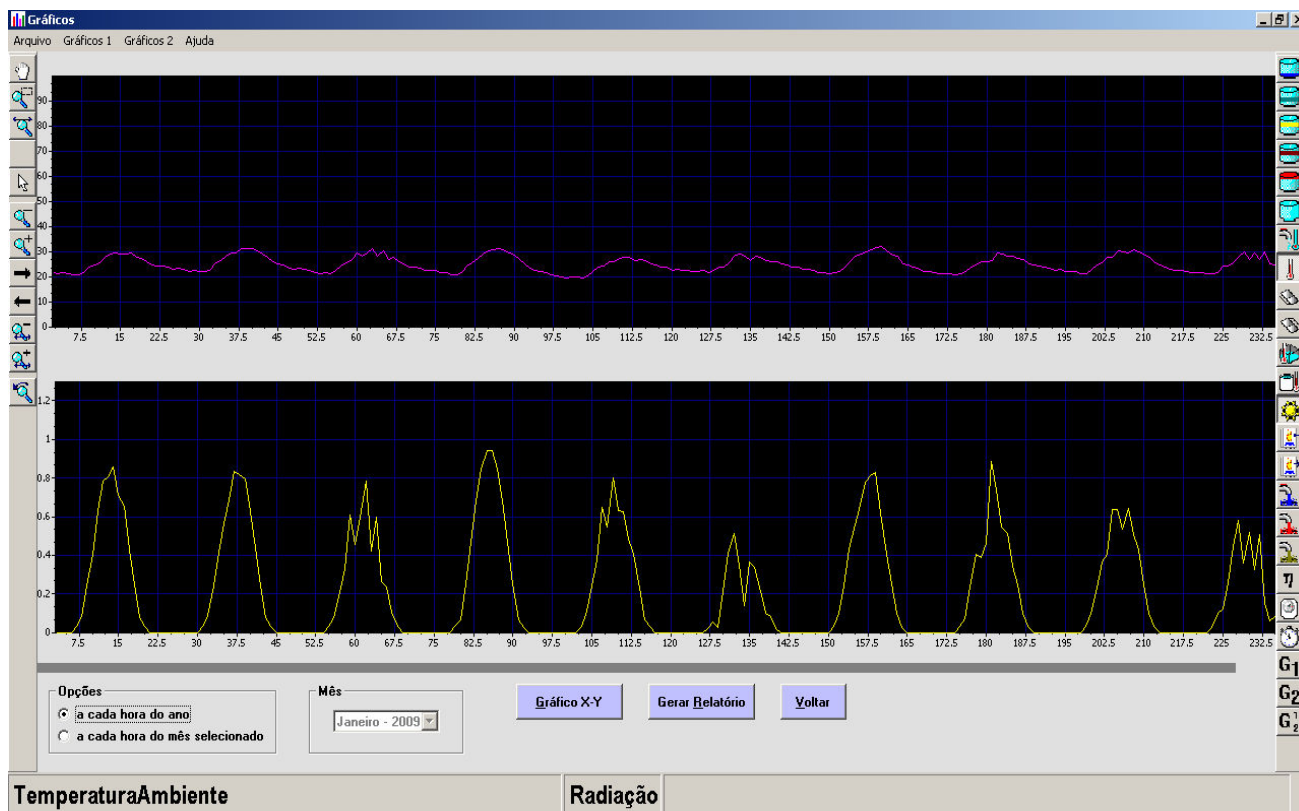


Figura 3.13. Interface para análise gráfica das simulações executadas.

Na interface gráfica pode-se escolher a opção de *Gráfico X-Y* ou *Gerar Relatório*. A função *Gráfico X-Y* permite o cruzamento de dados de mesma base horária obtendo-se correlações entre variáveis que o usuário determinar valiosas em suas análises.

Ao clicar em *Gerar Relatório*, a interface, conforme Fig. 3.14, permite a visualização de um resumo mensal contendo os resultados da radiação solar, consumo de energia auxiliar (gás ou eletricidade), a energia térmica necessária para o aquecimento da água, as parcelas de energia térmica da fonte auxiliar, do sol e desperdiçada, e a eficiência solar. Também são disponibilizados gráficos de barras dos resultados em forma mensal, conforme exemplo na Fig. 3.15, e anual, conforme Fig. 3.16.

A opção *Resumo* mostra ao usuário todos os parâmetros que definem o sistema simulado e seus resultados resumidos, como: o número de coletores solares, o volume do reservatório, a área total dos coletores, a regulagem do termostato, o consumo anual de energia auxiliar, o consumo anual de energia térmica, fração solar, tempo de acionamento da energia auxiliar, a temperatura média da água de consumo, a temperatura ambiente média e perdas pela circulação reversa, quando aplicado, conforme Fig. 3.17.

RELATÓRIO								
Dados Mensais		Gráfico Mensal (MJ)		Gráfico Anual (MJ)			Resumo (clique na folha)	
	Radiação Solar	Cons. En. Elétrica	Consumo Gás	Cons. En. Térm.	En. Térm. do Gás	En. Térm. Solar	En. Não Usada	Eficiência Solar
Mês	Rad (MJ)	En.EE(MJ)	C_Gás (m³)	C_E.T. (MJ)	E.T.Gás (MJ)	E.T.Sol (MJ)	E.T.P. (MJ)	Ef_Sol (%)
Janeiro	1171.8	0.00	29.31	588.9	934.1	515.5	860.6	44.0
Fevereiro	1107.3	0.00	24.99	538.7	796.4	496.1	753.7	44.8
Março	1225.2	0.00	29.79	654.8	949.4	552.9	847.5	45.1
Abril	1144.4	0.00	35.97	767.9	1146.5	505.9	884.5	44.2
Mai	1035.6	0.00	42.75	912.5	1362.4	431.1	881.0	41.6
Junho	883.8	0.00	45.15	965.1	1438.9	328.7	802.5	37.2
Julho	1060.0	0.00	48.91	1031.4	1558.8	414.1	941.4	39.1
Agosto	1092.0	0.00	44.59	974.9	1421.1	419.4	865.5	38.4
Setembro	1118.6	0.00	41.15	902.9	1311.4	429.6	838.2	38.4
Outubro	1253.3	0.00	37.76	811.6	1203.5	514.2	906.1	41.0
Novembro	1188.5	0.00	32.48	695.0	1035.2	496.7	836.9	41.8
Dezembro	1172.6	0.00	28.72	618.9	915.4	506.2	802.7	43.2
TOTAL ou MÊNIA	13453.1	0.00	441.6	9462.6	14073.1	5610.4	10220.6	41.6

Figura 3.14. Relatório tipo tabela gerado através da simulação realizada.



Figura 3.15. Relatório tipo gráfico de barras mensal gerado através da simulação realizada.

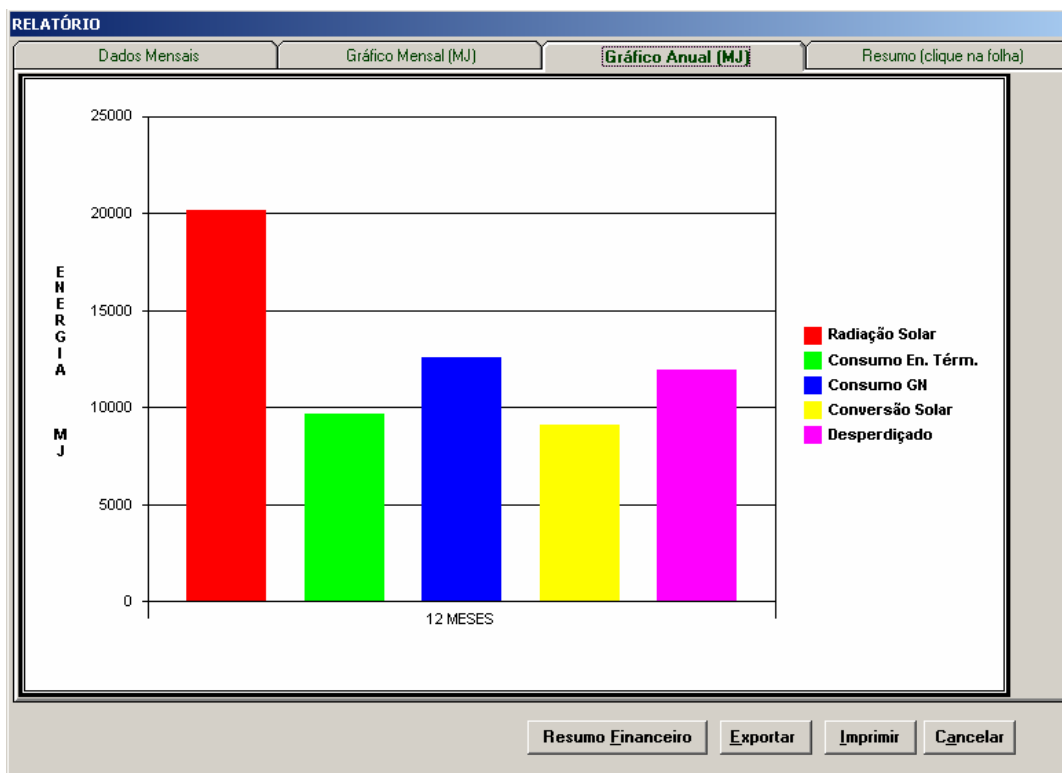


Figura 3.16. Relatório tipo gráfico de barras anual gerado através da simulação realizada.

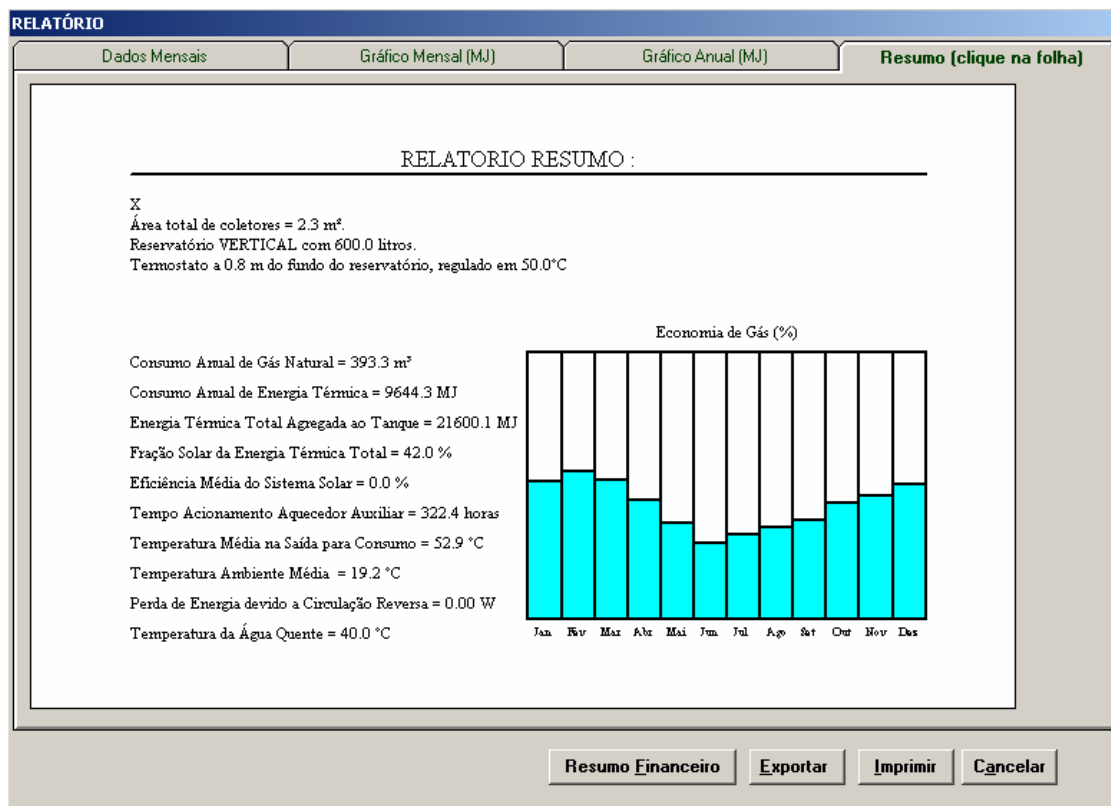


Figura 3.17. Relatório tipo resumo dos resultados da simulação realizada.

3.2.7 Parâmetros financeiros

Nos relatórios gerados pelo programa há uma opção de visualização de um resumo financeiro. Após as análises de uma configuração simulada, o usuário pode efetuar uma comparação econômica entre dois tipos de sistemas de aquecimento de água. Para isso, é necessária, primeiramente, a definição das variáveis econômicas para o cálculo, conforme Fig. 3.18, como custo da energia, do coletor, do reservatório, dos acessórios, valor da manutenção anual, estimativa da vida útil (em anos), valor residual e também possíveis acréscimos do custo da energia ao longo da vida útil dos equipamentos.

Sistema Simulado		Sistema Aquecimento Convencional Elétrico	
Custo da Energia [R\$/kWh]:	2.85	Custo da energia elétrica no Período Simulado no Sistema [R\$ / KWh]:	0.32974
Custo do Coletor por Área [R\$/m2]:	380	Energia Gasta para o Mesmo Período Simulado no Sistema [kWh]:	400
Custo de acessórios [Tubulações, conexões, etc]:	400	Custo do Coletor por Área:	0
Custo do Reservatório por volume [R\$/m3]:	3000	Custo do Chuveiro e/ou acessórios :	80
Custo de Manutenção % do invest. Inicial:	1	Custo do Reservatório por volume [R\$/m3]:	0
Taxa de Rentabilidade Poupança ao Mes [%]:	1	Custo de Manutenção % do invest. Inicial:	5
Valor Residual:	0	Valor Residual:	0
Tempo de vida do Sistema [anos]:	15	Tempo de vida do Sistema [anos]:	15

Figura 3.18. Parâmetros financeiros.

É importante que o usuário que queira comparar um sistema de aquecimento de água residencial por energia solar com um sistema convencional de aquecimento, como o chuveiro ou mesmo um sistema a gás, tenha o conhecimento da energia gasta no mesmo período da configuração simulada. Caso não tenha esses dados, pode-se obter os parâmetros de comparação em uma nova simulação no programa TermoSim.

Após confirmação desses parâmetros, apresenta-se um resumo financeiro com os custos iniciais, mensais e receitas. Foram utilizados na modelagem matemática financeira os índices mais simples para efeitos de análise como economia de energia em série mensal, *payback* em anos, e taxa interna de retorno. A Fig. 3.19 apresenta a interface final deste relatório econômico presente no software TermoSim.

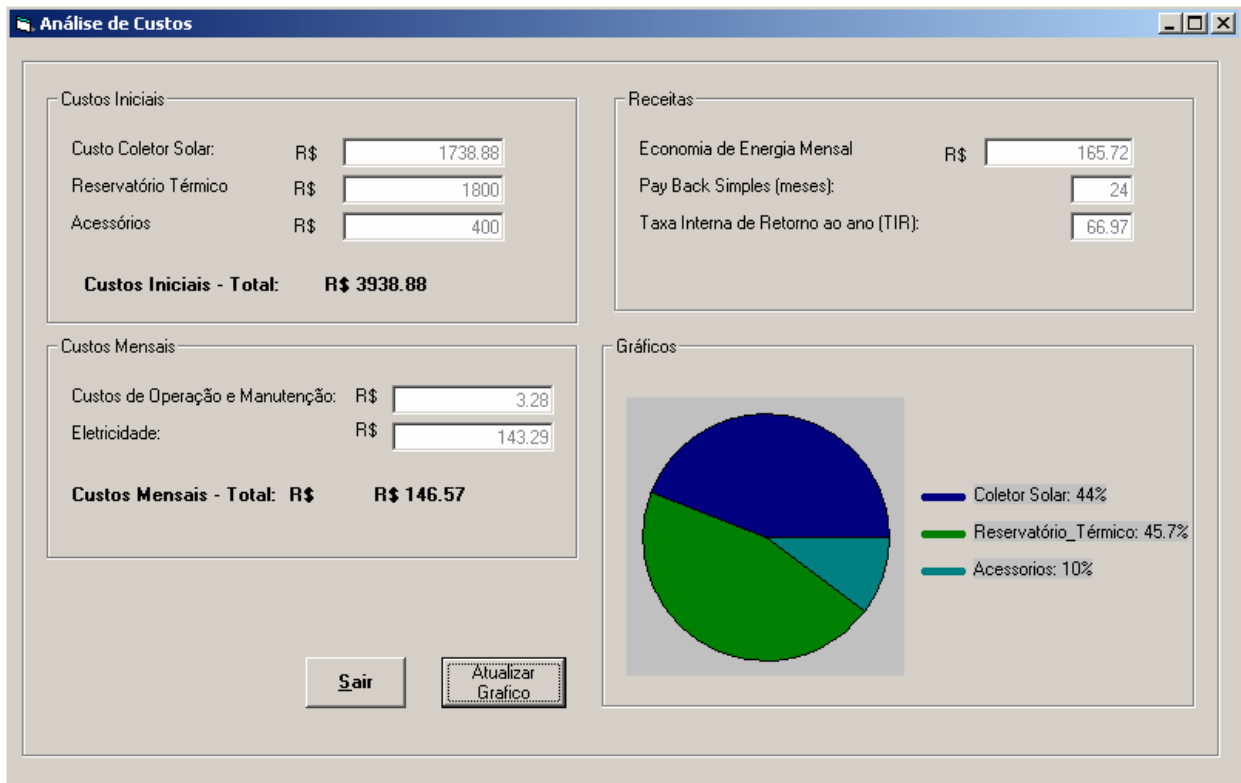


Figura 3.19. Relatório do resumo financeiro.

4. MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS NO PROGRAMA TERMOSIM

A modelagem matemática e sua lógica de programação em um software computacional são a chave para que a simulação possa descrever ou representar o comportamento de um sistema com diferentes configurações. No programa TermoSim, a modelagem é tratada isoladamente para cada componente do sistema térmico e balanços de energia são aplicados para resolver as equações e obter os resultados como num sistema completo.

Neste capítulo serão apresentados os modelos matemáticos utilizados para os sistemas de aquecimento de água com energia solar e sua adaptação para o programa TermoSim.

4.1 Modelagem matemática nos coletores solares

No funcionamento dos coletores solares foi utilizada a modelagem matemática desenvolvida por Hottel-Bliss-Whillier (referenciado em Duffie e Beckman, 1991). Nessa modelagem, são usados os parâmetros de qualidade do coletor $F_R(\tau\alpha)$ e $F_R U_L$ que representam, respectivamente, o efeito das propriedades óticas e das propriedades térmicas do coletor. Esses parâmetros podem ser obtidos através de ensaio experimental para determinar o rendimento térmico dos coletores, seguindo a norma ABNT NBR10184 (1998), a partir das características construtivas da instalação. Na Eq. (4.1), tem-se a equação diferencial de primeira ordem segundo a teoria de Hottel-Bliss-Whillier, que é definida como:

$$\left(\frac{\dot{m}_c}{nt} \right) C_P \frac{dT}{dx} = WF' [S - U_L (T - T_a)] \quad (4.1)$$

onde \dot{m}_c é a vazão mássica no coletor, nt é o número de tubos no coletor solar, C_P é o calor específico da água, T é a temperatura média do fluido dentro do coletor, W é a distância entre os centros de dois tubos consecutivos, F' é o fator de eficiência do coletor solar, S é a radiação solar absorvida pelo coletor, U_L é o coeficiente global de perdas térmicas do coletor solar, T_a é a temperatura ambiente e dx é a coordenada espacial na direção do escoamento na posição i do coletor solar.

O modelo matemático do processo foi elaborado fazendo-se algumas suposições simplificadoras e delimitadoras, relacionadas a seguir:

- O comportamento do fluido no coletor ocorre em regime pseudopermanente;
- A base do coletor é uma placa metálica absorvedora e interligada a tubos paralelos;
- As tubulações de entrada e saída ocupam uma pequena área no coletor e podem ser desprezadas;
- O escoamento é uniforme em todos os tubos do coletor;
- Não há absorção de energia solar pela cobertura, de modo a não acarretar em perdas para o coletor;
- O fluxo de calor através da cobertura é unidimensional;
- A queda de temperatura através da cobertura é desprezível;
- A cobertura de vidro é opaca à radiação infravermelha;
- Há fluxo de calor unidimensional através do isolamento inferior no coletor solar;
- Considera-se o céu como um corpo negro para radiações de grande comprimento de onda a uma temperatura equivalente;
- Os gradientes de temperatura na direção do escoamento do fluido e na direção normal a esta (entre os tubos) podem ser analisados independentemente;
- Os gradientes de temperatura ao redor dos tubos podem ser desprezados;
- As perdas de calor através da parte frontal e inferior do coletor se dão à mesma temperatura;
- As influências de poeira e sujeiras no coletor são desprezíveis;
- Não se considera o sombreamento da placa absorvedora do coletor.

Desenvolvendo-se a equação diferencial, Eq. (4.1), com a condição inicial para x igual a zero e T igual à temperatura na entrada do coletor, a distribuição da temperatura no coletor em base horária é calculada de forma iterativa utilizando a Eq. (4.2), na qual A_C é a área do coletor solar, F_R é o fator de remoção do coletor, $(\tau\alpha)$ é o produto da transmitância-absortância efetivo, I_T é a irradiância solar incidente na superfície do coletor, L_C é o comprimento do coletor solar e T_s é a temperatura de saída da água de acordo com uma temperatura de entrada T_e na posição do coletor x_i .

$$T_s = T_a + \frac{F_R(\tau\alpha)}{F_R(U_L)} I_T + \left[(T_e - T_a) - \frac{F_R(\tau\alpha)}{F_R(U_L)} I_T \right] e^{-\left(\frac{A_C F' U_L x_i}{\dot{m}_c C_P L_C} \right)} \quad (4.2)$$

Para obterem-se os ganhos de energia útil transferidos ao fluido são consideradas as resistências do fluxo deste, suas junções por solda e o contato da parede do tubo com ele. Neste sentido, calculam-se os fatores F' , na Eq. (4.3), conhecido como o fator de eficiência do coletor e

definido como sendo a razão entre a taxa de calor útil real e a taxa de calor útil se o absorvedor estivesse na mesma temperatura do fluido, e F , na Eq. (4.4), definido como a eficiência de uma aleta.

$$F' = \frac{1}{\frac{WU_L}{\pi Dh} + \frac{W}{D_{tub} + (W - D_{tub})F} + \frac{WU_L}{C_b}} \quad (4.3)$$

Na Eq. (4.3), tem-se que h e C_b são, respectivamente, o coeficiente de transferência de calor convectivo e a condutância da solda, que é estimada pela condutividade de seu material, espessura e largura.

$$F = \frac{\tanh\left\{\left[\frac{(U_L/k\delta)^{1/2}(W - D_{tub})}{2}\right]\right\}}{\left[\frac{(U_L/k\delta)^{1/2}(W - D_{tub})}{2}\right]} \quad (4.4)$$

Na Eq. (4.4), k , W , D_{tub} e δ são, respectivamente, a condutividade térmica do material, o espaçamento entre os centros dos tubos, o diâmetro externo da tubulação e a espessura dos tubos.

Esses parâmetros geométricos necessários para a determinação dos fatores F e F' são essenciais para os cálculos com as posições dos tubos. Com esses fatores determinados, é conveniente definir o ganho real de energia útil do coletor pelo ganho útil de energia como se toda a superfície do coletor estivesse na mesma temperatura do fluido, surgindo o fator de remoção de calor, F_R , expresso na forma aplicada, conforme Eq. (4.5):

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (4.5)$$

Segundo Tiwari (2006) os valores numéricos de F_R são sempre inferiores aos de F' . Entretanto, seus valores para coletores de boa qualidade estão geralmente entre 0,8 e 0,9.

A equação de Hottel-Whiller-Bliss também define a característica básica de um coletor plano: a eficiência instantânea, calculada pela Eq. (4.6):

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c G_T} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \left(\frac{T_e - T_a}{G_T} \right) \quad (4.6)$$

onde T_e é a temperatura de entrada no coletor, T_a é a temperatura ambiente e G_T é a radiação incidente no plano inclinado do coletor. O termo $F_R(\tau\alpha)$ representa o ganho do coletor e o termo $F_R U_L$ representa as perdas do mesmo.

Um fato interessante é que existe uma tendência da eficiência do coletor solar cair à medida que a temperatura da água de entrada no coletor aumenta, ou seja, a eficiência é maior à medida que a temperatura de entrada no coletor solar é menor. Para este equipamento, o programa TermoSim traz a opção do usuário definir de que modo um grupo de coletores será instalado. Nesse sentido, deve-se considerar então que quando se conecta a saída de água quente de um coletor ou de vários coletores à entrada de outro coletor, em uma ligação em série, aumenta-se cada vez mais a temperatura da entrada do próximo coletor e, conseqüentemente, diminui-se sua eficiência térmica. Para que a eficiência global do sistema não fique prejudicada, é recomendado que as ligações em série e em paralelo estejam em um equilíbrio que busque a melhor eficiência do conjunto, considerando que sempre que se utilizar os mesmos coletores em um mesmo arranjo a vazão seja a mesma.

Outro fato importante na modelagem do coletor solar é que, após os valores numéricos de U_L serem determinados e calculados, em todas as fórmulas descritas este valor é considerado constante. Entretanto, U_L pode ser considerado dependente das temperaturas de entrada no coletor, variando em até 5%. Nesse caso, a eficiência instantânea do coletor se torna uma equação de segunda ordem, não linear, com coeficientes que dependem da velocidade do vento a cada instante a ser determinada.

Para a determinação do coeficiente de perdas global U_L é considerada uma cobertura de vidro utilizando-se a Eq. (4.7) para as perdas pelo topo, U_T , a Eq. (4.8) para as perdas na parte traseira, U_b e a Eq. (4.9) para as perdas laterais, U_e .

$$U_T = \left(\frac{1}{h_c + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_w + h_{r,c-a}} \right)^{-1} \quad (4.7)$$

onde h_c , $h_{r,p-c}$, h_w e $h_{r,c-a}$ são respectivamente o coeficiente de convecção entre o absorvedor e o vidro, o coeficiente de radiação térmica entre o absorvedor e o vidro, o coeficiente de convecção externo e o coeficiente de radiação entre o vidro e o ambiente.

$$U_b = \frac{k_{isol}}{L_{isol}} \quad (4.8)$$

Na Eq. (4.8) tem-se que k_{isol} é a condutividade térmica do material isolante, e L_{isol} é sua espessura.

$$U_e = \frac{(k/t)\lambda\delta}{A_c} \quad (4.9)$$

Na Eq. (4.9) t , λ , δ são, respectivamente, a espessura do isolamento lateral, o perímetro do coletor e a espessura do coletor. Portanto, para as perdas totais, obtêm-se na Eq. (4.10) o valor de U_L .

$$U_L = U_T + U_b + U_e \quad (4.10)$$

No caso de simulações com coletores sem cobertura de vidro, a principal diferença está nas perdas pelo topo, pois não há a cobertura para a proteção da placa absorvedora, e o valor das perdas é determinado pela Eq. (4.11):

$$U_T = \left(\frac{1}{h_w + h_{r,c-a}} \right)^{-1} \quad (4.11)$$

4.2 Modelagem no reservatório térmico

Para a modelagem do reservatório térmico, o programa considera o mesmo estratificado, dividindo sua altura em um número pré-determinado de camadas térmicas onde se aplicam os balanços de energia. O balanço térmico pode ser representado conforme Fig. 4.1, definido pela Eq. (4.12):

$$\dot{Q}_{acum} = \dot{m}_c C_p T_s - \dot{m}_c C_p T_e + \dot{m}_d C_p T_r - \dot{m}_d C_p T_d - (UA)(T_m - T_a) - \dot{Q}_{tub} \quad (4.12)$$

onde \dot{Q}_{tub} são as perdas térmicas nas tubulações que estão conectadas aos coletores, m_c é a vazão mássica do fluido que circula no sistema, C_p é o calor específico da água, T_s é a temperatura de saída da água dos coletores, T_e é a temperatura de entrada do arranjo dos coletores, T_r é a temperatura de água fria de reposição no tanque, T_d é a temperatura de água quente para o consumo, T_a é a temperatura ambiente nas proximidades da instalação do reservatório térmico, T_m é a temperatura média da água no reservatório e UA é o coeficiente global médio de transferência de calor.

Desse modo, podemos concluir que a primeira e a segunda parcela da Eq. (4.12) representam o ganho térmico dos coletores; o terceiro e quarto itens representam a taxa de energia que sai do tanque para a demanda devido ao consumo de água quente; e os dois últimos termos são as perdas térmicas do tanque para o ambiente e pelas conexões.

As perdas térmicas que ocorrem então, calculadas em função do material do tanque e de seu isolamento na instalação, são determinadas para cada camada i do reservatório estratificado.

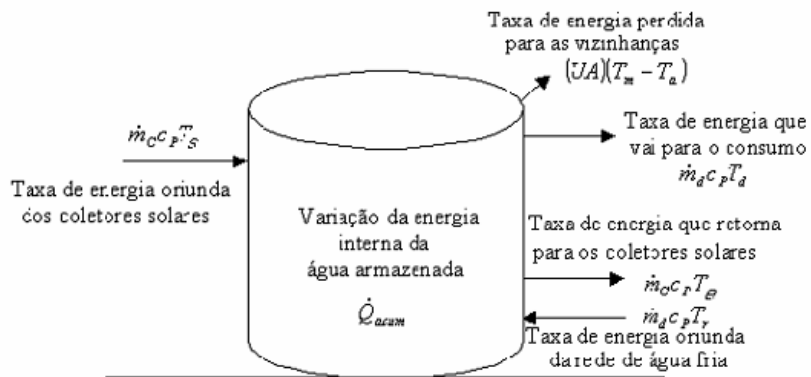


Figura 4.1. Balanço térmico no reservatório de água quente.

Define-se na Eq. (4.13) a taxa de energia trocada com as vizinhanças, \dot{Q}_{perdas} :

$$\dot{Q}_{perdas} = (UA)(T_m - T_a) + \dot{Q}_{tub} = \sum_{i=1}^{n_r} \{(UA)_i(T_i - T_a)\} + \dot{Q}_{tub} \quad (4.13)$$

onde (UA) é o coeficiente global médio de transferência de calor do reservatório, $(UA)_i$ é o coeficiente global de transferência de calor da camada i do reservatório, T_i é a temperatura da água na camada i do reservatório, T_m é a temperatura média da água no reservatório e n_r é o número de camadas definidas para o reservatório. As perdas nas tubulações são consideradas e determinadas no cálculo do balanço de energia nas tubulações.

O modelo matemático usado para realizar o balanço energético no tanque e utilizado no programa TermoSim foi o desenvolvido por Hussein (2002), modificado por Krenzinger *et al* (2003), para permitir o acesso de mais conexões externas, no caso de um aquecedor a gás ou elétrico de passagem externo. No modelo original de Hussein (2002) algumas camadas foram identificadas como sendo detentoras de conexões físicas, porque têm um tubo conectado ao tanque, e outras foram identificadas por representarem uma conexão de equilíbrio térmico, qualidade a elas atribuída por terem temperatura similar à da água que estaria entrando por uma das tubulações.

Conforme Aita (2006), o reservatório se comunica com três principais circuitos externos – circuito de demanda, circuito do coletor solar e circuito de aquecimento auxiliar. Cada circuito tem 2 conexões físicas e uma conexão térmica. A vazão de circulação de água pelo reservatório e por cada circuito é distribuída uniformemente entre todas as camadas compreendidas entre as duas conexões físicas, mas a distribuição de energia térmica ocorre de forma uniforme apenas entre a conexão de entrada de água e a correspondente conexão térmica. Para modelar

matematicamente este efeito, foram definidos fatores de fluxo, detalhados por Siqueira (2003), conforme mostrado na Fig. 4.3, que comandam os termos de uma equação geral de transferência de calor (Eq. 4.14) e massa no reservatório.

$$(M_i C_P)_e \frac{dT_i}{dt} = (UA)_i (T_a - T_i) + \frac{\dot{m}_c C_P}{a} \left[F_i^c (T_s - T_i) + G_i^c (T_{i+1} - T_i) \right] + \frac{\dot{m}_c C_P}{b} \left[F_i^d (T_r - T_i) + G_i^d (T_{i-1} - T_i) \right] + k_e \frac{\pi}{4} D^2 \frac{n_{reserv}}{H} [c_i (T_{i-1} - T_i) + d_i (T_{i+1} - T_i)] \quad (4.14)$$

Na eq. (4.14), M_i é a massa da camada i , \dot{m}_d é a vazão mássica da demanda, n_{reserv} é o número de camadas utilizadas para a análise, T_i é a temperatura da camada i , T_a é a temperatura ambiente, T_s é a temperatura da água que entra no reservatório procedente dos coletores solares, T_r é a temperatura da rede de água fria, U_i é o coeficiente global de perda de calor da área da camada i , D é diâmetro do reservatório térmico, H é a altura do reservatório térmico e k_e é a condutividade térmica efetiva que combina as parcelas da água e da parede do reservatório por uma média ponderada pelas respectivas áreas de seção transversal e será apresentada na Eq. (4.15). Os fatores de controle F_i e G_i verificam a consistência no comportamento da água proveniente dos circuitos dos coletores solares, de consumo, da energia auxiliar e do interior do reservatório. Os índices c_i e d_i indicam a condução entre as camadas e os coeficientes a e b são as constantes de distribuição para a água entre as camadas do reservatório térmico.

As modificações realizadas sobre o modelo original de Hussein (2002) permitiram que o programa TermoSim abrangesse a possibilidade de conectar a água da rede, a saída para consumo, o coletor solar e o aquecedor auxiliar em alturas arbitrárias no reservatório de água quente. Lafay (2005) demonstrou que resultados aplicados com o modelo modificado tem um comportamento que concorda com os obtidos experimentalmente, aprovando sua aplicação na modelagem computacional para simulações.

O grau de estratificação é determinado pelo número de nós definidos no modelo do software. Uma simulação com um nó ou camada, significa o cálculo de um tanque completamente misturado sem efeitos de estratificação. No programa, adotaram-se oito camadas na modelagem matemática devido ao fato dos testes realizados não terem apresentado diferenças significativas nos resultados, apenas maiores tempo de processamento na simulação.

É importante observar as considerações definidas por Hussein (2002) para o balanço de energia das camadas i do reservatório, como:

- As distribuições de velocidade e temperatura da água são consideradas unidimensionais;
- A vazão mássica do fluido circulante entre o reservatório e o arranjo dos coletores é igualmente distribuída entre sua camada de retorno LCW e sua camada de equilíbrio LCW_{eq} (Morrison e Tran, 1984);
- A vazão mássica do fluido para a demanda é igualmente distribuída entre a camada de retorno da água fria LSW e sua correspondente camada de equilíbrio LSW_{eq} (Morrison e Tran, 1984).

O circuito representativo destas camadas de equilíbrio, acima mencionadas, é mostrado na Fig. 4.2.

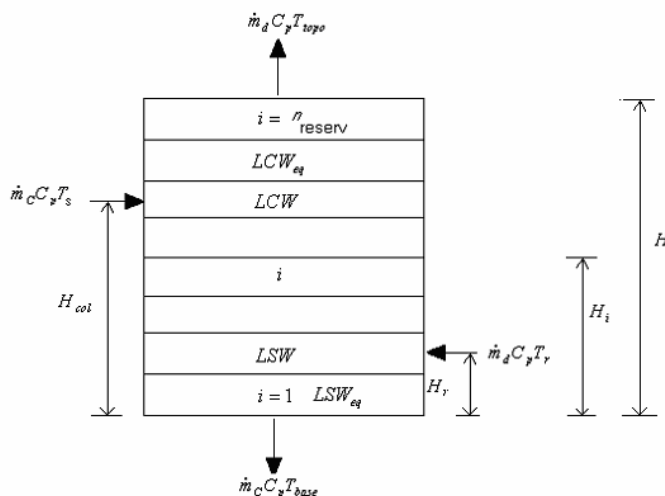


Figura 4.2. Representação das camadas do tanque estratificado.

O programa considera sessenta segundos a base de tempo para obtenção dos valores de temperatura no tanque, sendo o método de Euler utilizado para a resolução das equações diferenciais resultantes para cada volume nodal.

A estratificação térmica em sistemas de aquecimento de água com energia solar é um fator de grande influência na eficiência dos sistemas instalados. Uma altura elevada e vazões elevadas de entrada e saída dos reservatórios pode provocar uma desestratificação térmica. O modelo *plug-flow* (Duffie e Beckman, 1991) é levado em conta no programa, ou seja, o retorno do fluido dos coletores ocorrendo na camada mais elevada do reservatório.

As Figs. 4.3 e 4.4 são exemplos de um perfil de estratificação térmica em um tanque durante um dia, para um sistema sem energia auxiliar simulado pelo programa TermoSim.

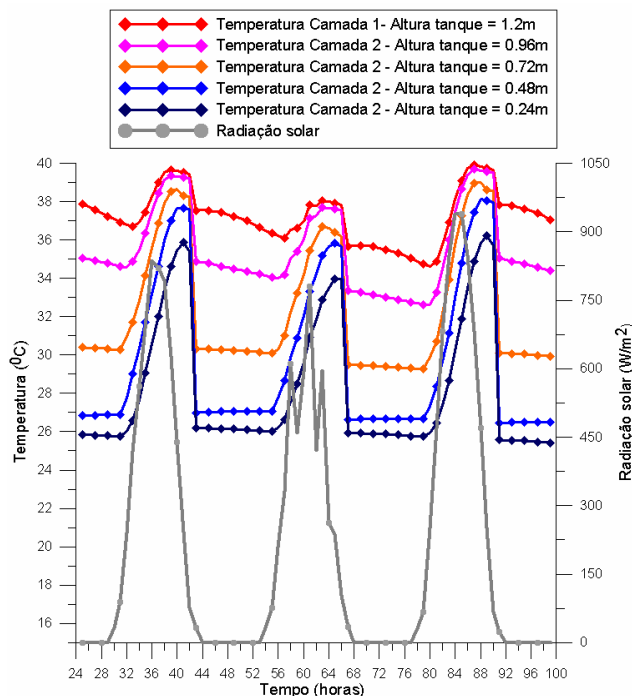


Fig. 4.3. Perfil de temperatura das camadas de um tanque de armazenamento.

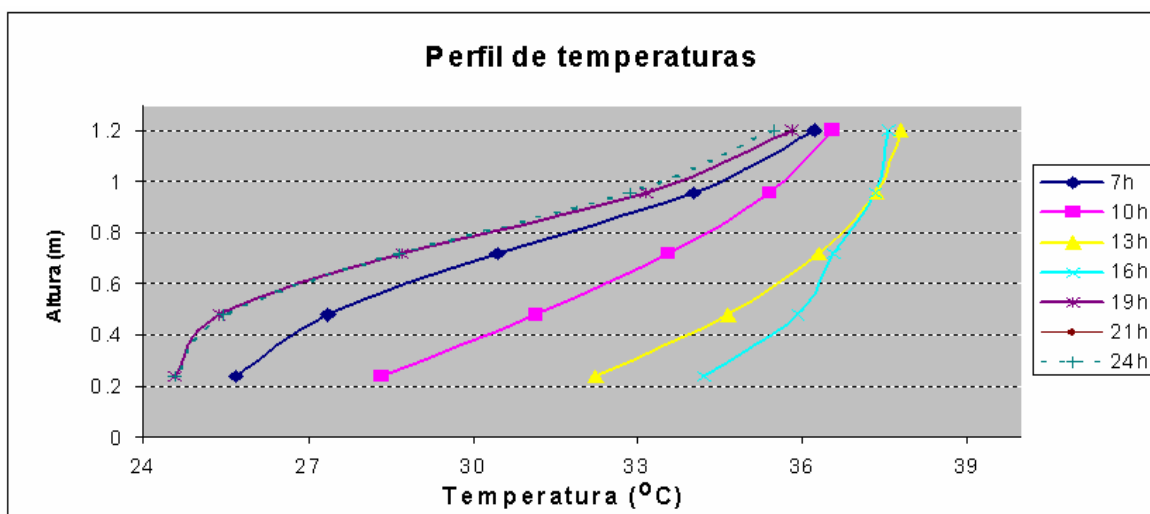


Fig. 4.4. Perfil de temperatura em um reservatório térmico ao longo de um dia.

Parte dos efeitos de estratificação se deve aos efeitos de condutividade da parede do reservatório empregados no algoritmo de cálculo. Sua condutividade térmica efetiva, abordada no software, é calculada pela Eq. (4.15).

$$k_e = \frac{k_{\text{água}} A_{\text{reserv}} + k_{\text{mat}} A_{\text{mat}}}{A_{\text{mat}} + A_{\text{reserv}}} \quad (4.15)$$

Na Eq. (4.15) tem-se que $k_{\text{água}}$ é a condutividade da água, k_{mat} é a condutividade do material da parede do tanque, A_{reserv} é a área da superfície interna da parede do reservatório e

A_{mat} é a área da seção transversal da parede do reservatório ocupada pelo material da parede do mesmo.

Por fim, tem-se a diferenciação nos modelos com a opção de dois tipos de reservatórios cilíndricos: na posição vertical e horizontal. Este último diferencia-se em sua estratificação térmica, principalmente quanto aos efeitos de condução efetiva de suas camadas e das perdas térmicas. O método de cálculo para determinação do coeficiente global de perdas do reservatório em sua modelagem no programa seguiu-se conforme Siqueira (2003) em seu trabalho de doutorado.

4.3 Modelagem do balanço energético das tubulações hidráulicas

Da mesma forma que nos reservatórios, a temperatura da água, a vazão mássica, a temperatura ambiente, os materiais empregados, entre outros, geram as perdas de calor nas tubulações.

No programa TermoSim, denominou-se *TUB2-3* a tubulação localizada entre a saída do fluido aquecido dos coletores e sua entrada no reservatório térmico e *TUB4-1* a tubulação que liga a saída da água do fundo do tanque com sua entrada nos coletores solares.

No modelo dividiu-se as tubulações em N partes igualmente espaçadas ao longo de seu comprimento e foram consideradas as perdas térmicas para o ambiente em cada um desses segmentos de acordo com a massa de água que passa em um intervalo de tempo para se calcular um perfil de temperaturas. O balanço de energia ao longo das tubulações de saída do coletor solar, *TUB2-3*, e saída do reservatório térmico, *TUB4-1*, é dado pelas Eqs. (4.16) e (4.17), respectivamente:

$$\dot{m}_c C_p \left(\frac{dT}{dy} \right)_{TUB2-3} = -(UP)_{TUB2-3} (T_{TUB2-3} - T_a) \quad (4.16)$$

$$\dot{m}_c C_p \left(\frac{dT}{dy} \right)_{TUB4-1} = -(UP)_{TUB4-1} (T_{TUB4-1} - T_a) \quad (4.17)$$

onde T é a temperatura média, y é a coordenada espacial ao longo da tubulação na direção do escoamento do fluido, UP_{TUB} é o coeficiente de perdas global médio baseado no perímetro interno da tubulação em questão.

Para a resolução destas equações diferenciais, definem-se suas condições de contorno, conforme Eq. (4.18) para tubulação *TUB2-3* e Eq. (4.19) para tubulação *TUB2-3*:

$$T_{TUB2-3} = T_S, \xrightarrow{\text{para}} y_{TUB2-3} = 0 \quad (4.18)$$

$$T_{TUB4-1} = T_{base}, \xrightarrow{\text{para}} y_{TUB4-1} = 0 \quad (4.19)$$

A solução dessas equações, portanto, fornecem o equacionamento para a determinação da distribuição de temperaturas ao longo das tubulações hidráulicas do sistema, sendo que a Eq. (4.20) determina a temperatura da tubulação de retorno ao tanque e a Eq. (4.21) a temperatura da água ao longo da tubulação de entrada de água nos coletores vindas do tanque.

$$T_{TUB2-3} = T_a + (T_S - T_a) e^{-\left(\frac{UP_{TUB2-3}}{\dot{m}_c C_p} \right) y_{TUB2-3}} \quad (4.20)$$

$$T_{TUB4-1} = T_a + (T_{base} - T_a) e^{-\left(\frac{UP_{TUB4-1}}{\dot{m}_c C_p} \right) y_{TUB4-1}} \quad (4.21)$$

O coeficiente global de perdas é função do tipo de escoamento, do diâmetro interno e externo dos tubos, do isolamento, do material fabricado da tubulação, e da temperatura ambiente, podendo ser expresso conforme Eq. (4.22), definida por Kreith (1978):

$$U_{TUB} = \frac{1}{\left\{ (\phi_{ext} + 2E_{isol}) \left[\ln \left(\frac{\phi_{ext}}{\phi_{int}} \right) \right] \right\}} + \frac{1}{\frac{Nu \cdot k_{ar}}{(\phi_{ext} + 2E_{isol})}} + \frac{1}{\left\{ (\phi_{ext} + 2E_{isol}) \left[\ln \left(\frac{\phi_{ext}}{\phi_{int}} \right) \right] \right\}} \quad (4.22)$$

onde ϕ_{ext} é o diâmetro externo do tubo, ϕ_{int} é o diâmetro interno do tubo, E_{isol} é a espessura do isolamento, k_{mat} é a condutividade do material, k_{ar} é a condutividade térmica do ar, k_{isol} é a condutividade térmica do material isolante e Nu é número de *Nusselt*, este dependente do número de *Reynolds*. Enfim, a variável UP_{TUB} ($W/m^{\circ}C$) se define conforme Eq. (4.23) em função do perímetro da tubulação em questão.

$$UP_{TUB} = U_{TUB} \pi (\phi_{ext} + 2 \cdot E_{isol}) \quad (4.23)$$

4.4 Modelagem para circulação reversa

No sistema por circulação natural, é relevante a minimização das perdas térmicas durante a noite. Sabe-se que há recomendações convencionais relacionadas às dimensões das instalações do sistema, que ditam, por exemplo, que a distância mínima recomendada entre o fundo do tanque de água quente e a parte superior do coletor deve ser maior que 200 mm para que não se tenha problemas de circulação reversa.

Apesar de ser um problema em que a utilização de uma válvula asseguraria que o fluxo reverso não acontecesse, houve o interesse de estar incluído no software um cálculo para análise da ocorrência da circulação reversa, sua intensidade e comparação com os resultados apresentados pela literatura sobre o assunto.

A vazão mássica no software utiliza o balanço da quantidade de movimento no sistema, na qual é determinada pelo balanço entre a queda de pressão pelas perdas por atrito e pela diferença de densidade no circuito do termossifão. A carga de termossifão H_t , Eq. (4.24), e a massa específica relativa do fluido, Eq.(4.25), durante o percurso no circuito, podem ser determinadas pela equação desenvolvida por Close (1962):

$$H_t = \frac{1}{2}(SG_1 - SG_2)[2(H_3 - H_1) - (H_2 - H_1)] - \frac{(H_3 - H_4)^2}{(H_5 - H_4)} \quad (4.24)$$

sendo SG a massa específica relativa para a água definida pela equação de Huang (1980), H_1 a altura de referência, H_2 a distância da altura de referência até o topo do coletor, H_3 e H_5 a altura até a conexão de água quente proveniente do coletor solar, H_4 a altura da água fria proveniente da base do tanque em direção ao coletor solar.

$$SG(T) = -4,05 \times 10^{-6} T^2 - 3,906 \times 10^{-5} T + 1,0002556 \quad (4.25)$$

Na Eq. (4.24), para ambos SG_1 e SG_2 , a variável T é utilizada como temperatura de entrada e saída do arranjo dos coletores em graus Celsius, respectivamente. Segue, na Fig. 4.5, a representação geométrica das alturas atribuídas na Eq. (4.24):

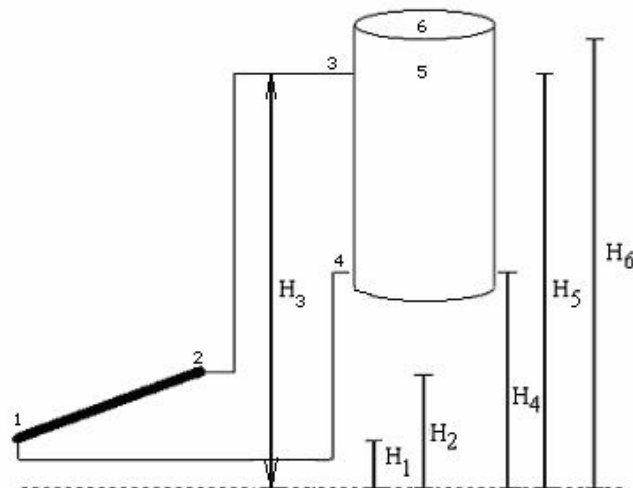


Figura 4.5. Representação geométrica das alturas do sistema. Fonte: Siqueira (2003).

Durante a noite, a perda de calor se dá em função da diferença térmica entre a água do sistema e a temperatura ambiente e do céu. Em casos em que a temperatura do céu está muito abaixo da temperatura ambiente, a temperatura da água atravessando o coletor irá diminuir, também ficando abaixo da temperatura ambiente, ocasionando então um aquecimento da tubulação que liga o coletor solar com o tanque, fenômeno denominado de circulação reversa.

O software possibilita a verificação da magnitude da circulação reversa após simulação, através da análise gráfica da distribuição da vazão mássica no sistema, avaliando os efeitos para minimizar a sua ocorrência, que está diretamente relacionada com as geometrias do sistema e temperaturas da região à noite. A maior dificuldade para o modelo seria obter um histórico de temperatura do céu (T_{sky}) à noite, sendo a mesma estimada pela correlação de Swinbank (*apud* Duffie e Beckman, 1991), apresentada na Eq. (4.26).

$$T_{sky} = 0,0552 + (T_a + 273)^{1.5} - 273 \quad (4.26)$$

No modelo matemático, ao final do dia, quando a radiação solar é nula, é realizado o cálculo da distribuição dos gradientes de temperatura no coletor e as perdas térmicas da placa superficial com a radiação do céu.

Ao constatar a circulação reversa, as sequências computacionais dos gradientes de temperatura ao longo do circuito sofrem um *loop* inverso, com conseqüente aquecimento da tubulação de retorno do coletor solar até o equilíbrio das densidade e perdas por atrito, quando a radiação torna a aparecer e cessam as perdas pelo coletor.

Na Fig. 4.6, apresenta-se o diagrama do cálculo para a circulação à noite no programa:

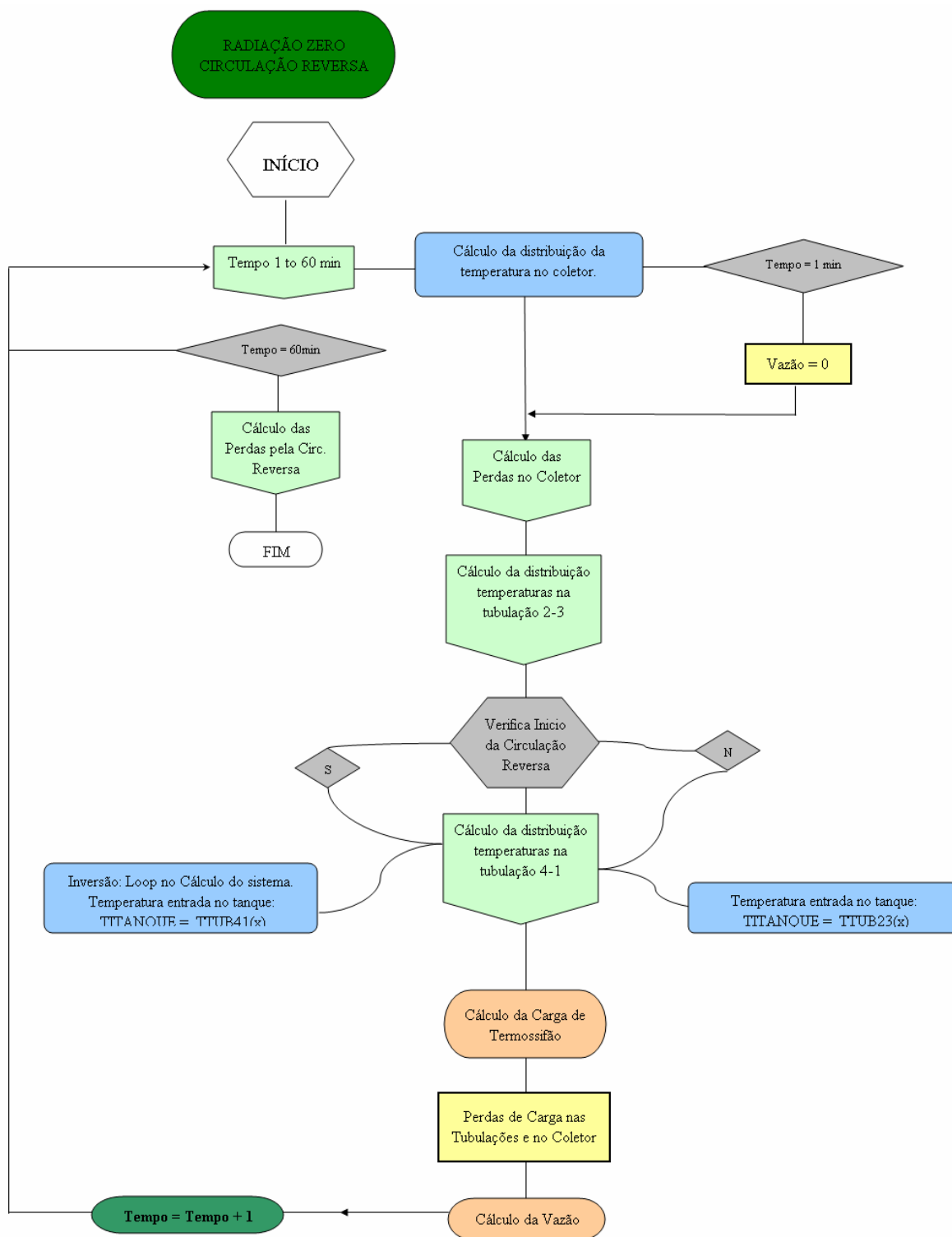


Figura 4.6. Diagrama do algoritmo de cálculo para circulação reversa.

No modelo do cálculo do comportamento do coletor à noite, definem-se algumas hipóteses simplificativas: a temperatura do coletor é considerada uniforme, sendo seu valor igual à média da temperatura de entrada e saída da água e o coeficiente de perdas térmicas do coletor solar é considerado independente da temperatura. A Fig. 4.7 representa as perdas térmicas por convecção e radiação do coletor.

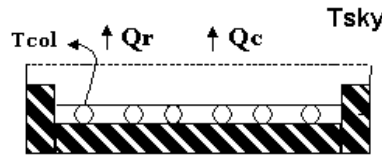


Figura 4.7. Perdas térmicas por radiação e convecção.

Deste modo, as perdas térmicas pelo topo no coletor são dadas pela Eq. (4.27):

$$Q_p = Q_c + Q_r = h_c(T_{col} - T_a) + h_r(T_{col} - T_{sky}) \quad (4.27)$$

onde Q_c é a taxa de transferência de calor por convecção externa, Q_r é a taxa de transferência de calor por radiação, h_r é o coeficiente de radiação e h_c é o coeficiente de convecção externo.

No momento que se considera o sistema parado por um instante de tempo, é realizado o balanço de energia no coletor para obter-se as novas temperaturas no sistema, possibilitando a avaliação da distribuição de temperaturas ao longo do circuito e permitindo o cálculo da vazão sem a radiação solar.

Para o cálculo da temperatura do fluido no coletor, $T_{col(t+\Delta t)}$, procede-se com o cálculo da capacidade calorífica efetiva entre o fluido e o absorvedor pelas Eqs. (4.28), (4.29), (4.30), (4.31), (4.32) e (4.33):

$$M_{\acute{a}gua} = \frac{1}{4}(NT.L_{col} \cdot \pi \phi_{int}^2) \rho_{\acute{a}gua} \quad (4.28)$$

$$M_{cobre} = \rho_{cobre} \left[(A_c \cdot \delta_{col}) + \left(NT \cdot \frac{\pi (\phi_{ext} - \phi_{int})^2}{4} \right) \cdot Y_{tub} \right] \quad (4.29)$$

$$C_{\acute{a}gua} = M_{\acute{a}gua} (C_p)_{\acute{a}gua} \quad (4.30)$$

$$C_{cobre} = M_{cobre} (C_p)_{cobre} \quad (4.31)$$

$$C_{ef} = C_{\acute{a}gua} + C_{cobre} \quad (4.32)$$

$$T_{col(t+\Delta t)} = T_{col(t)} - \frac{Q_p \cdot \Delta t}{C_{ef}} \quad (4.33)$$

onde $M_{\acute{a}gua}$ é massa de água, NT é o número de tubos do coletor, L_{col} é a largura do coletor, \varnothing_{int} é o diâmetro interno dos tubos do coletor (*risers*), $\rho_{\acute{a}gua}$ é a densidade da água, M_{cobre} é a massa de cobre, A_c é a área do absorvedor, δ_{col} é a espessura do absorvedor, ρ_{cobre} é a densidade do cobre, \varnothing_{ext} é o diâmetro externo dos tubos do coletor, Y_{tub} é o comprimento dos tubos do coletor, $C_{\acute{a}gua}$ é a capacidade térmica da água, C_{cobre} é a capacidade térmica do cobre, $(Cp)_{\acute{a}gua}$ é calor específico da água, $(Cp)_{cobre}$ é calor específico do cobre, C_{ef} é a capacidade térmica efetiva e Q_p são as perdas térmicas que ocorrem pelo coletor.

O mesmo processo é realizado no cálculo da temperatura das tubulações de saída e entrada do tanque. O gradiente de temperaturas no circuito é importante na verificação do início da circulação reversa, que deve ocorrer quando a temperatura do fluido saindo do coletor é inferior à temperatura do mesmo nas tubulações acima. Isso indica que haverá uma depressão, pois a água mais fria, portanto, mais pesada, não terá forças para empurrar o sistema no sentido natural, fazendo com que a água mais quente entre no coletor. A água quente deve perder energia térmica para o ambiente, geralmente a uma temperatura inferior, por transferência de calor, resfriando-se.

No cálculo da força de termossifão, H_t , na literatura americana conhecido como *driving head*, quando se inicia a circulação reversa, o sentido do circuito de cálculo no programa se altera, passando então a temperatura do fluido na entrada do coletor a ser a referenciada pela temperatura do fluido que vem do topo do tanque, pela tubulação *Tub.2-3*, vide Fig. 4.8. E a temperatura do fluido que entra na base do tanque, passa a ser referenciada pela temperatura do fluido que sai do coletor, pela tubulação *Tub.4-1*. Como a temperatura esperada da saída da água no coletor é menor que a temperatura que ela entrou, o valor de H_t deve ser negativo, indicando a reversão do sistema.

Pelo método iterativo, o ajuste da temperatura no acumulador (reservatório térmico) é realizado com constantes de controle, conforme Siqueira [2003] aborda em seu estudo para a circulação natural.

A determinação da vazão no sistema utiliza o modelo teórico do Balanço de Energia e da Quantidade de Movimento (B.E.Q.M). Deste modo, a queda de pressão devido ao atrito em um conduto fechado é dada pela Eq. (4.34):

$$H_f = f \frac{L}{D_{tub}} \frac{v^2}{2g} \quad (4.34)$$

onde f é o fator de atrito, L é o comprimento do conduto fechado, D_{tub} é o diâmetro do duto, g é a aceleração da gravidade e v é a velocidade do escoamento.

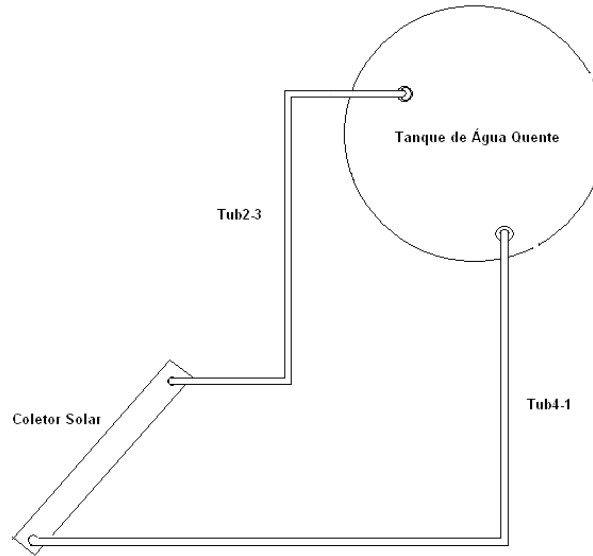


Figura 4.8. Circuito do sistema de aquecimento de água por energia solar.

No circuito de um sistema de aquecimento solar, as perdas por atrito no interior das paredes dos tubos no coletor solar e ao longo das tubulações do sistema são calculadas pela Eq. (4.35):

$$H_f = \left(f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \right)_{Col} + \left(f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \right)_{Tub2-3} + \left(f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \right)_{Tub4-1} \quad (4.35)$$

As perdas por atrito são apenas parcelas das quais ocorrem nos tubos, pois há também que se considerar as perdas pela presença de válvulas, conexões, e qualquer peça que possa provocar alterações no fluxo do fluido. As perdas nessas juntas, vide Eq. (4.36), são calculadas pela expressão:

$$H_f = \left(K_p \frac{v^2}{2g} \right) \quad (4.36)$$

onde que K_p é um fator que depende do tipo de conexão presente.

Combinando as Eqs. (4.35) e (4.36) tem-se como realizar o cálculo das perdas de pressão no circuito do sistema solar instalado, chegando-se à Eq. (4.37):

$$H_f = \left(f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \right)_{Col} + \left(f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \right)_{Tub2-3} + \left(f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \right)_{Tub4-1} + \left(K_p \frac{v^2}{2g} \right)_{Tub2-3} + \left(K_p \frac{v^2}{2g} \right)_{Tub4-1} \quad (4.37)$$

De acordo com Shitzer (1979), o escoamento nos sistemas solares para aquecimento de água geralmente são laminares, valendo a Eq. (4.38).

$$f = \frac{64}{Re}, \text{ para } 0 < Re < 2000 \quad (4.38)$$

No entanto, aplica-se a Eq. (4.39) em casos quando o escoamento é turbulento, sendo o valor do fator de atrito dado por:

$$f = 0,032, \text{ para } Re > 2000 \quad (4.39)$$

Para finalizar, Morrison e Ranatunga (1980), concluíram que é necessário corrigir o fator de atrito independentemente do tipo de escoamento, de acordo com a Eq. (4.40):

$$f_{corrigido} = f \left(1 + \frac{0,038}{(L/D)^{0,964}} \right) \quad (4.40)$$

A vazão mássica é definida pela Eq. (4.41) como:

$$\dot{m} = Av\rho \quad (4.41)$$

Portanto, em cada componente do sistema, a vazão é apresentada pela Eq. (4.42):

$$\dot{m} = \rho u_{col} \frac{\pi D_{col}^2}{4} = \rho u_{Tub2-3} \frac{\pi D_{Tub2-3}^2}{4} = \rho u_{Tub4-1} \frac{\pi D_{Tub4-1}^2}{4} \quad (4.42)$$

Pela igualdade de $H_f = H_t$, isolando-se a velocidade de cada componente da Eq. (4.42) e substituindo-a na Eq. (4.37), conclui-se que a vazão mássica é definida pela Eq. (4.43):

$$m = \sqrt{\frac{2gH_t}{EF}} \quad (4.43)$$

sendo EF o somatório da parcela de perdas nas tubulações por atrito e conexões. Estas parcelas estão representadas pela Eq. (4.44).

$$EF = \left(\frac{(\rho A_{col})^2}{fL} \right)_{col} + \left(\frac{(\rho A_{Tub2-3})^2}{fL} \right)_{Tub2-3} + \left(\frac{(\rho A_{Tub4-1})^2}{fL} \right)_{Tub4-1} \quad (4.44)$$

O cálculo da vazão por termossifão é um método iterativo, verificando-se sua convergência com um erro máximo de 1%. Para o cálculo da vazão à noite, por se tratar de uma vazão de magnitude baixa esperada, não se aplica esse critério de erro máximo.

Quando se tem a vazão reversa pelo balanço térmico no coletor, calcula-se, vide Eq. (4.45), a temperatura de saída do coletor por:

$$T_{out} = T_{Tub2-3\Delta Y} - \frac{Q_p \Delta t}{C_{ef} + (\dot{m} C_{p(água)} \Delta t)} \quad (4.45)$$

sendo $T_{Tub2-3\Delta Y}$ a temperatura da tubulação de água quente que liga o topo do coletor ao tanque, na posição Y ao longo de seu comprimento.

Outro importante fenômeno que ocorre durante a circulação reversa é que a vazão aumenta correspondentemente com a temperatura do fluido após passagem pelo coletor solar. Em determinadas situações, quando a temperatura do céu está abaixo da temperatura ambiente, o fluido perde calor. Pelo fato da tubulação estar com isolamento térmico, ela deve estar a uma temperatura maior que a temperatura do fluido. Desta forma, o ganho de temperatura do fluido pelas trocas térmicas com a tubulação, atua como uma força de termossifão adicional, provocando um aumento da vazão no sentido reverso.

Na circulação natural, as perdas de temperatura ao longo da tubulação, quando está isolada termicamente, são pequenas. Faz-se a modelagem matemática dividindo-se em n números de nós e é ignorada sua capacidade térmica. Entretanto, no caso da circulação reversa, considera-se a capacidade térmica da tubulação e determina-se a variação de temperatura do

fluido em relação à temperatura do tubo. Esse ganho de energia é calculado, vide Eq. (4.46), na distribuição de temperaturas ao longo da tubulação:

$$T_{Tub4-1(i)} = T_{Tub4-1(i-1)} + (T_{tbo} - T_{Tub4-1(i-1)}) e^{-\frac{U_{pTub4-1} Y_{Tub4-1(i)}}{\dot{m} C_P}} \quad (4.46)$$

sendo $T_{Tub4-1(i)}$ a temperatura da tubulação da água vinda do tanque para o coletor, o índice i o instante de tempo e $U_{pTub4-1}$ o coeficiente de perdas da tubulação hidráulica do segmento 4-1.

A variação de temperatura do tubo é obtida após o cálculo do fluxo de calor transferido para a água pela Eq. (4.47):

$$\Delta T_{Tbo(Y_{Tub4-1})} = \frac{Q_f \delta_{Tbo}}{k_{Tbo}} \quad (4.47)$$

sendo Q_f a quantidade de calor transferida para água, δ_{Tbo} a espessura do tubo e k_{Tbo} a condutividade térmica do material da tubulação.

4.5 Modelagem para o aquecedor auxiliar

Operando por termossifão, os sistemas auxiliares considerados no programa em desenvolvimento são de três tipos, conforme mostrados na Fig. 4.9:

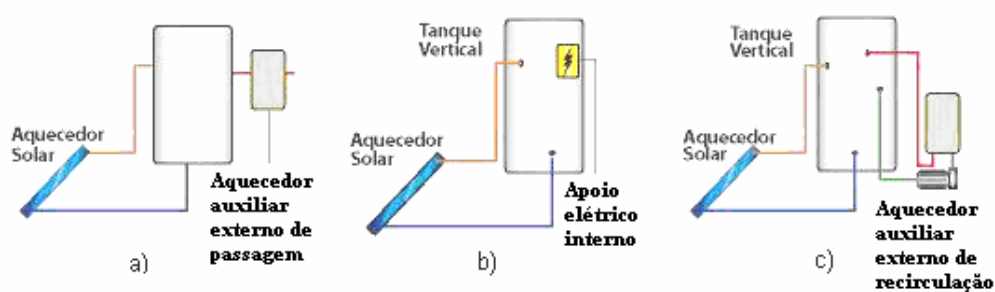


Figura 4.9. Representação esquemática do aquecedor auxiliar: a) resistência elétrica de passagem ou gás de passagem; b) resistência elétrica interna; c) resistência elétrica de passagem ou gás de passagem pré-aquecendo o tanque em paralelo.

Na configuração apresentada na Fig. 4.9(a), o aquecedor externo ao tanque, permite o uso integral da energia acumulada no reservatório e complementa a energia necessária para que a temperatura da água atinja o nível desejado. Dependendo do consumo e da temperatura ajustada,

essa configuração pode exigir, na prática, uma potência elevada e também um controle para regular a temperatura final do processo.

Na configuração da Fig. 4.9.(b), o aquecedor é um resistor blindado e, dependendo do volume do reservatório, é o mais viável e de menor custo de instalação. Um item importantíssimo para este sistema é o termostato, para que não haja desperdício de energia em seu acionamento. Segundo Lourenço (2000), o termostato ajustado acima de 60°C faz com que as perdas térmicas para o ambiente aumentem consideravelmente, onerando o usuário e diminuindo a eficiência do sistema solar de aquecimento. É recomendado, portanto sua programação em torno de 45-50°C.

Na configuração da Fig. 4.9(c), o aquecedor externo é acionado sempre que os níveis de temperatura do reservatório estiverem abaixo de um valor pré-fixado.

Como se busca sempre um melhor desempenho para os sistemas a utilizar, Treis (1991) afirma que é importante que o reservatório térmico possua nível ótimo de estratificação, pois com uma temperatura baixa de entrada no coletor, seria aumentado o rendimento do coletor. Isto inclui encontrar um ponto ótimo das possíveis alturas do termostato para acionamento do aquecimento auxiliar, que por sua vez está relacionado com as dimensões geométricas do sistema.

4.5.1 Sistema auxiliar elétrico interno

O sistema com a utilização de uma resistência elétrica interna ao tanque é o mais utilizado em conjunto com o coletor solar, principalmente pelo custo inicial de instalação.

Pesquisas relacionadas à distribuição da temperatura sobre a camada acima da resistência elétrica revelam que, após o acionamento da mesma, uma temperatura uniforme é alcançada em um breve período de tempo.

Deste modo, o aquecedor é modelado para elevar a temperatura da água na camada em que se encontra a resistência elétrica a uma taxa Q_{aux} quando o termostato localizado no tanque estiver acionado, ou seja, quando a temperatura em sua camada for menor que uma temperatura de referência (T_{ref}), pré-determinada pelo usuário para uso final. O termostato pode estar em série com a resistência fechando o circuito quando ligado ou em outra posição, fazendo um controle eletrônico de temperatura para acionar a resistência.

Para permitir uma melhor distribuição da temperatura ao longo das camadas do tanque, o modelo divide a potência da resistência elétrica pelo número de camadas acima da resistência no reservatório. Assim, calculam-se as novas temperaturas (Eq. 50) para as camadas acima do nó da

resistência elétrica proporcionalmente à diferença de temperatura de cada camada e à temperatura de acionamento do termostato, tal que:

$$T_{aux} = \frac{Q_{aux} \eta_{aq} \Delta t + m_{aux} C_p T_{aux}^0}{M_{\acute{a}gua} C_p} \quad (4.48)$$

Na Eq. (4.48), Q_{aux} é a potência fornecida pelo aquecedor, T_{aux}^0 é a temperatura anterior ao acionamento da resistência, T_{aux} é a temperatura após o acionamento da resistência e $M_{\acute{a}gua}$ é a massa de água na camada onde está a resistência elétrica.

Após o processamento do balanço térmico no reservatório, ocorre o ajuste das novas temperaturas de todas as camadas do reservatório.

O software TermoSim em sua modelagem computacional inclui o uso de um temporizador com a opção de o usuário avaliar as vantagens ou a viabilidade do seu uso, buscando uma otimização pelo pré-agendamento das demandas de água quente. Na Fig. 4.10 encontra-se o diagrama representativo do algoritmo de lógica aplicado para o temporizador utilizado.

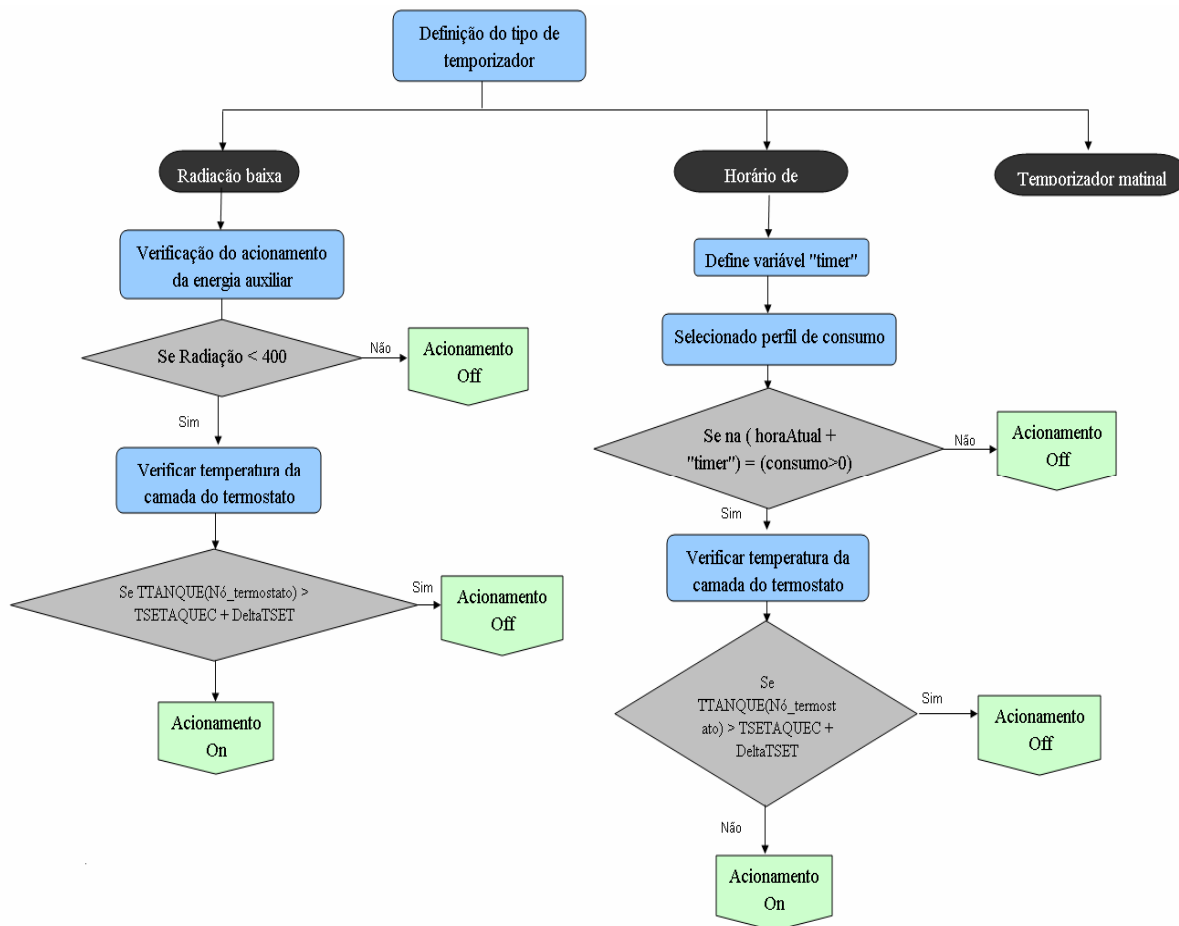


Figura 4.10. Algoritmo de programação para o cálculo do acionamento dos temporizadores.

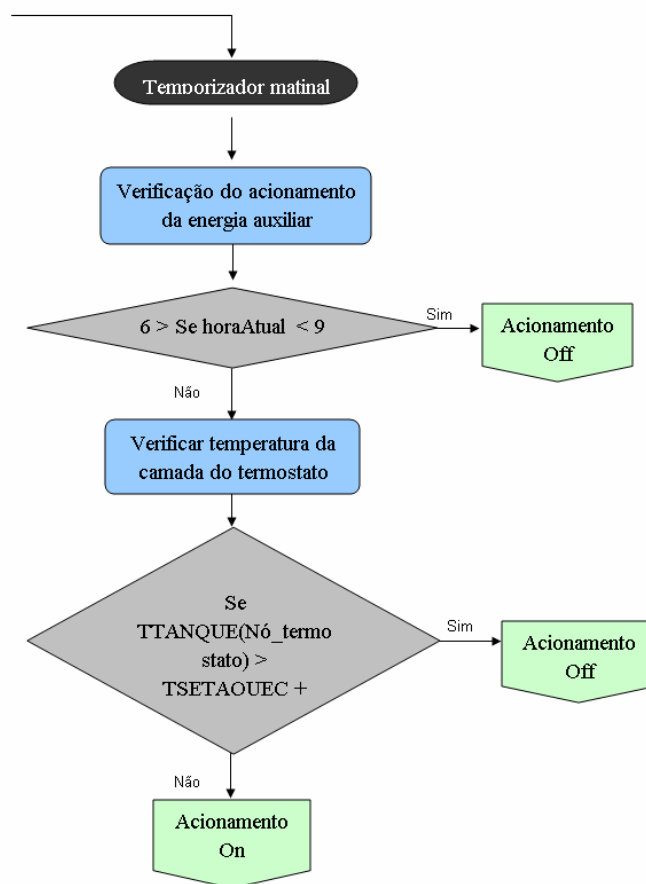


Figura 4.10 (continuação). Algoritmo de programação para o cálculo do acionamento dos temporizadores.

4.5.2 Sistema auxiliar em série

No modelo com o aquecedor auxiliar em série com o consumo, o aquecedor externo é utilizado como complemento da energia necessária para aquecer a água na temperatura de consumo desejada. A fonte de energia para esta configuração pode ser com resistência elétrica de passagem ou com gás de passagem, ambas com controle eletrônico de temperatura.

O programa utiliza a lógica dos aquecedores com controles eletrônicos, atuando de forma que o usuário defina a temperatura de consumo da água quente, e fazendo o balanço de quantidade de calor (Eq. 51) necessário para aquecer a água de uma temperatura de saída do reservatório até a temperatura desejada. Assim, não há necessidade de um aquecimento desnecessário quando não há consumo de água quente.

$$Q_{gás} = m_{gás} PC \eta_{aq} t_{ac} \quad (4.49)$$

Na Eq. (4.49), $Q_{gás}$ é a energia do gás utilizada para aquecer a água, PC é o poder calórico do gás, η_{aq} é o rendimento do aquecedor, t_{ac} é o tempo em que o aquecedor ficou ligado e $m_{gás}$ é a vazão nominal do gás.

Para o aquecedor elétrico externo de passagem, a lógica do programa faz com que a resistência elétrica acionada por um termostato transfira a energia necessária para que se mantenha a temperatura de consumo desejada. Também neste caso é válida a análise de consumo de energia comparada a sistema com resistência interna ao tanque de água quente. A taxa de energia utilizada pela água Eq. (4.50) para aquecê-la até a temperatura configurada seria dada pela equação:

$$Q_{água} = \dot{m}_{cons} C_p (\Delta T) \quad (4.50)$$

onde, \dot{m}_{cons} é a vazão nominal de consumo, C_p é a capacidade térmica da água e ΔT é a diferença de temperatura entre a temperatura desejada para o consumo e a temperatura de saída da água à tubulação.

A energia elétrica consumida é dada simplesmente multiplicando-se a potência da resistência elétrica pelo tempo em que a resistência foi acionada.

4.5.3 Sistema auxiliar em paralelo

No sistema com o aquecedor auxiliar em paralelo (externo) com o reservatório, tem-se as opções de utilizar como aquecedor externo uma resistência elétrica de passagem ou a gás. Se a temperatura na camada do termostato conectada ao controle eletrônico (T_{ref}) for menor que a temperatura definida para água de consumo (T_{cons}), a resistência elétrica é acionada e a nova temperatura (Eq. 53) no tanque a cada minuto é dada por:

$$T_{sai} = \frac{P_{res}}{\dot{m}_{aq} C_p} + T_{ent} - P_{erdas} \quad (4.51)$$

Na Eq. (4.51), P_{res} é a potência da resistência elétrica em Watts (no caso de gás, utiliza-se a energia do gás $Q_{gás}$), m_{aq} é a vazão de água nominal do aquecedor, C_p é a calor específico da água, T_{ent} é a temperatura de entrada no aquecedor, P_{erdas} , vide (Eq. 54), são as perdas térmicas na tubulação e T_{sai} é a temperatura de saída do aquecedor para o reservatório.

$$P_{erdas} = A_{lateral} K_{isol} \frac{(T_{ent} - T_a)}{E_{isol}} \quad (4.52)$$

Na Eq. (4.52), $A_{lateral}$ é a área lateral das tubulações do aquecedor auxiliar, K_{isol} é a condutividade térmica do isolamento e E_{isol} é a espessura do isolamento usado nas tubulações da energia auxiliar.

Após a temperatura na camada do termostato atingir ou ser superior à temperatura $T_{demanda}$, o termostato é desligado e o tanque rearranjará suas temperaturas conforme o balanço de energia no tanque. O aplicativo busca, portanto, simular o comportamento de um aquecedor real. Porém, para garantir que a temperatura de aquecimento não atinja valores irreais, considera-se que o aquecedor pode produzir uma variação de temperatura em torno de 20°C para sua vazão nominal.

4.5.4 Modelagem da análise econômica

A economia de energia que uma instalação de aquecimento por energia solar pode obter depende da comparação com a energia que é consumida com um sistema tradicional de aquecimento, anterior a instalação de um sistema com coletores solares.

A decisão quanto a troca de equipamentos convencionais de aquecimento por energia solar, se constitui de um exemplo de utilização de conceitos de matemática financeira;

O resumo financeiro aplicado no software TermoSim utiliza o conceito de alguns índices financeiros, como *payback* e a taxa interna de retorno, para fins de comparação com outros sistemas. Não é contemplado no programa de simulação a energia elétrica consumida quando da utilização da bomba em caso de regime por circulação forçada.

Inicialmente, como dados de entrada, é necessário a determinação de alguns parâmetros fundamentais para um resultado mais preciso da simulação, como:

- Custo da energia (R\$ / kWh);

- Custo do coletor (R\$ / m²);
- Custo do reservatório térmico (R\$ / m³)
- Custo dos acessórios (Tubulações, conexões)
- Custo da manutenção;
- Valor residual;
- Tempo de vida do sistema;
- Rendimento da poupança;
- Taxa anual de aumento do custo da energia;

Os custos iniciais da instalação simulada são determinados pela Eq. (4.53), somando os custos do coletor C_{col} , do reservatório C_{reserv} e dos acessórios C_{access} :

$$C_{I(1)} = C_{col(1)} + C_{reserv(1)} + C_{access(1)} \quad (4.53)$$

Em todos os cálculos realizados para o sistema simulado, o programa automaticamente obtém resultados simultaneamente para o sistema a comparar, determinado pelo usuário, geralmente um sistema convencional, como chuveiro elétrico, por exemplo. Neste caso teríamos um custo inicial para o sistema comparativo denominado com novo índice $C_{I(2)}$.

A manutenção é definida como uma taxa anual referente ao valor inicial do investimento do sistema. Considerando-se este índice para a variável manutenção dos equipamentos, é obtido o custo mensal médio de manutenção, em R\$, pela Eq. (4.54):

$$OeM = \frac{C_M \cdot C_I}{12} \quad (4.54)$$

onde C_M é a taxa de manutenção anual em valores percentuais e C_I é o custo inicial total do sistema instalado.

Para determinar de forma simples as receitas, ou seja, as economias de energia mensais, é aplicada uma comparação dos gastos de energia elétrica, no caso de utilização de resistências elétricas para o aquecimento auxiliar ou consumo em m³ para uso de gás, com o que se gastaria caso não houvesse o aquecimento por energia solar. É possível também comparar dois sistemas de aquecimento solar através dos índices financeiros, e prever qual seria o mais viável economicamente atrelado as suas eficiências na simulação realizada. De forma simplificada, a Eq. (4.55) determina as economias mensais com base no período simulado:

$$E_{econ} = \left(\frac{C_{consumo} \cdot C_{en}}{NM} + OeM \right)_2 - \left(\frac{C_{consumo} \cdot C_{en}}{NM} + OeM \right)_1 \quad (4.55)$$

onde $C_{consumo}$ é o consumo de energia acumulado, em kWh , durante o período simulado, C_{en} é o valor do custo de energia elétrica cobrado pelas empresas fornecedoras de energia, NM é o número de meses simulados e os índices 1 e 2 representam valores da simulação e valores do sistema comparado, como um sistema de chuveiro elétrico, por exemplo, respectivamente. Dividindo-se os custos iniciais pelo valor de economia possível mensal, conforme Eq. (4.56), estima-se chamado de *payback simples*, ou seja, o tempo em que as economias que ele gera se equivalem ao investimento inicial do sistema.

$$(Payback)_{simples} = \frac{C_{I(1)}}{E_{econ}} \quad (4.56)$$

O índice *TIR*, também conhecido por taxa interna de retorno é a rentabilidade sobre a aplicação de um investimento. A taxa de juros torna nula a diferença entre o valor presente dos recebimentos e o valor presente dos desembolsos e, por isso, é geralmente determinada por tentativas e interpolações.

Neste trabalho, a avaliação do investimento realizado é feita determinando-se a taxa de juros que torna equivalente o valor presente de um fluxo de caixa de economias mensais ao investimento inicial. Este método pode ser representado na Eq. (4.58):

$$0 = \sum \frac{(FTM + V_{res})}{(1 + TIR)^{nt}} - C_I \quad (4.58)$$

onde nt é o número total de meses total considerados pela vida útil declarada, FTM é o valor acumulado pelas economias mensais considerado o aumento anual do custo de energia e V_{res} é o valor residual do sistema solar de aquecimento ao final da vida útil.

5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

No programa TermoSim, os modelos matemáticos do coletor solar e balanço térmico do tanque foram validados através do confronto com resultados experimentais de Siqueira (2003). Lafay (2005) apresenta suas comparações experimentais com os resultados dos cálculos do programa validando, portanto, as simulações do tanque isolado, dos coletores e dos aquecedores auxiliares a gás. Estas comparações mostram a adequação dos resultados calculados para a distribuição térmica nas camadas internas do reservatório.

No desenvolvimento do programa de simulação TermoSim na versão 3.0, utilizou-se modelos matemáticos validados para cada componente de um sistema de aquecimento solar. Com o programa finalizado, é conveniente realizar algumas análises de interesse científico para a área de energia solar, demonstrando o potencial do software disponível.

Neste capítulo serão apresentados os resultados e as análises das simulações executadas. O objetivo foi utilizar a capacidade do programa na versão atual para realizar os estudos científicos tratados neste trabalho.

5.1 Procedimento para as simulações no TermoSim

A lógica de programação utilizada para realizar as simulações é apresentada no fluxograma simplificado da Fig. 5.1. Foi aplicado o método de substituições sucessivas para a determinação da vazão mássica, o método de Euler no balanço de energia no reservatório térmico e a Primeira Regra de Simpson na determinação da força motriz em cada um dos elementos do circuito do sistema, conforme Siqueira (2003).

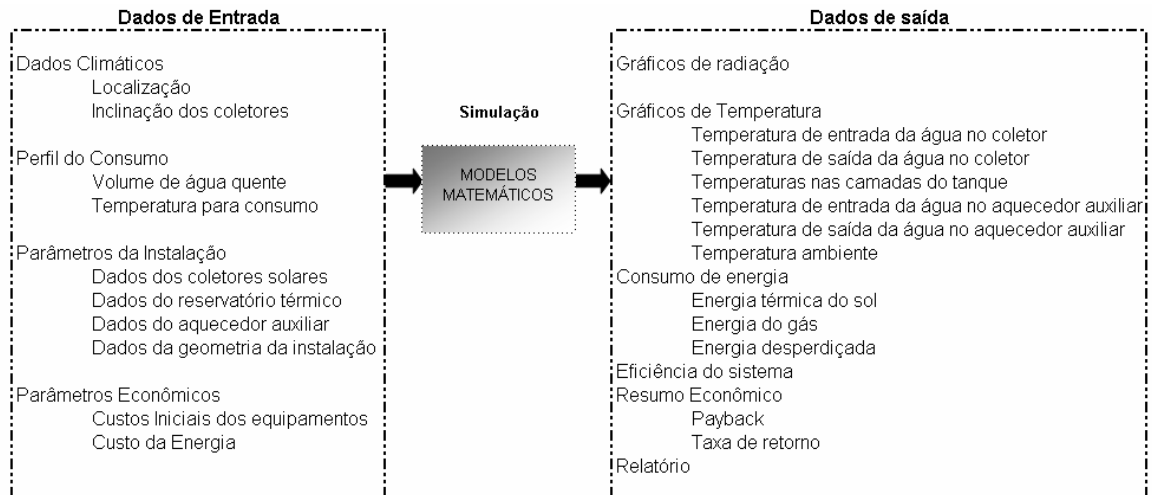


Figura 5.1. Diagrama dos dados de entrada e saída para os modelos de uma simulação.

Na Fig. 5.2, tem-se um diagrama simplificado dos dados de entradas e saídas do programa. Em relação aos dados meteorológicos, ou seja, para a escolha da localidade a simular, a geração dos dados, através do programa SeqMetBr, é descrita pelo fluxograma da Fig. 5.3.

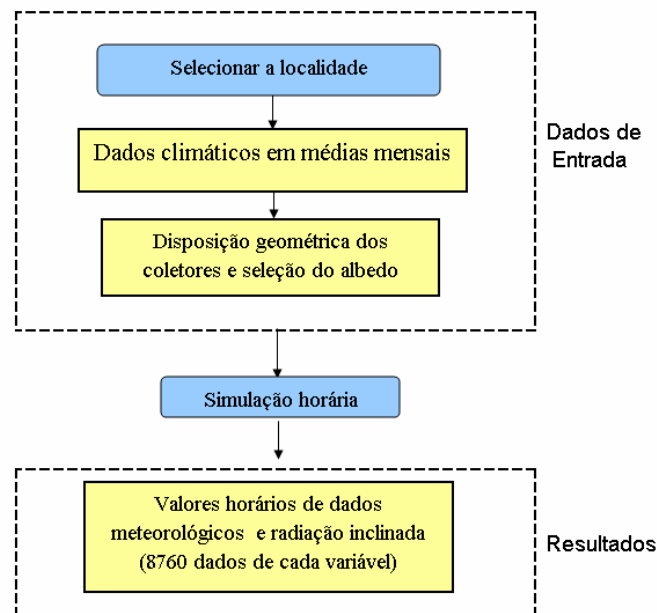


Figura 5.2. Diagrama simplificado da geração dos dados meteorológicos.

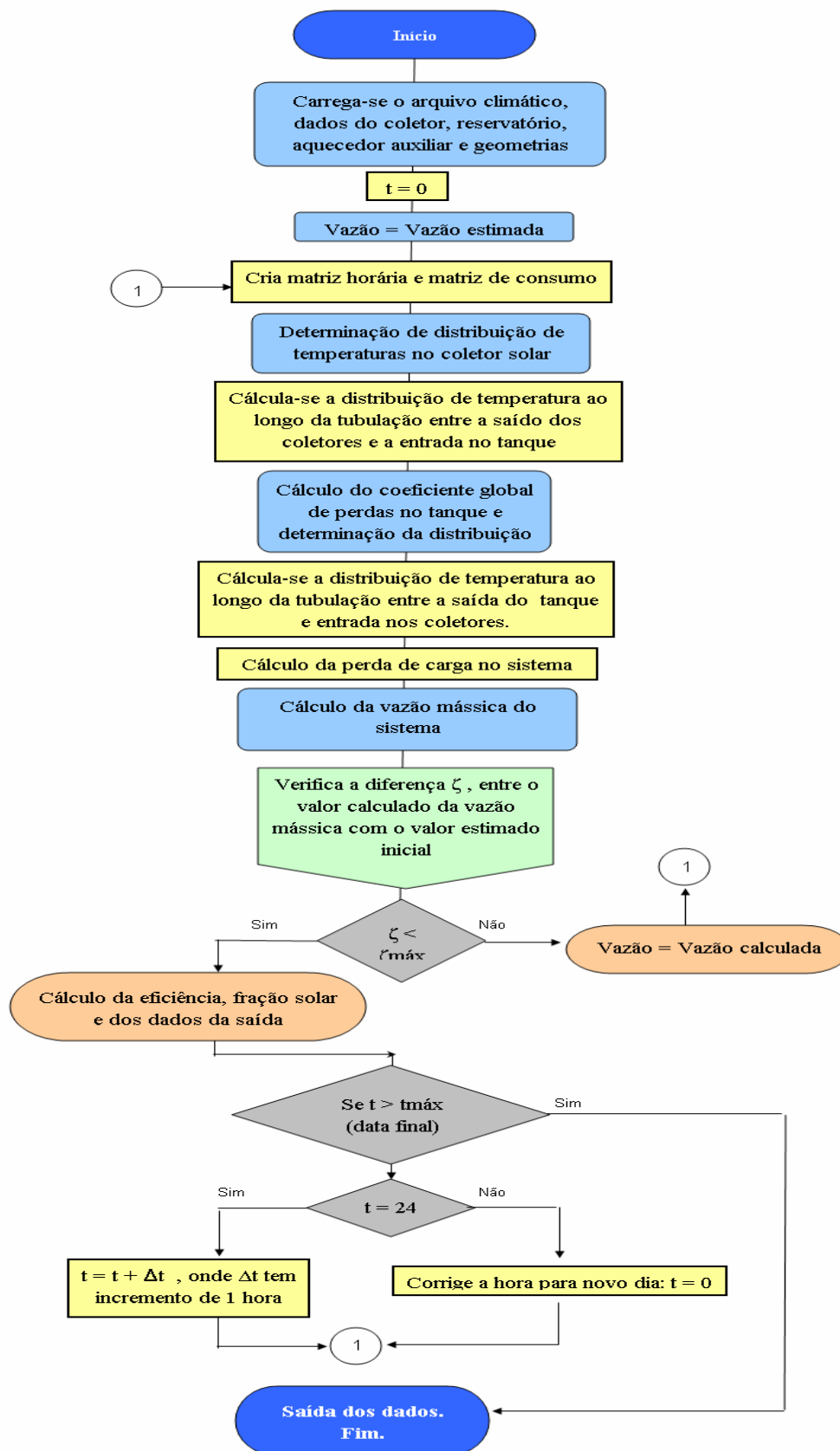


Figura 5.3. Algoritmo de programação simplificado da simulação do programa.

Geralmente adota-se a cidade de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul, para a realização das simulações e análises devido à localização da UFRGS. Porém, atendendo às sugestões de trabalhos científicos desta universidade para realizar simulações em outras localidades, optou-se por realizar neste trabalho as simulações para a cidade de Caxias do Sul, também localizada no Rio Grande do Sul, na latitude 29° S e 51° W. Essa cidade é caracterizada principalmente por temperaturas mais baixas que Porto Alegre e, portanto, tem interessantes aspectos para análise do aproveitamento solar para aquecimento de água na região.

A Fig. 5.4 mostra a radiação solar incidente na cidade de Caxias do Sul, em base horária sobre um plano inclinado a 45° para o Norte, comparados com os valores da radiação solar horizontal ao longo de cinco dias no verão. E na Fig. 5.5, tem-se o mesmo comparativo, porém para dias de inverno.

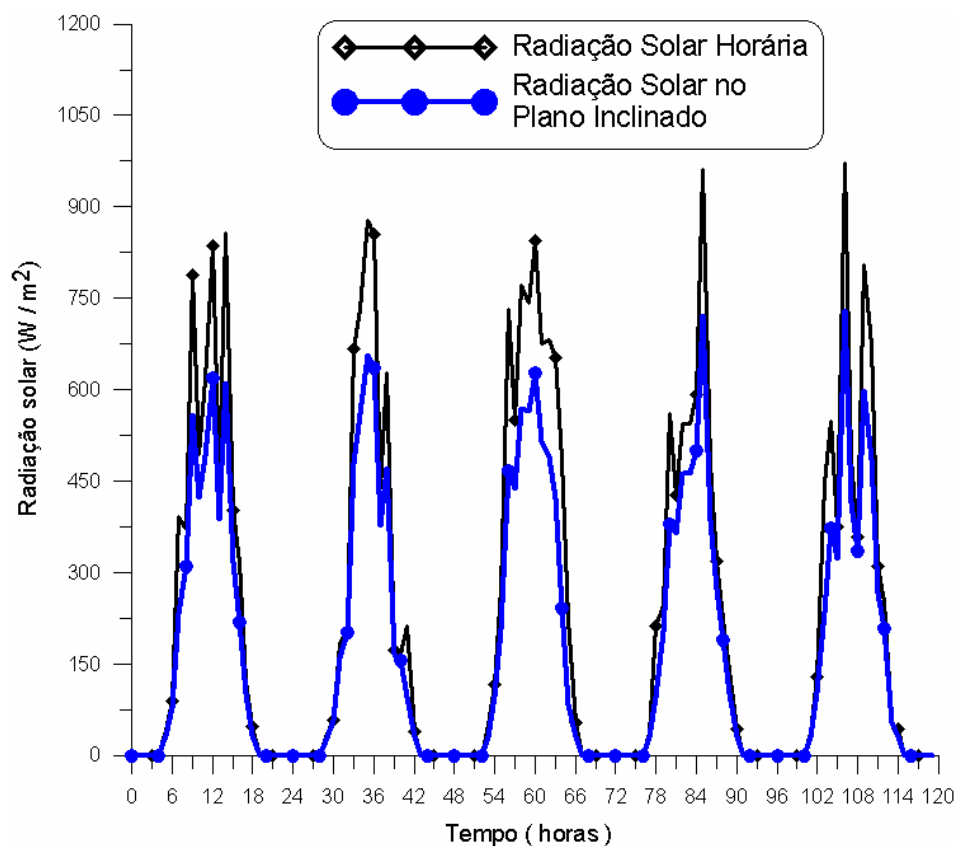


Figura 5.4. Radiação solar incidente nos coletores solares no verão, com inclinação de 45° .

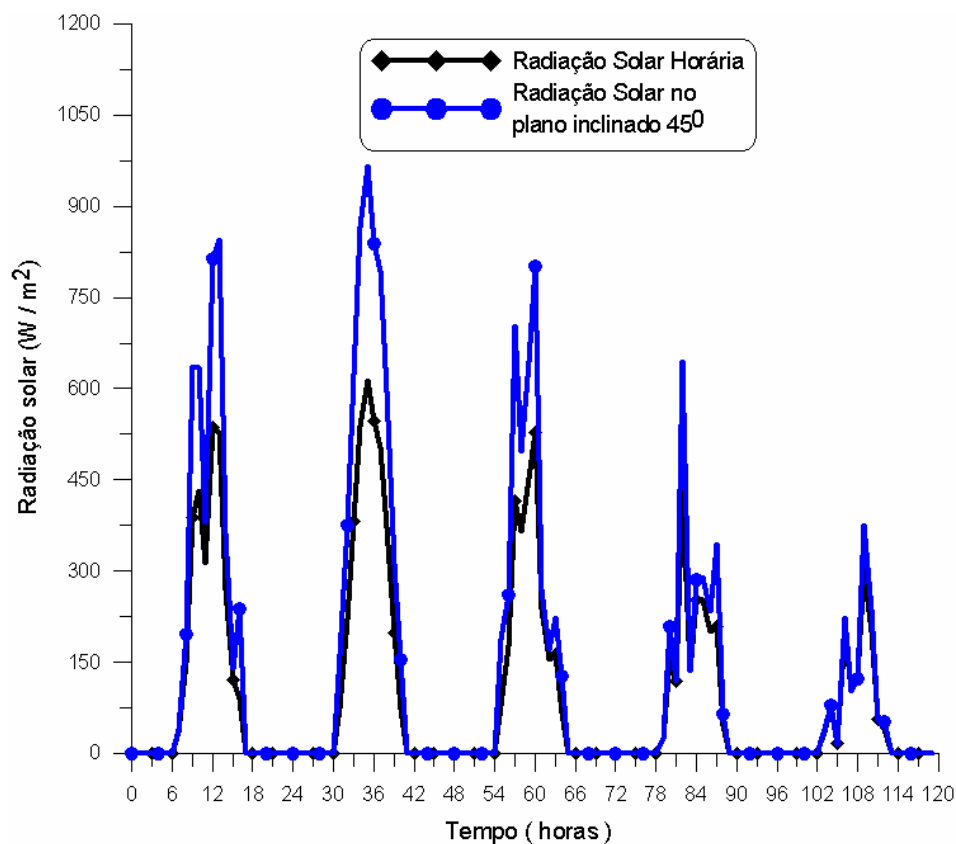


Figura 5.5. Radiação solar incidente nos coletores solares no inverno, com inclinação de 45°.

É interessante observar que há um ganho considerável de radiação solar a ser absorvida pelos coletores no inverno, ao mesmo tempo, no entanto, em que no verão a inclinação faz com que se ocorra um desperdício de energia, justamente porque na região sul do Brasil, pelo seu clima subtropical e com inverno rigoroso, faz-se a opção por maximizar a inclinação para quando há maior necessidade de água quente, que é no inverno.

A Fig. 5.6 apresenta os dados de radiação solar inclinada no plano do coletor a 45° com a horizontal ao longo de um ano simulado, extraído diretamente da interface gráfica do TermoSim para a cidade de Caxias do Sul.

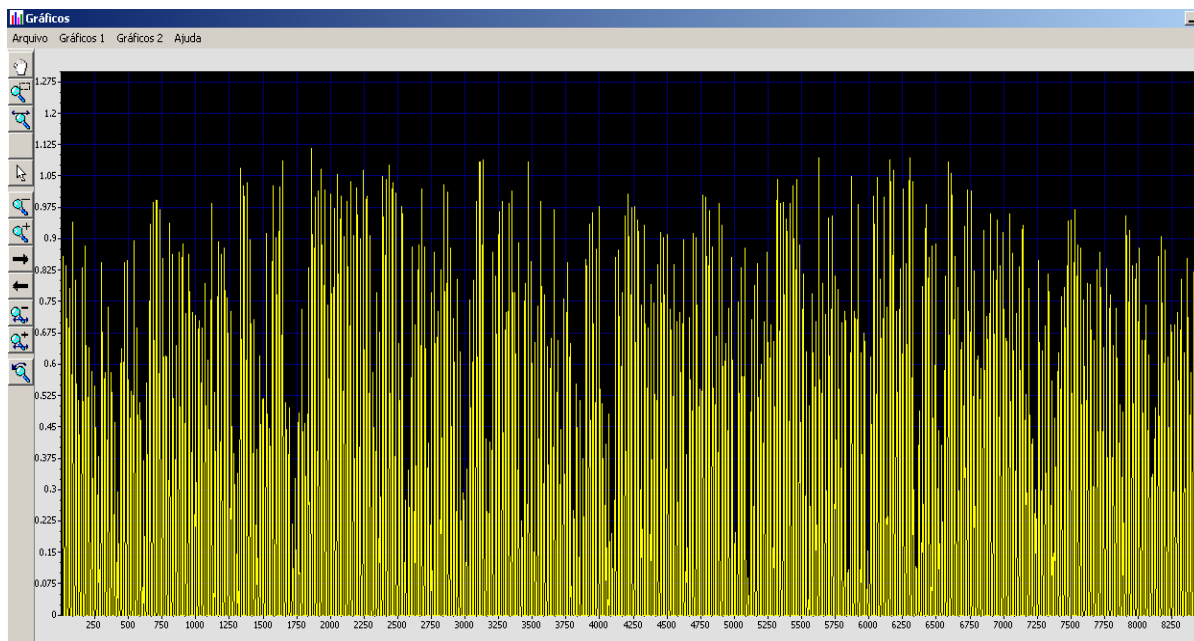


Figura 5.6. Radiação solar inclinada anual na cidade de Caxias do Sul.

Os dados de entrada das instalações utilizados são iguais para os sistemas simulados, conforme Tab. 3. Para simulações com parâmetros diferentes dos apresentados na Tab. 3, estes serão apresentados ao longo deste capítulo conforme a necessidade. Os parâmetros da Tab. 3 foram os mesmos apresentados por Aita (2006), por serem constituintes da geometria de instalações próximas da realidade e para manter uma referência na continuidade dos trabalhos de análises destes sistemas.

Com esta metodologia aplicada, foram simulados seis sistemas de aquecimento solares para realização das análises, sendo cada conjunto descrito como:

- Sistema 1: coletores solares, reservatório térmico e gás natural de passagem externo em paralelo ao tanque como energia auxiliar;
- Sistema 2: coletores solares, reservatório térmico e gás natural na linha de consumo como energia auxiliar;
- Sistema 3: coletores solares, reservatório térmico e resistência elétrica de passagem externo em paralelo como energia auxiliar;
- Sistema 4: coletores solares, reservatório térmico e resistência elétrica na linha do consumo como energia auxiliar;

- Sistema 5: coletores solares, reservatório térmico e resistência elétrica no interior do tanque como energia de apoio;
- Sistema 6: coletores solares e reservatório térmico sem energia auxiliar;

Tabela 3. Dados da instalação de um sistema de aquecimento de água por energia solar.

Dados da Instalação	
Reservatório Térmico	
Material	Aço Inox
Tipo de isolamento	Lã de vidro
Espessura do isolamento	60 mm
Espessura da chapa	1 mm
Orientação do tanque	Vertical
Coeficiente global de perdas térmicas	4 W/ m ²
Altura entre o topo do coletor e o fundo do tanque	1 m
Coletores Solares	
Distância entre tubos	50 mm
Espessura do absorvedor	0,3 mm
Diâmetro interno do tubo cabeçote (<i>header</i>)	26 mm
Diâmetro interno do tubo elevador (<i>riser</i>)	12 mm
Comprimento do coletor	1200 mm
Largura do coletor	500 mm
Espessura da cobertura de vidro	3 mm
Distância da cobertura de vidro até o absorvedor	60 mm
Espessura do isolamento lateral	30 mm
Espessura do isolamento do fundo	60 mm
Propriedades dos materiais	
Absortância do absorvedor	0,95
Emitância do absorvedor	0,95
Condutividade do absorvedor (W/ m°C)	386
Transmitância da cobertura – Vidro comum	0,79
Emitância da cobertura	0,95

O gás natural é neste trabalho referenciado principalmente por suas vantagens ambientais perante aos outros combustíveis disponíveis, além de seu mercado em expansão e a preços competitivos.

Os dados das características do aquecedor auxiliar para cada sistema estão presentes na simulação conforme Tab. 4.

Tabela 4. Dados dos aquecedores auxiliares.

	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4	Sistema 5
Tipo	Passagem, conectado em paralelo	Passagem, na linha do consumo	Passagem, conectado em paralelo	Passagem, na linha do consumo	Interno no tanque
Fonte de energia	Gás natural	Gás natural	Resistência elétrica	Resistência elétrica	Resistência elétrica
Vazão nominal	8 l/min	8 l/min	4 l/min	4 l/min	4 l/min
Consumo nominal de gás ou Potência da resistência elétrica	1,6 m ³ /h	1,6 m ³ /h	1,6 m ³ /h 5000 watts	5000 watts	5000 watts
Rendimento	0,81	0,81	0,95	0,95	0,95

5.2 Simulação anual para análise do comportamento energético dos sistemas

A geometria dos sistemas para a simulação anual adotada é mostrada na Fig. 5.7, representando os sistemas de aquecimento auxiliar em paralelo, e na Fig. 5.8, os sistemas auxiliares na linha de consumo. Os parâmetros da simulação estão descritos na Tab. 5.

Tabela 5. Parâmetros das simulações.

Parâmetros de simulação	
Volume do tanque	600 litros
Diâmetro do tanque	0,8 m
Altura do tanque	1,2 m
Razão de aspecto	1,5
Temperatura de ajuste do Termostato	45°C
Consumo de água quente diário	300 litros/dia
Horário do consumo matinal	10h
Temperatura de consumo da água quente	40°C
Qualidade do coletor solar	$F_R(\tau\alpha)=0,7$ e $F_R U_L=7,17$
Número de coletores	4
Área total	2,3 m ²

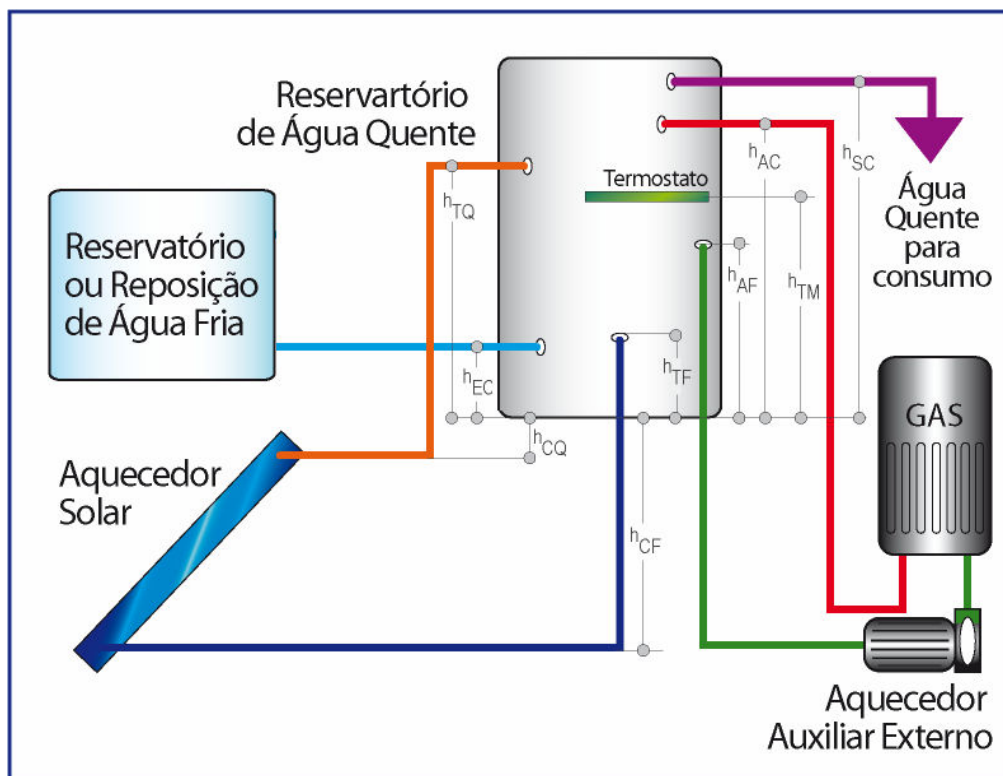


Figura 5.7. Representação da geometria para um sistema com aquecimento auxiliar em paralelo.

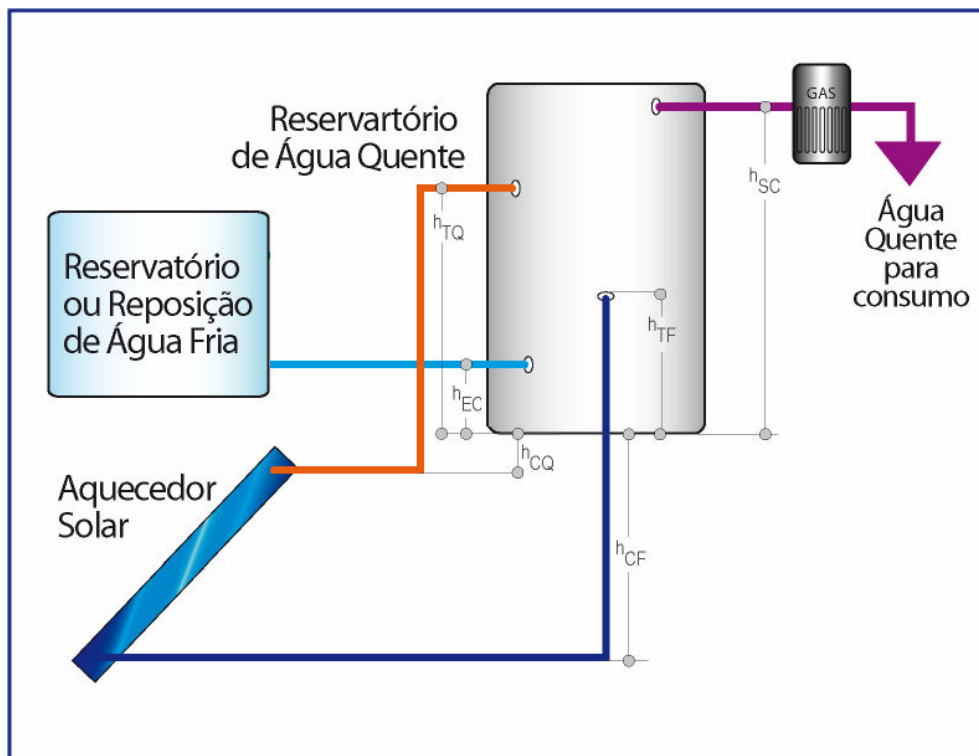


Figura 5.8. Representação da geometria para um sistema com aquecimento auxiliar em série com o consumo.

Os resultados são apresentados numa análise gráfica, na qual primeiramente faz-se referência à energia térmica do aquecimento auxiliar do período, conforme gráficos da Fig. 5.9, para cada sistema.

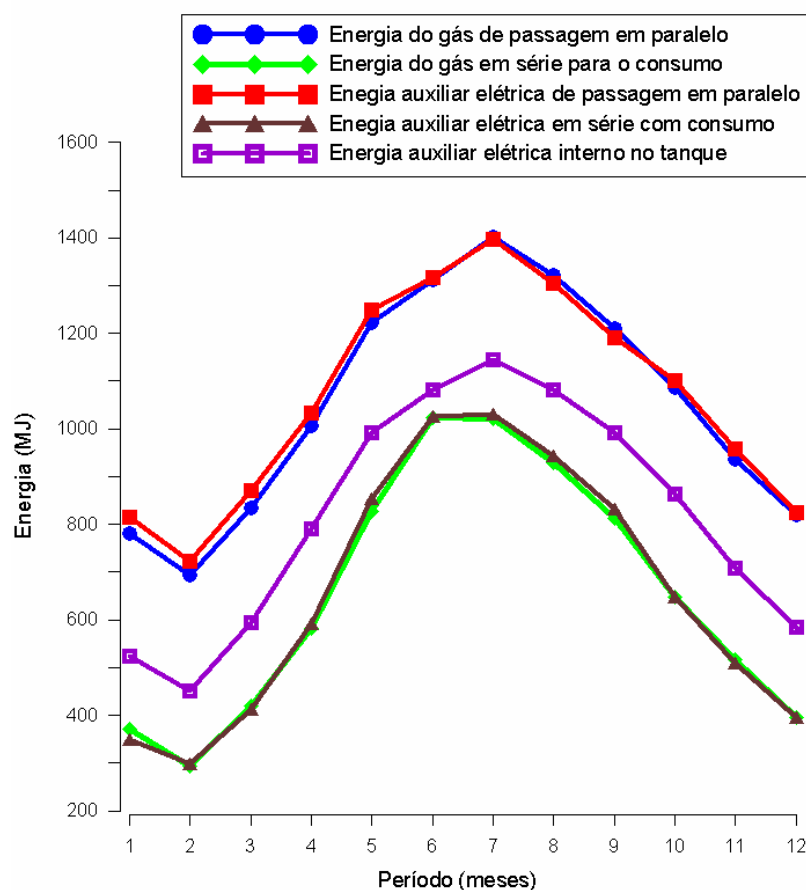


Figura 5.9. Gráfico do consumo de energia auxiliar dos sistemas simulados.

A priori percebe-se que o sistema que mais utiliza a energia auxiliar são as configurações com gás e elétrico de passagem instalados externamente, em paralelo ao reservatório. Entretanto, este consumo maior se dá principalmente durante as estações de inverno, que na cidade simulada são bastante intensas, ocasionando uma demanda maior no período. Os sistemas de gás e elétrico de passagem na linha de consumo, com controle eletrônico de temperatura, aquecendo a água o suficiente para que atenda à necessidade da temperatura de consumo apresenta uma redução considerável de consumo de energia auxiliar, em torno de 5-10%. Nestes casos com aquecedores em série na linha do consumo, sua utilização ocorre apenas nos horários de consumo e teoricamente tem-se um bom aproveitamento de energia, gastando somente a energia

necessária para elevar a água à temperatura de consumo. Deve-se atentar ao fato de que pelo conceito de aquecimento da água do reservatório pelo gás de passagem, este resultado é sensível a variações do perfil de consumo, da temperatura de consumo e da posição do termostato presente no tanque.

O sistema elétrico com resistência elétrica interna ao tanque, destacou-se pelo menor consumo de energia auxiliar dentre os sistemas simulados com acumulação de energia térmica auxiliar, devido ao fato de sua configuração, com a altura do termostato atuando de forma efetiva, e mantendo a resistência acionada sempre que determinada temperatura de sua camada estiver abaixo de uma determinada faixa de referência para assegurar a temperatura requisitada da demanda, com menor tempo de acionamento possível.

Para as estações climáticas definidas, verão e inverno, percebe-se que com o gás natural a energia fornecida para completar a energia térmica de origem solar armazenada no reservatório é aproximadamente o dobro. E o mesmo fato é presenciado também com os sistemas auxiliares com aquecimento elétrico.

É apresentada na Fig. 5.10 a energia desperdiçada em cada sistema simulado durante o ano na cidade de Caxias do Sul.

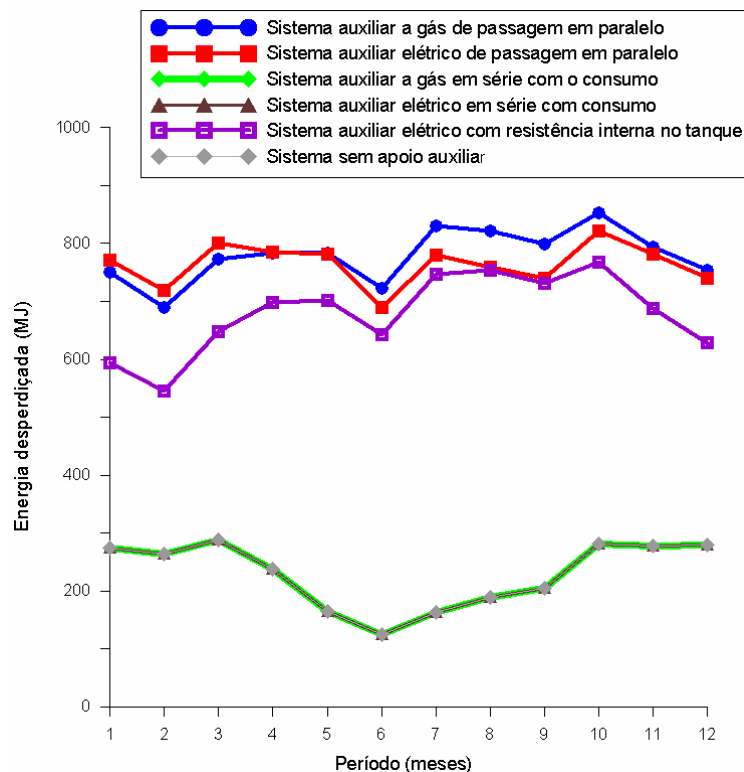


Figura 5.10. Energia desperdiçada nos sistemas simulados.

As perdas energéticas são a soma da energia térmica proveniente do sol e da energia auxiliar subtraídas da energia térmica consumida. Com este conceito, um sistema sem apoio auxiliar aparenta ser o de menor desperdício, juntamente com os sistemas em série na linha de consumo. E realmente é, exceto pelo fato de que, dependendo do número de coletores instalados, a energia útil nos coletores pode não ser o suficiente para atingir a temperatura de demanda em horários diversos, indicando, neste aspecto, uma falha de sua principal função: disponibilizar água quente a qualquer hora do dia.

Por outro lado, percebe-se que o sistema a gás de passagem em paralelo, que teve um elevado consumo de energia, não utilizou grande parte dessa energia para o fornecimento de água quente nas horas de demanda, e sim, para a manutenção da temperatura no reservatório durante o tempo sem consumo de água quente. Vale lembrar que a demanda configurada para esta simulação está definida para 50% do volume do reservatório, ou seja, 300 litros, consumidos em regime matinal num total de uma hora. A síntese dos resultados anuais estão apresentados na Tab. 6 a seguir.

Tab. 6. Consumo de energia auxiliar anual dos sistemas simulados em MJ.

	<i>Gás de passagem paralelo externo</i>	<i>Elétrico de passagem paralelo externo</i>	<i>Gás de passagem na linha do consumo</i>	<i>Elétrico de passagem na linha do consumo</i>	<i>Elétrico com resistência interna ao tanque</i>
Consumo de energia auxiliar	16050.2	15112.2	8310.2	7894.3	9811.2
Consumo de energia térmica	9940.1	9940.1	5665.9	5665.9	9462.7
Energia térmica do Sol	6944.7	6743.1	8416.6	8416.6	8115.6
Energia desperdiçada	13052.6	11914.4	2750.2	2750.2	8147.3

5.3 Análise de simulações com temporizadores

A utilização de um artifício para maximizar o rendimento de instalações solares assim como evitar desperdícios, como o uso de temporizadores eletrônicos, deve ser muito bem avaliada para cada caso para ser um investimento de sucesso.

Buscou-se, nas simulações, realizar análises de três tipos de artifícios de utilização de temporizadores na aplicação solar: variável de consumo, de radiação e horária. A seguir, são apresentados os resultados das simulações com as características padrão desta dissertação, porém modificando-se o consumo, que antes era apenas matinal, para matinal e noturno, com total de uma hora de consumo de 300 litros de água.

5.3.1 Análise de simulações com temporizadores pela variável de consumo

Para a variável de consumo é necessário conhecer o perfil de utilização do local da instalação e, desse modo, deve-se pré-definir em quantas horas antes do consumo você deseja que o acionamento da energia auxiliar esteja disponível para o acionamento ou não, de acordo com a atual estratificação de temperaturas no tanque.

Tem-se na Fig. 5.11 um sistema de aquecimento por energia solar com energia auxiliar a gás em paralelo para três dias típicos de inverno, e na Fig. 5.12, para dias típicos de verão, com resultados para variações de consumo de até três horas.

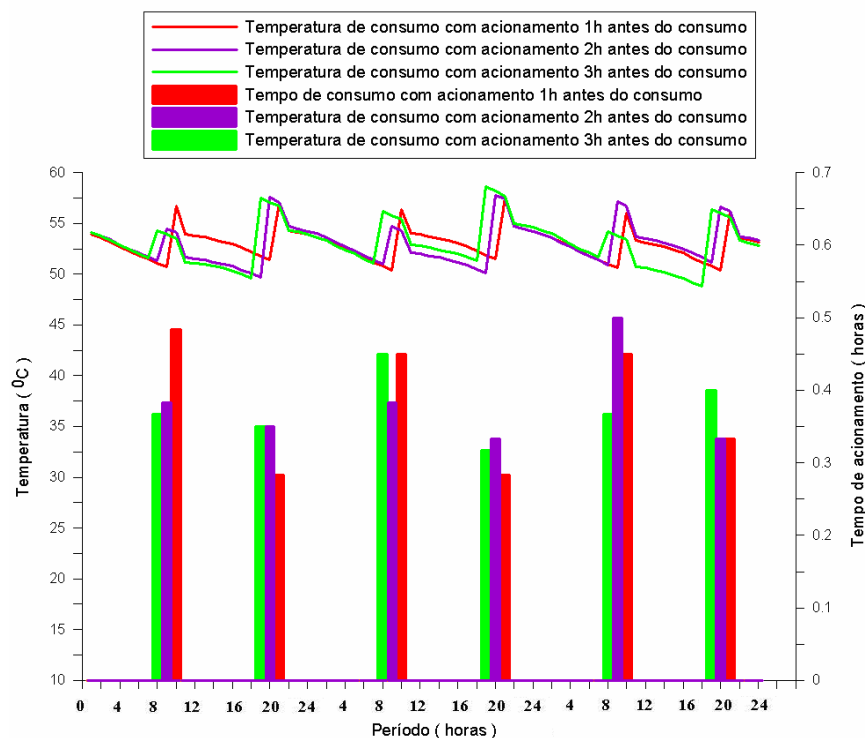


Figura. 5.11. Perfil de temperatura com temporizador pela variável de consumo para inverno.

Percebe-se que nos dias de inverno simulados independentemente da variável consumo ser 1h, 2h ou 3h, as temperaturas de consumo se comportaram de formas não muito diferenciadas.

Nota-se também que o tempo dos acionamentos no inverno, conforme Fig. 5.12, é bem maior que no verão, resultando em um maior consumo de energia auxiliar. Entretanto, o sistema de acionamento de 1h caracteriza o que resulta em uma temperatura mais elevada na continuidade do processo, garantindo o conforto da temperatura desejada.

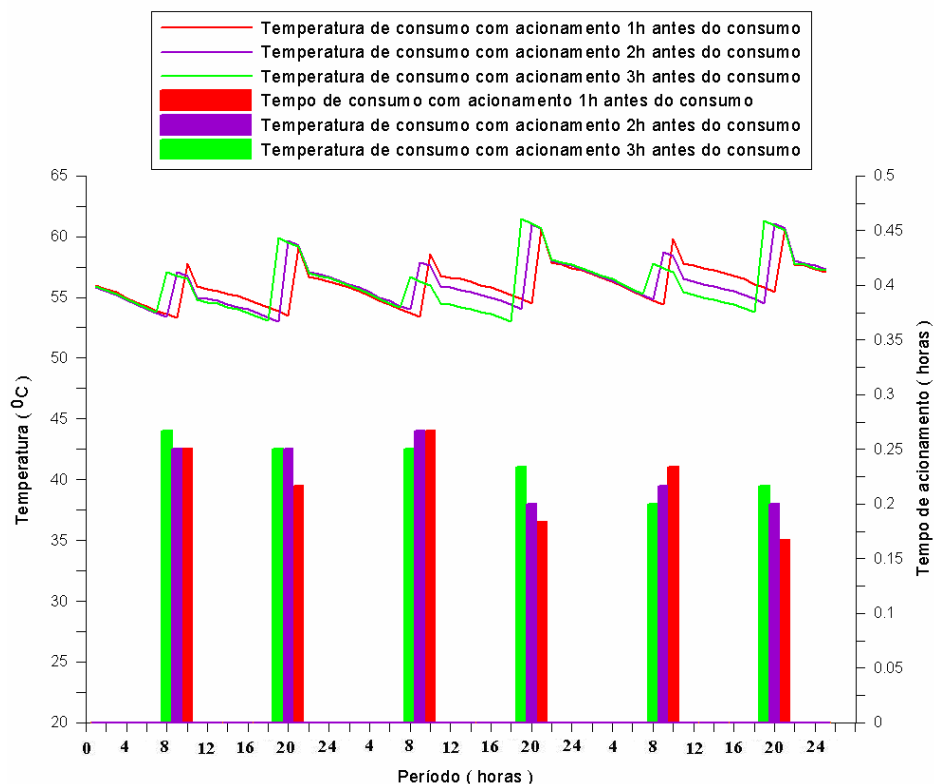


Figura. 5.12. Perfil de temperaturas para temporizador variável com consumo no verão.

O tempo de acionamento das variáveis do temporizador é o que determinaria sua eficiência de utilização e financeira. Novamente, na simulação acima, não há uma significativa diferença na duração dos acionamentos nas três simulações acima. Entretanto, pode-se inferir, então, que como fator que atende melhor a uma demanda de temperatura acima dos 50°C, seria a programação do temporizador acionando o sistema de termostato para controle de temperatura uma hora antes do consumo.

A utilização deste artifício então demonstra ser uma solução interessante economicamente, pois evita desperdícios do aquecimento e manutenção da temperatura desnecessários ao longo do dia.

Uma visão anual da simulação, conforme mostrada na Fig. 5.13, clarifica as magnitudes de consumo de gás e energia gasta no uso destas configurações.

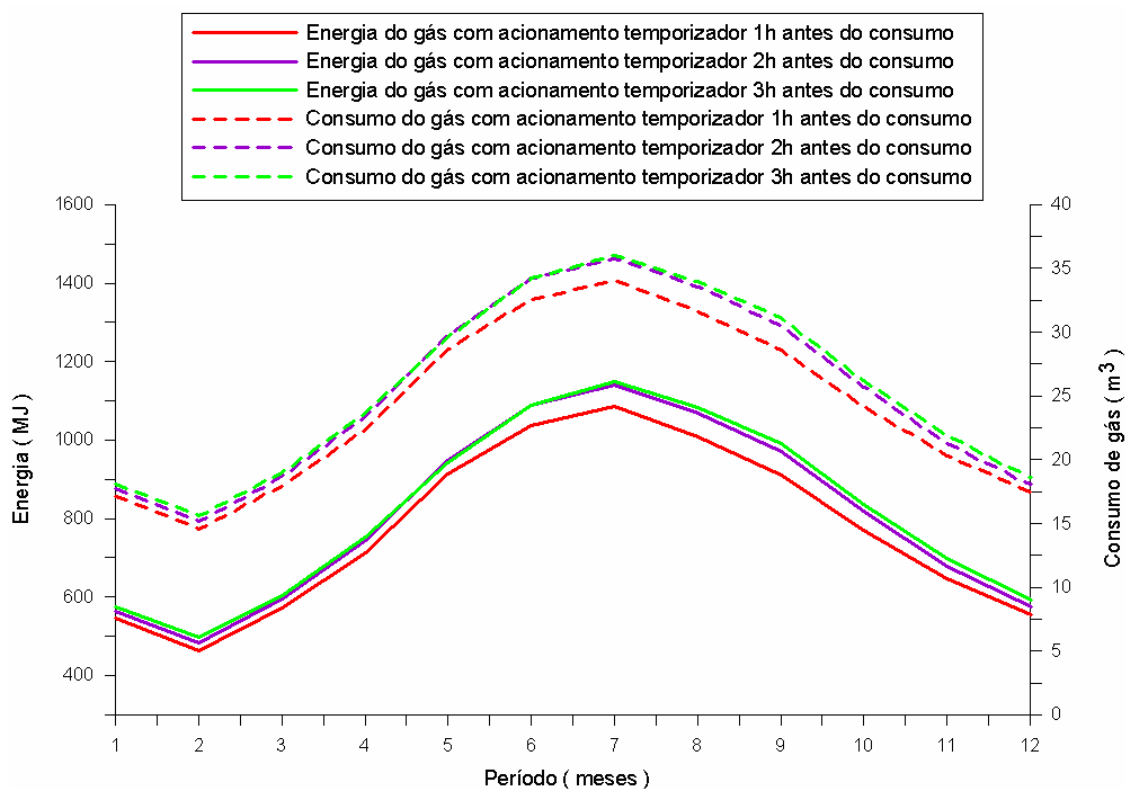


Figura. 5.13. Perfil anual da utilização de temporizadores em sistema a gás.

Através de valores de consumo de gás e energia do gás auxiliar, confirma-se inferência de que a configuração de 1h seria uma opção atrativa em relação ao consumo de gás ou tempo de acionamento, principalmente no inverno, quando o sistema é mais requerido devido às baixas temperaturas.

Pode-se avaliar no gráfico das Figs. 5.14 e Fig. 5.15 o comportamento do temporizador para um sistema solar com energia auxiliar elétrica externa em paralelo ao tanque para os dias de verão e inverno, respectivamente.

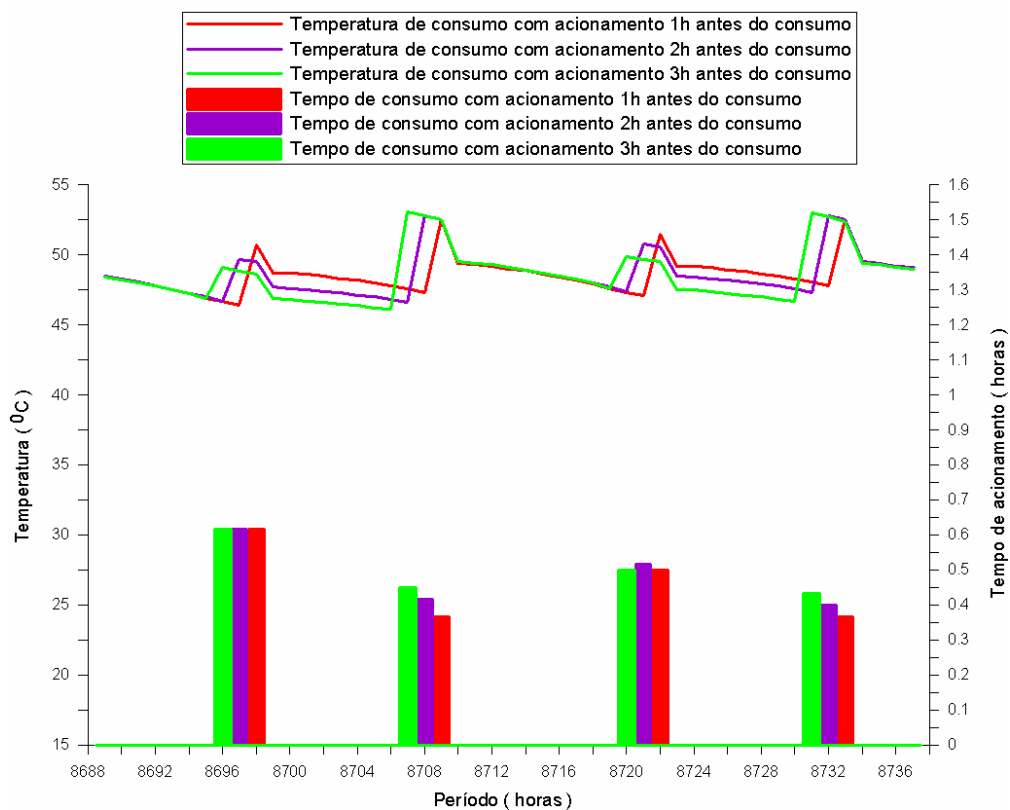


Figura. 5.14. Perfil de temperaturas para temporizador com variável de consumo para 2 dias de verão.

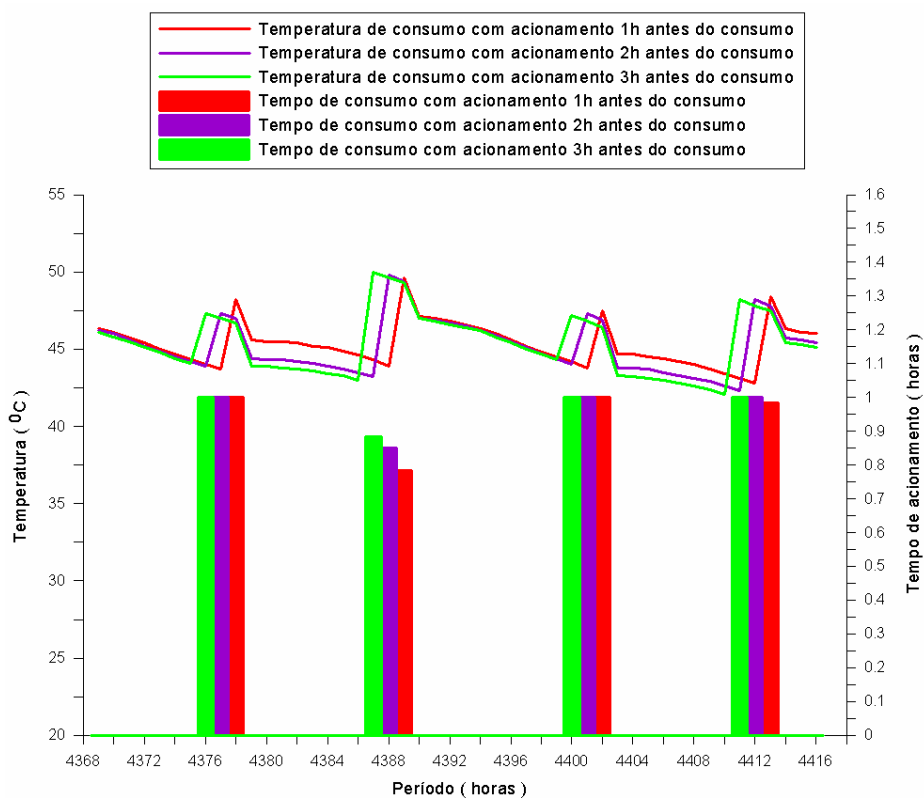


Figura. 5.15. Sistema com temporizador com variável de consumo para 2 dias de inverno.

Observa-se claramente nos gráficos das Figs. 5.14 e 5.15 que o tempo de acionamento no inverno é superior ao do verão, havendo um grau mais acentuado entre as diferenças de acionamento em cada opção simulada. Por exemplo, a configuração de acionamento 1h antes do consumo no verão apresenta menor tempo de acionamento comparada aos outros tipos e mantém uma temperatura levemente superior após o consumo de água quente. No inverno, por sua vez, há um maior decréscimo de temperatura após a elevação da mesma para a de consumo, atribuído pelas perdas térmicas para o meio externo nesta época do ano.

Na Fig. 5.16 é apresentado o gráfico anual de energia elétrica gasta para os três tipos de configuração de acionamento do temporizador para a configuração de aquecimento solar com energia auxiliar elétrica externa em paralelo ao tanque. Como esperado, esta configuração mostra pequenas diferenças no valor consumido de energia. Porém, utilizando o artifício de acionamento 1h antes do consumo, torna-se a mais interessante para uma economia de energia elétrica.

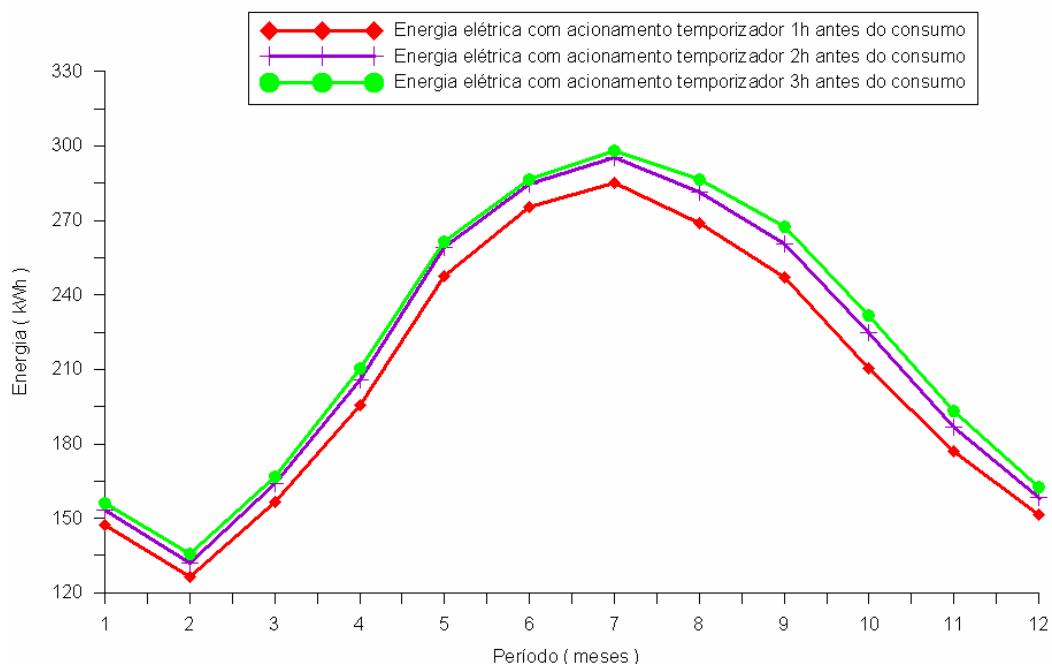


Figura. 5.16. Perfil anual de energia com temporizadores em sistema auxiliar elétrico em paralelo.

Para completar as análises com as configurações utilizando-se um temporizador com variável de consumo, resta prever um comportamento para um sistema solar de aquecimento com apoio auxiliar elétrico utilizando resistência elétrica internamente ao reservatório vertical.

Os resultados encontrados são mostrados na Figs. 5.17 e 5.18 para os dias de verão e de inverno, respectivamente.

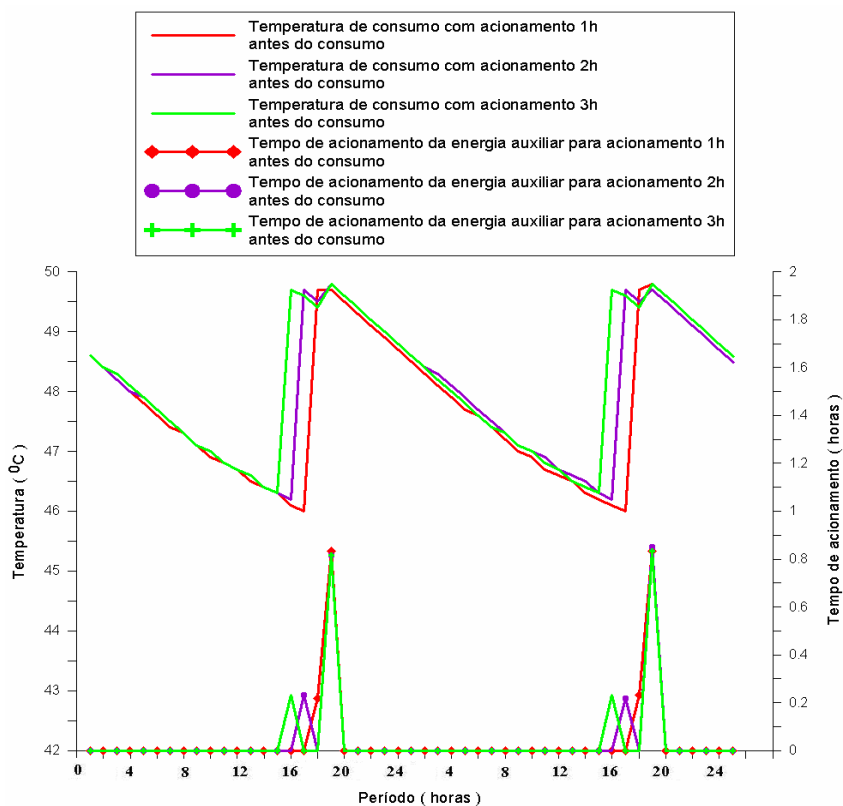


Figura. 5.17. Perfil de temperaturas para temporizador variável de consumo para 2 dias de verão.

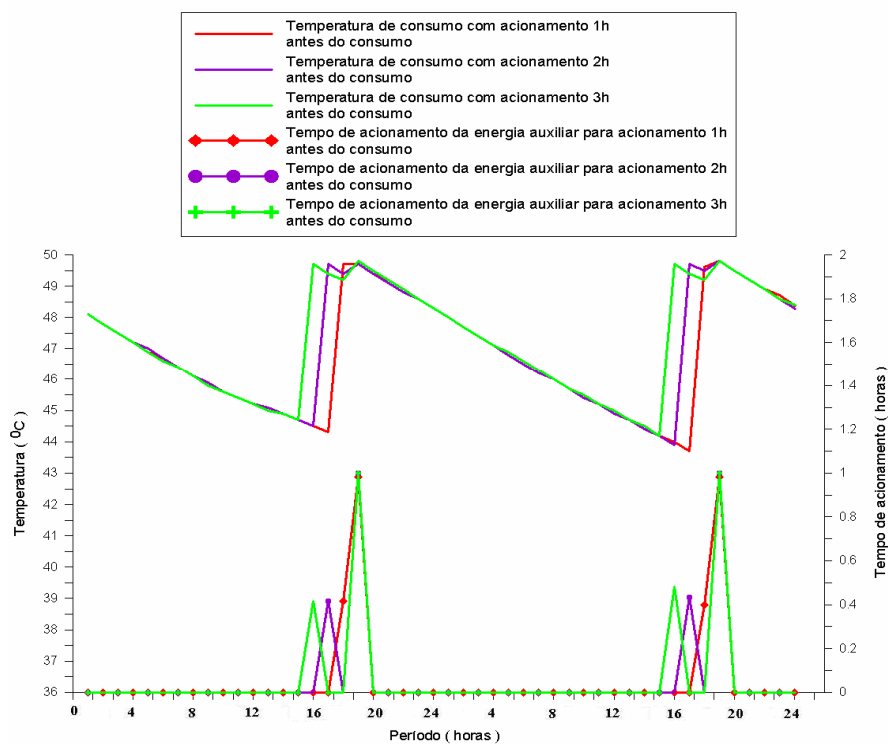


Figura. 5.18. Perfil de temperaturas para temporizador variável de consumo para 2 dias de inverno.

Na Fig. 5.19 tem-se o gráfico anual de energia elétrica gasta para quatro tipos de configuração de acionamento do temporizador para a configuração de aquecimento solar com energia auxiliar com resistência elétrica interna ao tanque.

O perfil sem a utilização do temporizador indica um consumo de energia bem maior do que com o uso do artifício. Sendo que apresentou-se como uma forma mais econômica se o set point estivesse configurado para acionar apenas 1h antes do consumo.

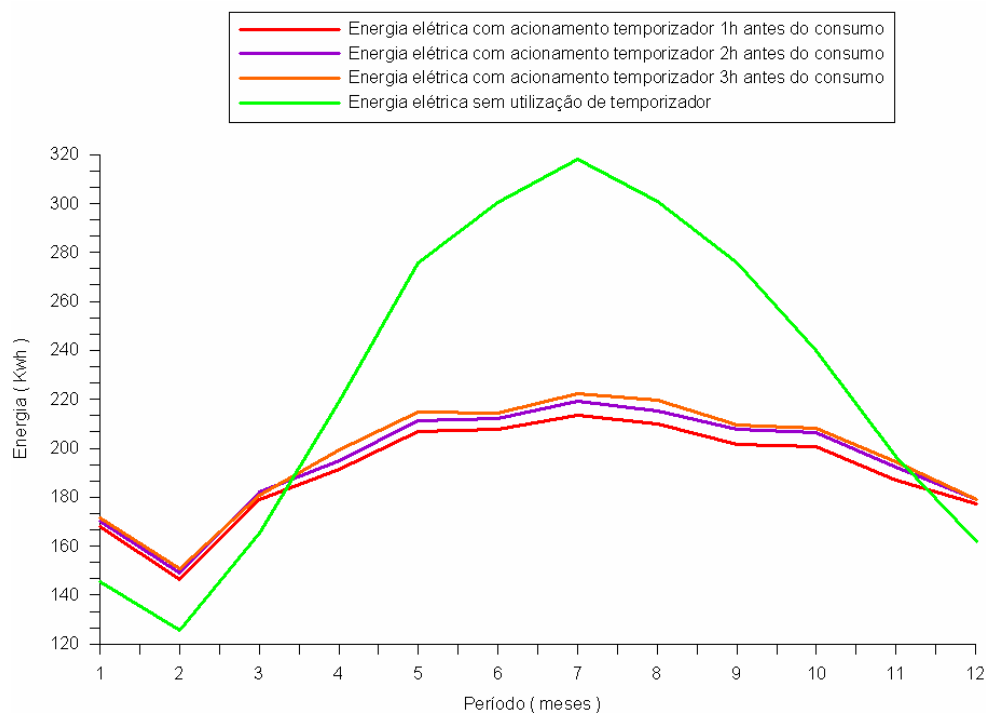


Figura. 5.19. Perfil anual de energia na utilização de temporizadores em sistema auxiliar elétrico com resistência interna no tanque.

5.3.2 Análise de simulações com temporizadores de acordo com a radiação solar

Nesta hipótese para maximizar o sistema solar de aquecimento de água, a lógica baseia-se no conceito de não ativar o acionamento auxiliar durante o dia, principalmente nas horas de maior radiação solar. Isto é indicado em um algoritmo onde o usuário declara que, quando a radiação solar estiver elevada, não se faz necessário o uso de uma energia auxiliar, mesmo se a temperatura da água naquele instante esteja abaixo do padrão requisitado.

As simulações devem ser úteis para avaliar se esta ação faz com que o sistema desperdice menos energia auxiliar e se aproveita melhor a energia solar irradiante durante o dia, evitando-se acionamentos desnecessários.

Foi realizada também uma simulação com os sistemas com resistência elétrica em paralelo e internamente ao tanque e o sistema de aquecimento com gás auxiliar durante um ano. E o sistema que se destacou por apresentar uma significativa diferença na utilização deste tipo de configuração de temporizador foi o sistema auxiliar elétrico com resistência interna ao tanque, conforme podemos visualizar no gráfico da Fig. 5.20.

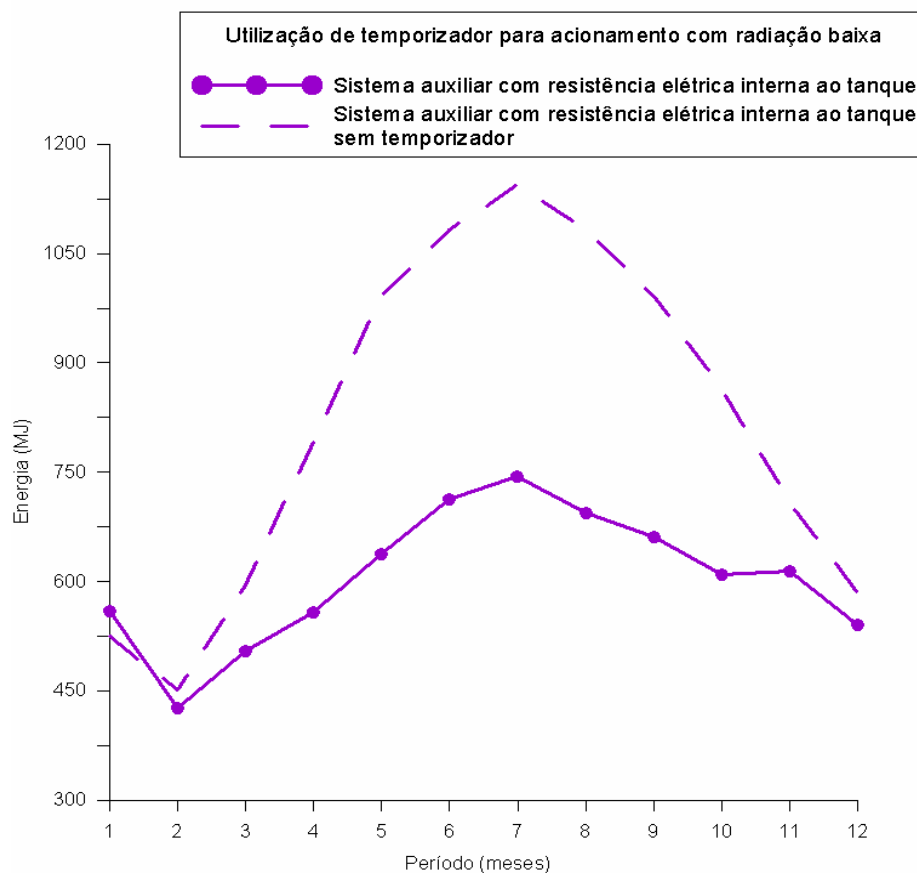


Figura. 5.20. Energia gasta com temporizador para baixa radiação.

Pela Fig. 5.21, observam-se os pontos onde houve o acionamento do temporizador, geralmente pela parte da manhã e antes do consumo de água quente. Ou seja, quando a radiação ainda não está elevada, o acionamento é ativado, já elevando a temperatura do reservatório para o consumo posterior. Ao entardecer, não ocorre a necessidade de um acionamento pela conservação da temperatura no tanque de armazenamento. Porém, quando há a necessidade de

água quente às 22:00h, observa-se que a temperatura da água está decrescendo até atingir o valor programado para o acionamento da energia auxiliar.

Com a utilização das ferramentas gráficas do TermoSim pode-se analisar estas pequenas variações e particularidades dos variados tipos de configurações possíveis, sendo o programa útil na escolha do tipo de equipamento para investir ao se tratar de temporizadores.

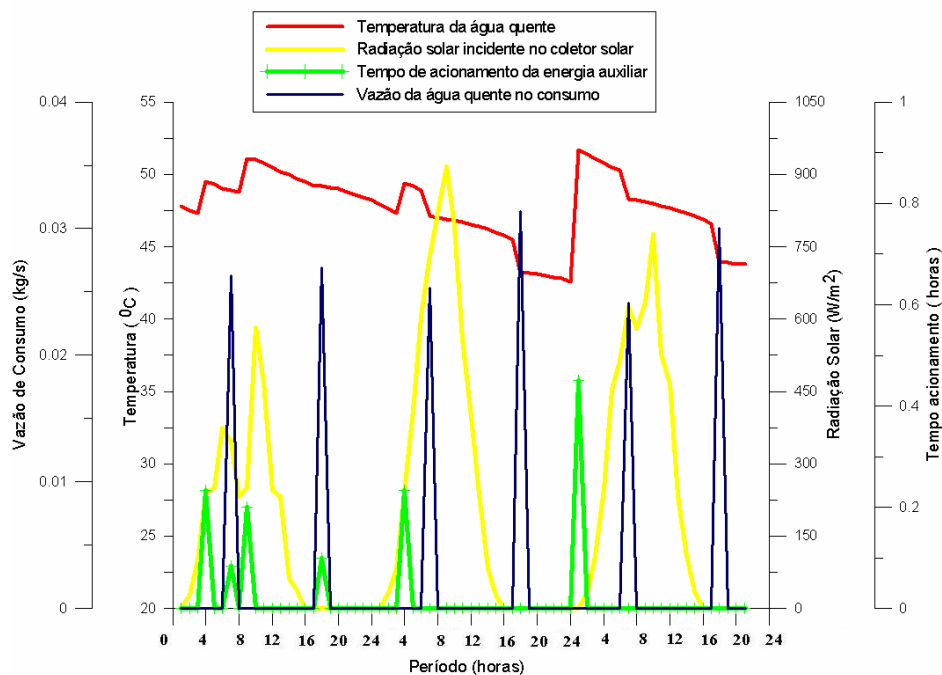


Figura. 5.21. Comportamento no sistema auxiliar a gás em paralelo externamente ao tanque para cinco dias de verão.

5.3.3 Acionamento do temporizador de acordo com o horário matinal – fator 6-9h

Este tipo de lógica de controle baseia-se no princípio de que entre as 6h e 9h da manhã, quando a incidência solar está com menor intensidade, pode-se ofuscar a eficiência solar com o acionamento de energia auxiliar com ou sem consumo de água quente.

Visando avaliar, então, possíveis ocorrências, fizeram-se simulações para os diferentes tipos de configurações apresentadas, resultando na comprovação de que, em alguns casos, o efeito do temporizador controlando o acionamento da energia auxiliar resulta em economia de energia e melhor eficiência do coletor solar.

Observa-se que na Fig. 5.22, os sistemas auxiliares a gás e elétrico externos de passagem sofrem um significativo decréscimo no consumo de energia, fato explicado pela não necessidade de acionamento do aquecimento auxiliar nos horários programados no temporizador.

Separadamente, no sistema a gás apresentado na Fig. 5.23, destaca-se uma suave melhora no aproveitamento do calor útil no início da manhã para os sistemas com temporizador.

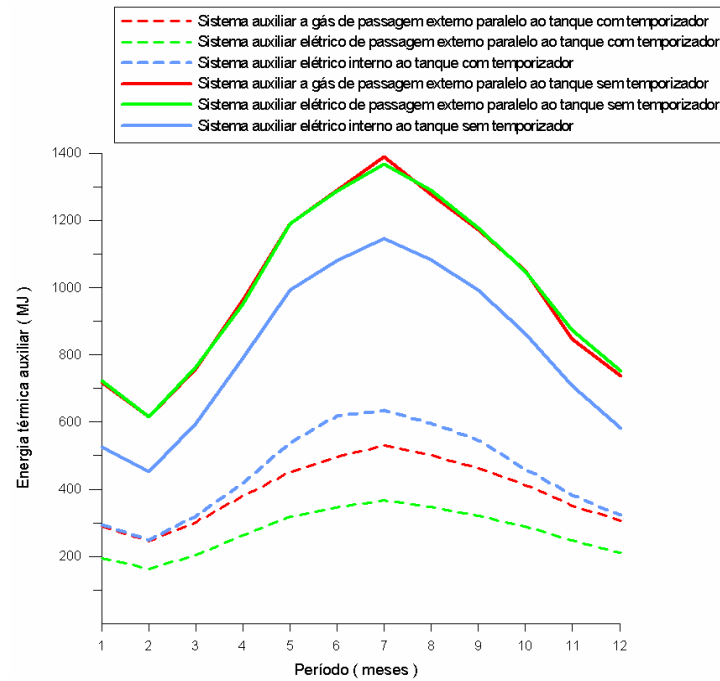


Figura. 5.22. Energia auxiliar para temporizador não liga entre 6-9 horas da manhã.

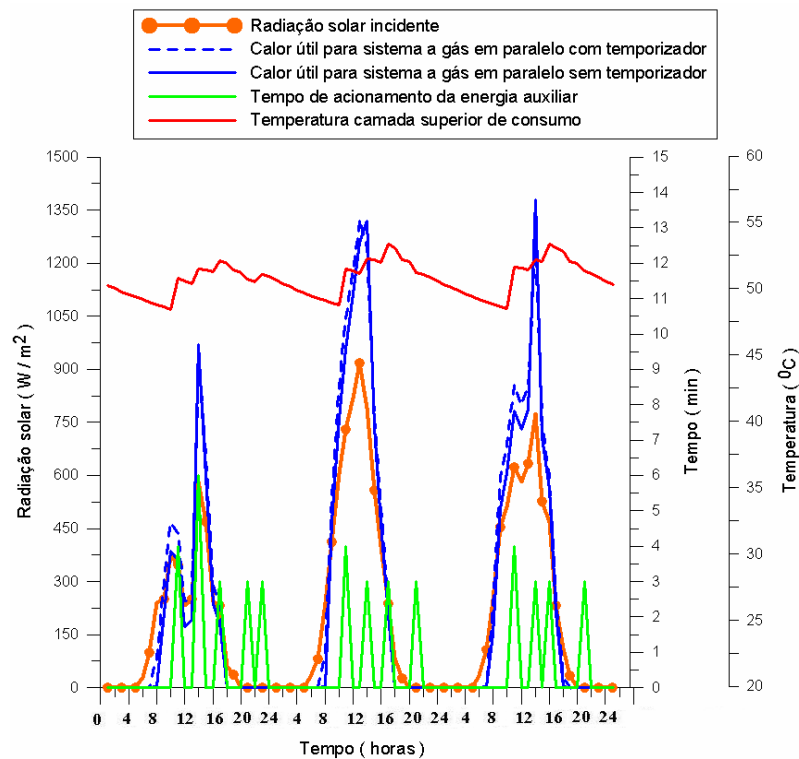


Figura. 5.23. Perfil de consumo vespertino para sistema auxiliar a gás em paralelo externo.


5.4 Análise econômica dos sistemas de aquecimento de água

As simulações de aplicação da seção econômica do software TermoSim foram realizadas utilizando-se o modelo matemático apresentado no capítulo 4.

Os consumidores de energia elétrica pagam, por meio da conta recebida da sua empresa distribuidora de energia elétrica, um valor correspondente à quantidade de energia elétrica consumida no mês anterior, estabelecida em kWh (quilowatt-hora) e multiplicada por um valor unitário, denominado tarifa, medida em R\$/kWh (reais por quilowatt-hora), que corresponde ao preço de um quilowatt consumido em uma hora. O mesmo vale para o fornecimento e consumo de gás natural.

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL é responsável por estabelecer tarifas que assegurem ao consumidor o pagamento de uma tarifa justa, como também garantir o equilíbrio econômico-financeiro da concessionária de distribuição para que ela possa oferecer um serviço com a qualidade, confiabilidade e continuidade necessárias, segundo informações da própria ANEEL. Valores das tarifas médias (R\$/MWh) por classes de consumo e por regiões geográficas do Brasil estão listadas na Tab. 7.

Tabela 7. Tarifas médias por classe de consumo / região (R\$/MWh). Fonte: ANEEL (Outubro de 2008).

 Tarifas Médias por Classe de Consumo / Região (R\$/MWh)

Classe de Consumo/Região	Centro Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul	Brasil
Residencial	279,51	279,76	299,66	283,92	270,46	281,67
Industrial	204,39	207,73	237,81	226,80	212,98	219,80
Comercial, Serviços e Outras	273,44	294,95	301,34	275,26	254,45	276,11
Rural	194,57	202,13	220,92	187,83	152,08	179,89
Poder Público	285,60	321,21	315,44	289,95	277,07	297,44
Iluminação Pública	153,98	173,98	168,55	156,68	142,06	158,21
Serviço Público	177,64	191,94	212,86	205,11	187,95	197,81
Consumo Próprio	292,97	309,49	307,66	288,16	257,82	292,42
Rural Aquicultor	215,64	121,89	119,05	172,98		121,91
Rural Irrigante	120,22	124,07	173,52	161,49	120,72	137,34
Totais por Região	243,08	249,14	276,23	255,31	228,99	249,41

Entretanto, os valores do kWh para o consumidor variam bastante para cada cidade de um mesmo estado, dependendo da concessionária. Neste sentido buscou-se adotar o valor mais

recente para a cidade de Caxias do Sul, estando próxima da média de consumo residencial da região sul. Os parâmetros utilizados para as simulações estão apresentados na Tab. 8.

Tabela 8. Parâmetros financeiros utilizados.

<i>Parâmetros</i>	<i>Valores</i>
Custo da energia (Gás – R\$/m ³)	2,85
Custo do coletor solar (R\$/m ²)	380,00
Custo da energia (Eletricidade – R\$/kWh)	0,38982*
Custo de acessórios (Tubulações, conexões – R\$)	400,00
Custo do reservatório (R\$/m ³)	3000,00
Custo de manutenção anual (% do valor investido)	1
Taxa de rentabilidade da poupança ao mês (%)	1
Valor residual do sistema (R\$)	0
Tempo de vida estimado (anos)	20

* Valor médio do kWh sem ICMS.

A performance econômica dos sistemas com energia solar de apoio elétrico e a gás na simulação anual na cidade de Caxias do Sul, para variações de configurações com 2 a 8 coletores solares instalados, é apresentada nas Figs. 5.24 e 5.25, respectivamente. Nesse estudo pode-se observar que a configuração com elemento de apoio elétrico em série com o consumo é o que possui maior valor de economia mensal e taxa de retorno anual, ao passo que a configuração elétrica de passagem externa ao tanque apresentou-se como a opção menos viável economicamente.

Para um sistema solar de apoio a gás, tem-se que a configuração com sistema de apoio em série com o consumo comparado ao sistema com gás em paralelo de passagem externo ao tanque apresenta maior economia mensal, atingindo taxa de retorno em torno de 50% ao ano.

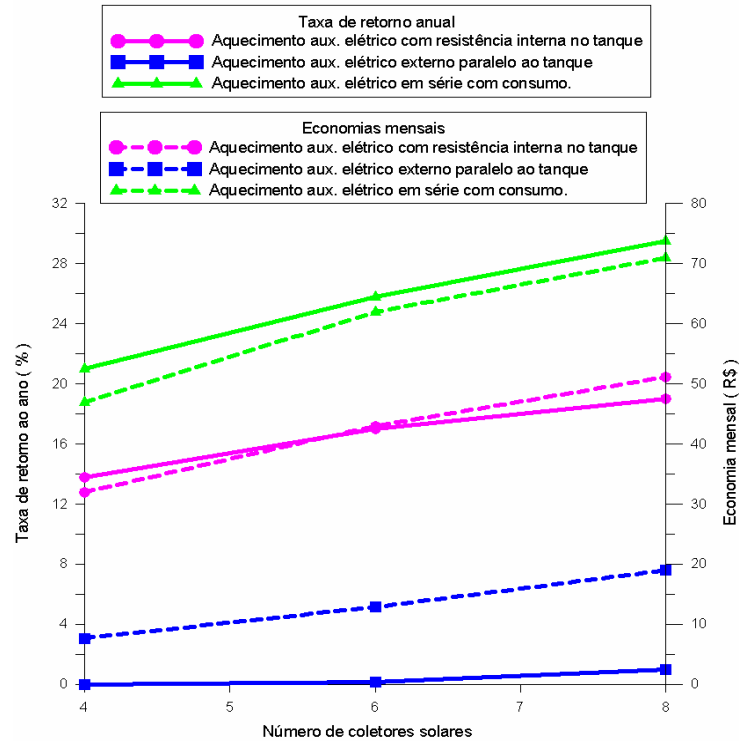


Figura. 5.24. Taxa de retorno e economia mensal para sistema com energia elétrica de apoio.

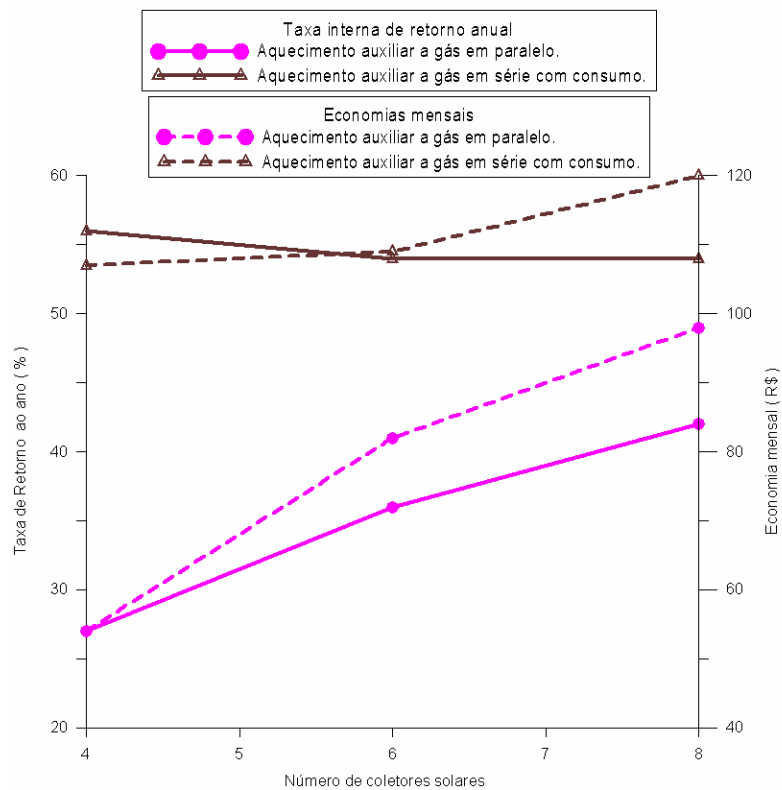


Figura. 5.25. Taxa de retorno anual e economia mensal para sistema com energia de apoio a gás.

Nas Figs. 5.26 e 5.27 são apresentadas as simulações dos sistemas acima descritos para obter como resultado o *payback* mensal, utilizando-se o modelo com *payback* simples .

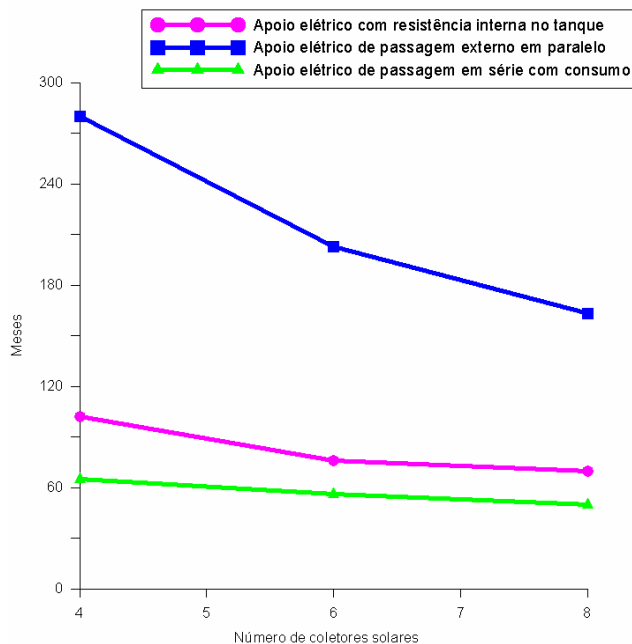


Figura. 5.26. *Payback* para sistema solar com energia elétrica de apoio.

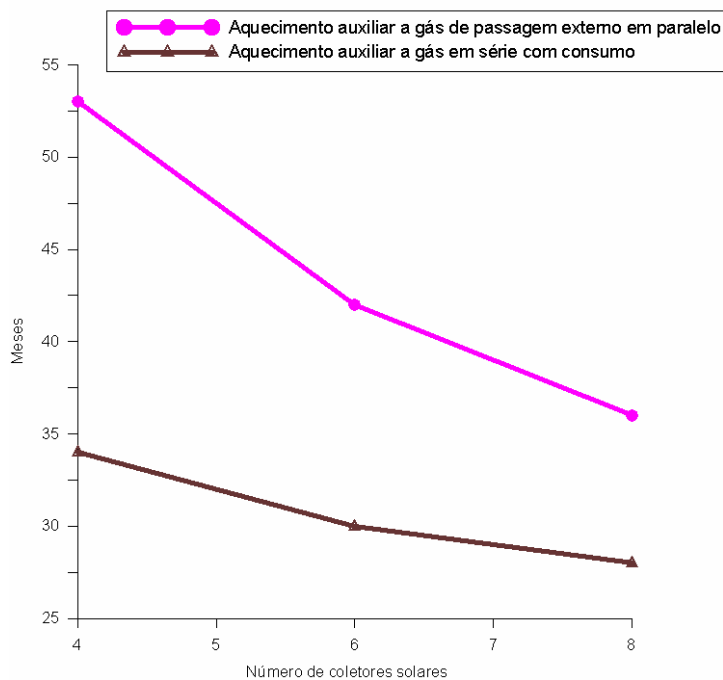


Figura. 5.27. *Payback* para sistema solar com energia de apoio a gás.

As figuras demonstram como era esperado, que a configuração com sistema de aquecimento solar com apoio a gás é a que apresenta melhor *payback*: em torno de 3 a 4 anos.

No tipo elétrico da Fig. 5.26, a configuração de arranjo com apoio elétrico em série com o consumo apresentou menor tempo de retorno do investimento, seguida das opções com resistência elétrica interna ao tanque e externa de passagem em paralelo. É importante salientar que, para diferentes tipos de perfis, esse resultado pode apresentar diferenças significativas, lembrando os parâmetros iniciais do estudo com um perfil de consumo de água matinal diário de 300 litros para uma temperatura de consumo de 40°C, na cidade de Caxias do Sul.

Para o sistema auxiliar a gás, a configuração com um sistema de controle eletrônico de temperatura com gás de passagem em série no consumo, Fig. 5.27, apresentou melhor resultado, quando comparada ao sistema de passagem tradicional externo ao reservatório. É interessante ressaltar que o aumento no número de coletores solares reflete em um aumento de investimento inicial, podendo haver em alguns casos a necessidade de uma análise de fluxo de caixa para que se determine o momento em que a taxa de retorno se torne atrativa para o projeto escolhido.

5.5 Influência do número de coletores no ganho de energia

Pode-se efetuar comparações com os tipos de sistemas de aquecimento de água por energia solar com simulações para diferentes quantidades de coletores instalados.

Com os modelos do programa TermoSim, obteve-se os resultados apresentados nos gráficos a seguir, conforme Figs. 5.28 a 5.30. Por definição, tem-se que: a energia auxiliar utilizada representa a energia térmica total gasta durante o acionamento do sistema de apoio; a energia térmica do sol representa a energia útil, aquela que foi utilizada nos coletores solares para aquecer a água pela radiação incidente do sol; e a energia térmica utilizada é aquela que foi a necessária para o aquecimento da água para o consumo do perfil estudado.

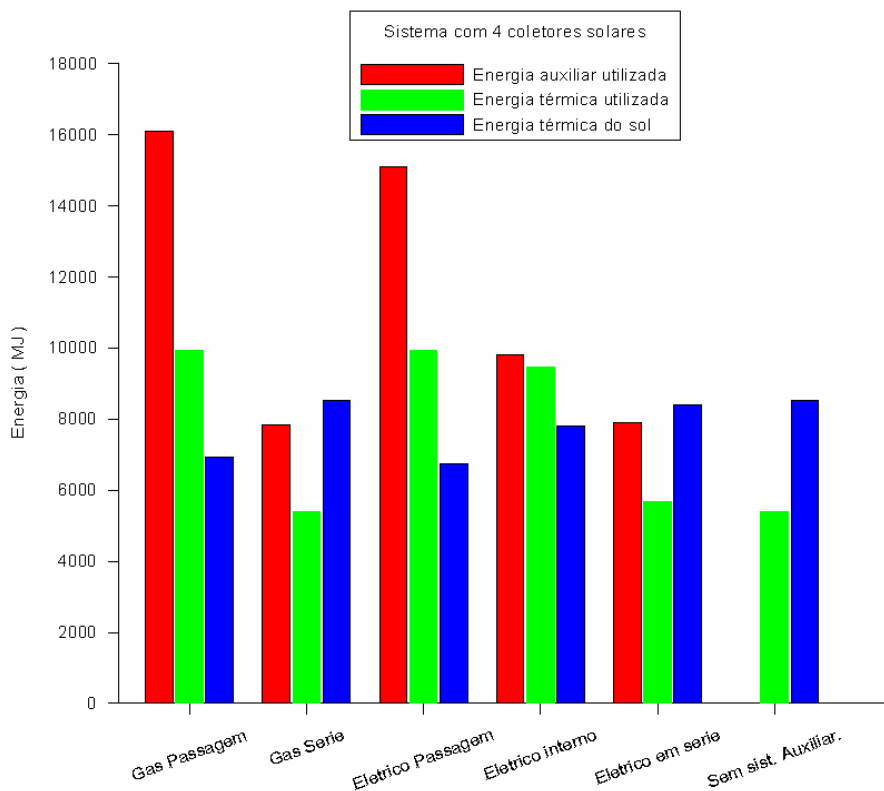


Figura. 5.28. Comparação energética para os sistemas simulados com 4 coletores solares.

Observa-se claramente o menor consumo de energia auxiliar para o sistema de gás em série e um maior consumo para sistema com gás de passagem, conforme já mencionado, devido à manutenção da temperatura ao longo do dia, mesmo sem a necessidade real do consumo da água quente.

Com o aumento do número de coletores, tem-se uma redução bastante significativa do consumo de energia auxiliar, chegando em torno de 50% para a configuração com gás de passagem. Destaca-se, portanto, um menor desperdício de energia, visto pela proximidade da magnitude dos valores da energia térmica utilizada e da energia do sol, conforme Fig. 5.29. O mesmo ocorre aumentando-se o número de coletores para 8, como na Fig. 5.30, onde confirma-se um maior aumento da energia térmica do sol, melhor eficiência e menor desperdício de energia. Contudo, sempre deve-se observar os custos envolvidos e a necessidade de cada perfil de consumo para não haver ineficiência na instalação de um sistema com diversos coletores solares.

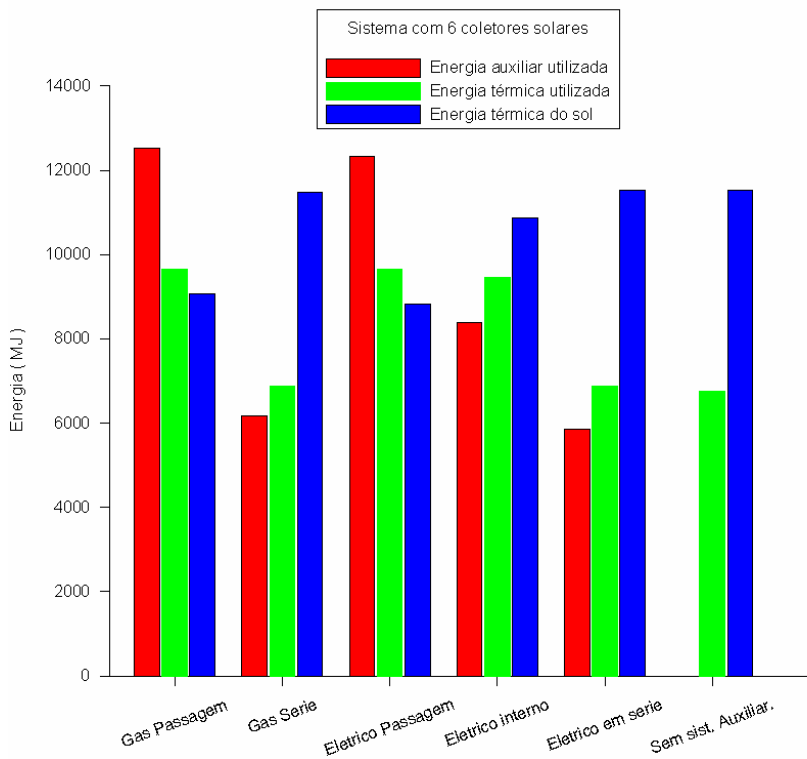


Figura. 5.29. Comparação energética entre os sistemas simulados com 6 coletores solares.

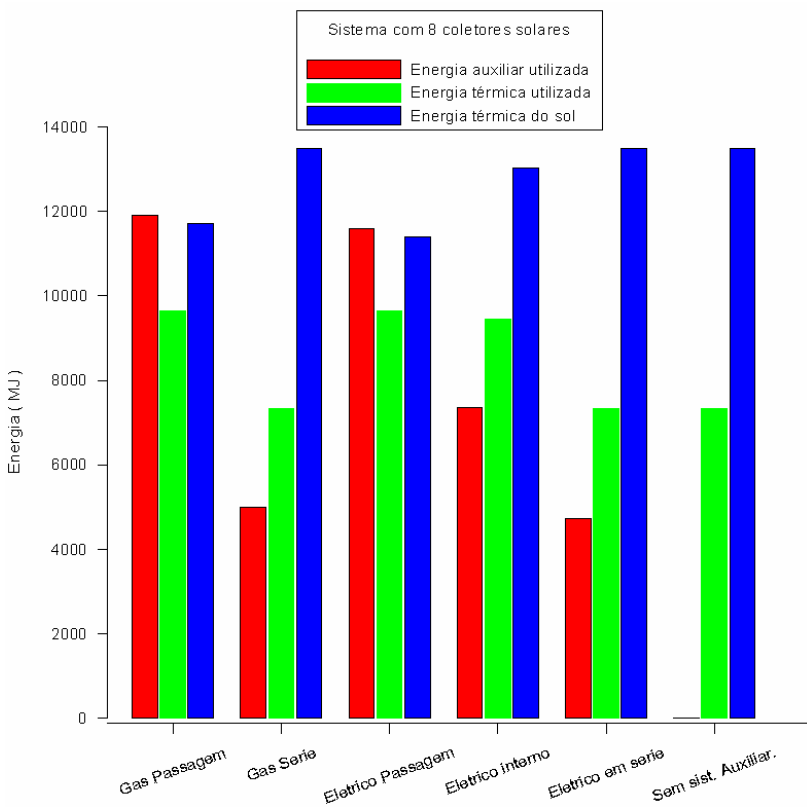


Figura. 5.30. Comparação energética entre os sistemas simulados com 8 coletores solares.

5.6 Análise das perdas térmicas devido ao fluxo reverso em coletores solares planos

Utilizando o modelo para circulação reversa apresentado no capítulo 4, realizaram-se algumas simulações com o objetivo de verificar o comportamento térmico e validar os resultados da análise de perdas térmicas à noite para os sistemas térmicos do programa TermoSim.

Os resultados de uma simulação computacional realizada por Morrison (1983), utilizando o software TRNSYS, foram usados como objeto de comparação. Não foi possível encontrar outros dados computacionais e/ou experimentais que fossem confiáveis para comparação, e mesmo os resultados apresentados por Morrison não são passíveis de comparação numérica, pois não há suficiente informação para a mesma entrada de dados do sistema. Entretanto, no mesmo estudo, um comportamento representativo de magnitudes compatíveis e mesmas tendências foi aceito como parâmetros para este trabalho.

Deste modo, procede-se, a simulação com dados climáticos de Porto Alegre para dia típico de Janeiro, conforme Tab. 9, com as seguintes características do sistema:

Tabela 9. Especificações técnicas do sistema solar simulado.

Comprimento tubulação 2-3	Comprimento tubulação 4-1	Ø tub. 2-3	Ø tub. 4-1	Volume tanque
0,5m-2,4m	2,7m	22mm	22mm	300 litros
Altura tanque	Temperatura do tanque	Temperatura ambiente	Temperatura do céu	Número de tubos
1,1m	80°C	20°C	0°C	10 tubos

O arranjo se configura com cinco coletores em paralelo, com uma área total de 3 m², cuja eficiência é dada pela Eq. 25.

$$\eta = 0,76 - 7,72 \left(\frac{T_e - T_a}{G} \right) \quad (4.23)$$

Além disso, o reservatório térmico é de aço inoxidável, revestido com lã de vidro, instalado na posição vertical, com temperatura controlada por um termostato no fundo do tanque,

que mantém a resistência elétrica acionada a fim de manter a temperatura do tanque constante, sempre em torno dos 80°C.

Na Fig. 5.31 encontra-se o esquema geométrico da instalação e os resultados são apresentados nas Figs. 5.32 e 5.33.

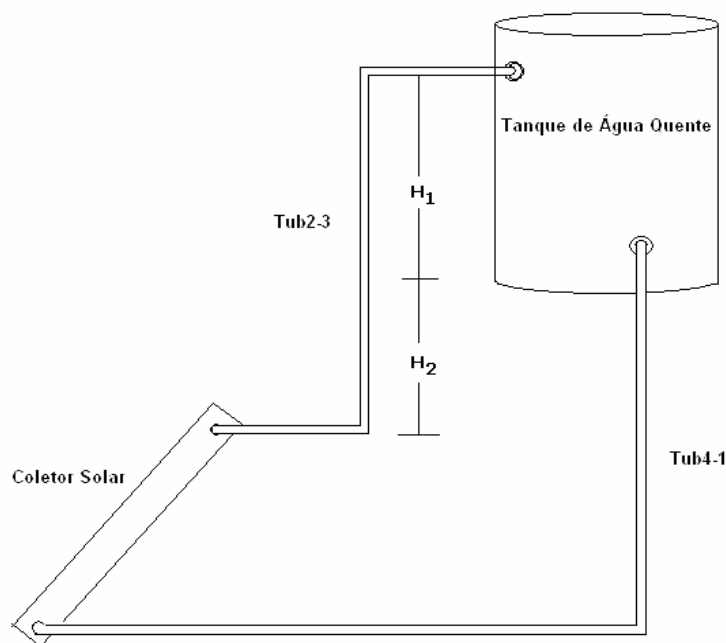


Figura. 5.31. Circuito do sistema de termossifão simulado.

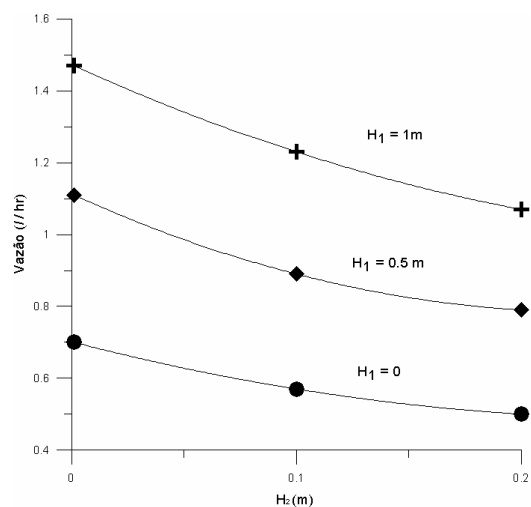


Fig. 5.32. Vazão da circulação reversa na condição de temperatura do tanque 80°C.

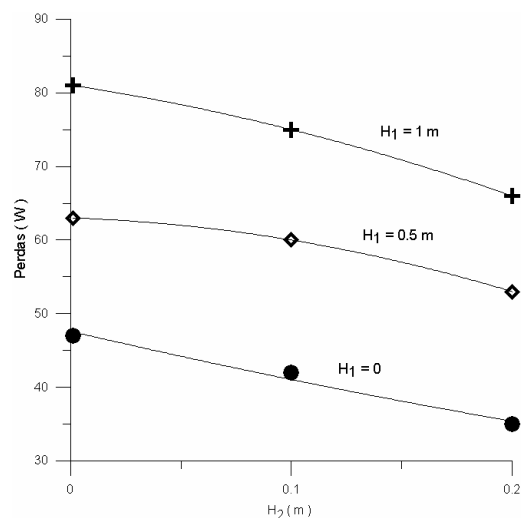


Fig. 5.33. Perdas pela circulação reversa na condição de temperatura do tanque a 80°C.

Quando o topo do coletor está no mesmo nível que o fundo do tanque, o que não seria a configuração recomendada pelos manuais de instalação, observa-se que a vazão reversa atinge seus maiores valores, com magnitude superior a 1,5 l/h. Aumentando a altura da posição do tanque em relação ao coletor, observa-se uma redução na vazão conforme o esperado. O mesmo fato é esperado quando a altura da linha de retorno da água quente do coletor está mais próxima ao fundo do tanque.

É importante observar na Fig. 5.33 as perdas de energia que, na medida em que a cota do fundo do tanque ficar mais próxima do topo do coletor, são maiores e mais significantes. Foi também comprovado que as perdas devido à circulação reversa podem ser negligenciadas se o sistema estiver bem isolado termicamente e se a altura do fundo do tanque estiver superior ao nível do coletor.

Morrison (1983) apresenta em sua simulação resultados semelhantes. Conclui que a vazão é mínima quando a altura H_1 e o fundo do tanque estão nivelados com o topo do coletor, $H_2=0$, verificando uma vazão na magnitude de 1,4 l/h.

Em outra situação, simulou-se com as mesmas configurações dimensionais, porém sem apoio auxiliar de energia, à temperatura ambiente variável de acordo com arquivo climático de Porto Alegre. Apresenta-se, na Fig. 5.34 a estratificação das temperaturas no reservatório.

Nota-se que a temperatura no tanque possui uma perda em torno de 3,5%, quando a elevação do tanque está no mesmo nível do topo do coletor. Observando-se na Fig. 5.35, verificou-se uma vazão reversa levemente maior na mesma situação com $H_2 = 0$.

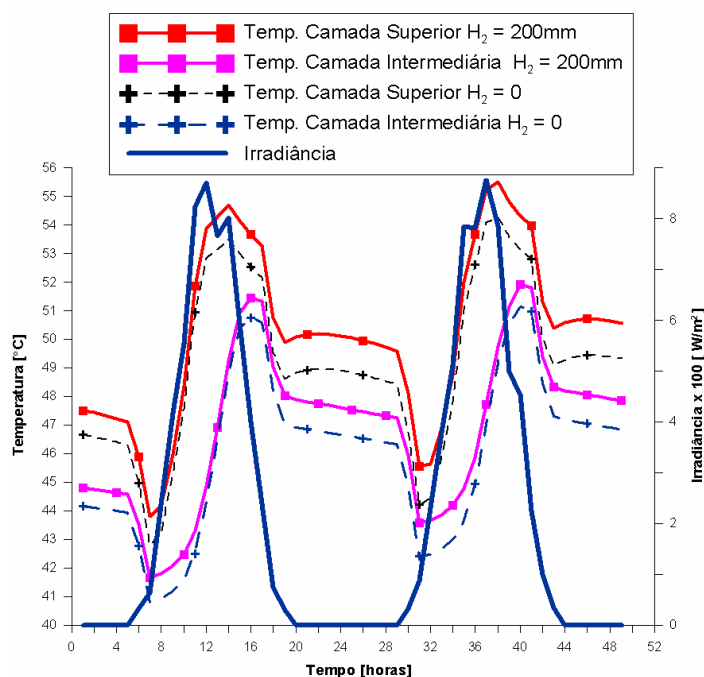


Figura 5.34. Distribuição de temperaturas no reservatório nas duas configurações simuladas

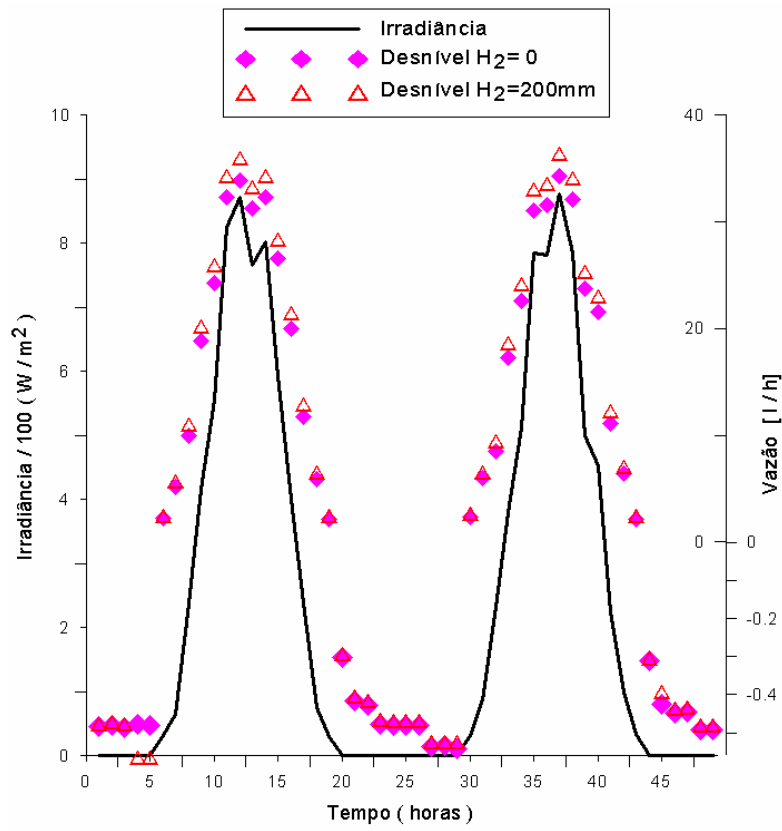


Figura 5.35. Vazão do sistema ao longo do dia.

Quando o sistema é simulado com um perfil de consumo de 200 litros por dia, pelo horário da manhã e à noite, conforme Fig. 5.36, tem-se a distribuição de temperatura no reservatório e é clara a diminuição dos gradientes de temperatura, principalmente nos horários de consumo. Como a temperatura nas camadas inferiores do tanque estão pouco acima da temperatura ambiente, as perdas térmicas devido à circulação reversa diminuem, com valores em torno de 16 W.

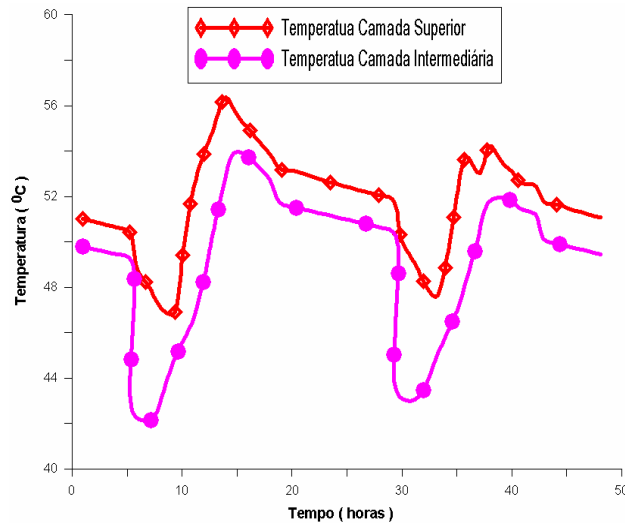


Figura. 5.36. Distribuição de temperaturas no reservatório com perfil de consumo diário. $H_1=1\text{m}$ e $H_2=200\text{ mm}$.

Para outra configuração simulada considerou-se o topo do coletor na mesma altura da tubulação, *Tub2-3*, ligado ao reservatório, cota A_2 da Fig. 5.31. Deste modo, buscou-se uma situação onde o fundo do tanque coincidissem com a base do coletor, denominada neste trabalho de sistema *bottom-bottom*, configuração similar aos sistemas chineses *built-in*, nos quais os tubos do coletor são conectados diretamente ao tanque.

Observou-se, conforme Fig. 5.37, que este sistema também caracteriza-se por uma perda significativa de eficiência durante seu funcionamento diurno, com uma eficiência média de 26.5% contra 37% para o mesmo período simulado, em um sistema com $A_2 = 200\text{ mm}$ e características conforme Tab. 1, aqui já apresentadas.

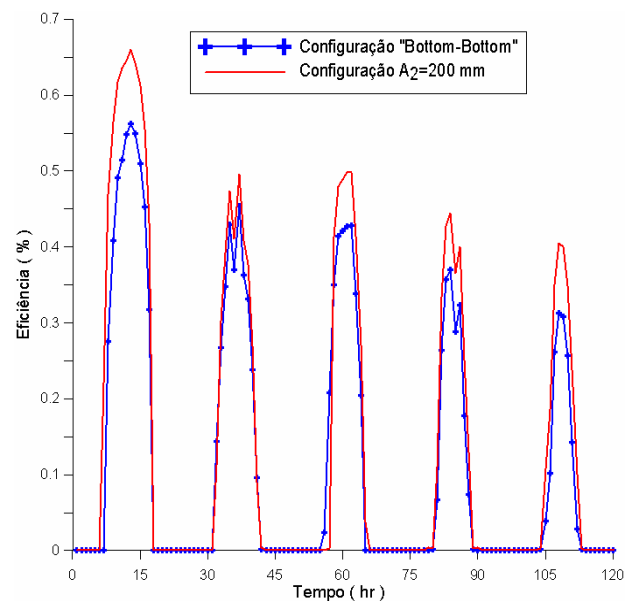


Figura. 5.37. Eficiência dos sistemas para cinco dias de Janeiro.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou estudos do comportamento térmico de instalações de aquecimento de água residencial por energia solar para diferentes configurações de instalações, bem como o melhoramento e a finalização da ferramenta utilizada para estes estudos e análises: o software TermoSim.

O objetivo dos estudos apresentados era realizar comparações entre os seis tipos de sistemas de aquecimento adotando as melhores práticas, segundo últimos trabalhos na área, como critério da definição dos parâmetros construtivos e de qualidade dos materiais empregados, utilizando dados meteorológicos da cidade de Caxias do Sul e Porto Alegre no estado do Rio Grande do Sul.

O primeiro estudo realizado foi a análise energética de cada sistema. Para os parâmetros definidos e mantidos constantes, conforme a Tab. 3 localizada no capítulo 5, concluiu-se que a utilização da energia solar com sistema auxiliar elétrico de passagem externo apresentou o maior consumo de energia térmica e, conseqüentemente, o maior desperdício de consumo desta energia. Este fato é perfeitamente explicado pelo perfil de consumo relativamente baixo, em que o sistema acabava necessitando aquecer a água no reservatório sem a necessidade efetiva de seu consumo. Isto ficou claro quando realizada a simulação com o sistema a gás auxiliar com a configuração em série com o consumo.

Esta configuração apresentou menor consumo anual de energia e melhor aproveitamento do calor útil do sol. Logicamente, este resultado provém do tipo de acionamento da energia auxiliar, que é beneficiada pelo pré-aquecimento da água do tanque de armazenamento, utilizando a energia auxiliar a gás ou elétrica com resistência somente na quantidade necessária pelo controle eletrônico de temperatura.

Segundo os estudos de análise econômica do sistema a gás em série com o consumo, constatou-se que este apresenta menor tempo de *payback* e melhores taxas de retorno quando comparado aos outros sistemas. Este tipo de instalação não apresenta custos tão diferenciados quanto uma instalação com gás de passagem externo. Conseqüentemente, acabaria sendo mais vantajoso adquirir uma instalação deste tipo.

Observou-se que instalações com pré-aquecimento da água no tanque resultam em maior desperdício de energia do sol. Neste sentido, outro estudo dirigido realizado para os sistemas foi com a hipótese de se utilizar temporizadores para determinar o momento do acionamento de um sistema auxiliar, com o objetivo de maximizar a energia do sol absorvida. Estas simulações foram divididas em três parâmetros de controle diferentes: pela hora do consumo de água quente,

pela intensidade de radiação ao longo do dia e pelas horas de menor intensidade do sol, aqui definidas pelas horas do início de cada manhã.

Para o perfil de consumo simulado, a análise energética utilizando o critério da variável de hora do consumo de água quente demonstrou que estabelecer uma configuração onde o acionamento da energia auxiliar para pré-aquecer a água apenas uma hora antes do consumo resulta num menor consumo de gás e energia. Similarmente, o mesmo resultado ocorre para uma configuração com resistência elétrica de passagem externa e é bastante efetivo se aplicado com uma configuração de energia auxiliar elétrica com resistência interna ao tanque.

Para o perfil de consumo simulado no estudo, através da análise energética pelo parâmetro intensidade de radiação ao longo do dia, conclui-se que um sistema com energia auxiliar elétrica com resistência interna ao tanque resulta numa configuração bastante otimizada, com redução significativa da energia gasta com a utilização de temporizador.

A outra análise energética pelo parâmetro do horário matinal, fator 6-9h, mostrou que a configuração de um sistema com energia auxiliar elétrica de passagem externa apresenta menor consumo de energia e maior redução da energia gasta em comparação a um sistema sem temporizador matinal.

Com estes estudos, percebe-se que não é uma tarefa fácil definir qual a melhor configuração de maneira geral. Para isso devem-se definir critérios, pois o resultado deve variar conforme o perfil, a variação da altura do termostato, a diferença de vazão, etc.

Assim, para finalizar este estudo energético e econômico para as simulações realizadas pelo software TermoSim e com os dados neste trabalho apresentados, buscou-se um resultado otimizado pelos critérios de menor desperdício de energia térmica, menor consumo de energia elétrica e menor tempo de *payback*. Definiu-se para este trabalho que o critério mais importante energeticamente seria o menor desperdício da energia térmica, conseqüentemente, maior eficiência da instalação simulada. Para este então, conclui-se que um sistema solar com energia auxiliar com resistência interna ao tanque com temporizador pela variável de consumo seria a melhor configuração, sendo importante ressaltar que o perfil de consumo é considerado constante ao longo do período simulado.

No estudo da análise financeira dos sistemas, observou-se que os sistemas economicamente viáveis e com tempo de *payback* menor, são os sistemas com controle eletrônico de temperatura com energia auxiliar em série com a linha de consumo. Ou seja, o sistema mais eficiente não é necessariamente o sistema economicamente mais atrativo.

Como mencionado anteriormente, conforme se mudam variáveis essenciais de um sistema de instalação solar, os resultados aqui apresentados poderão não ser mais válidos. Dentre

essas variáveis essenciais o número de coletores é o mais importante. Com o estudo da influência do número de coletores na análise energética das simulações, observou-se que a energia térmica do sol acaba por ser pouco aproveitada ou desperdiçada se o perfil de consumo for noturno. Assim, além dos custos serem mais elevados, o sistema acaba ficando mal dimensionado. Entretanto, energeticamente, o aumento do número de coletores reduz significativamente o consumo de energia auxiliar em todas as configurações simuladas, apesar de atualmente implicar num maior tempo de *payback*.

A análise da circulação reversa foi outro tema de estudo deste trabalho. Um modelo matemático para o cálculo da circulação reversa foi apresentado, e foram realizadas simulações com o software TermoSim para dois casos de parâmetros geométricos de uma instalação de coletores solares planos.

Os resultados estão de acordo com análises existentes na literatura científica sobre a ocorrência da circulação reversa e indicam que quanto maior a diferença de altura do topo do coletor com o fundo do tanque, menor as perdas térmicas à noite. As magnitudes das perdas de energia variam dependendo do perfil de consumo, da capacidade do reservatório, da temperatura ambiente e do uso de energia auxiliar. Suas perdas podem ser significativas principalmente quando é analisada a estratificação das temperaturas nas camadas do tanque para dias de inverno e para uma área de absorção maior.

É recomendado em instalações de coletores para aquecimento de água, portanto, colocar o reservatório a uma altura superior do topo do coletor, o que, entretanto, não anula os efeitos da circulação reversa, mas com certeza minimiza suas perdas e resulta ao sistema uma maior eficiência na conservação da energia armazenada.

Com os recursos computacionais atuais, uma análise levando em conta esta parcela de perdas à noite torna o software e os resultados mais precisos, um dos objetivos da implementação deste modelo de determinação do comportamento térmico de sistemas de aquecimento de água por energia solar.

O programa de simulação de sistemas térmicos TermoSim foi finalizado e está disponível no site do laboratório de energia solar da UFRGS através do endereço eletrônico: <http://www.solar.ufrgs.br>. O programa demonstrou ser uma poderosa ferramenta para usuários interessados em estudos e análises de diferentes configurações de instalações solares para aquecimento de água com diferentes sistemas auxiliares de aquecimento.

Este trabalho cumpre os objetivos estabelecidos, permitindo maior compreensão dos sistemas solares de aquecimento de água residencial, assim como de cada componente, resultando numa ferramenta valiosa para análises de sistemas térmicos em regime transiente. O

software agora permite ao usuário, com uma interface amigável, realizar diferentes testes de configuração e avaliação para sua localidade.

Como continuidade do trabalho, sugere-se:

1. Aperfeiçoar a linguagem de programação para melhorar a velocidade de processamento do software;
2. Realizar experimentos com a utilização de temporizadores;
3. Possibilitar realizar simulações que busquem automaticamente, de acordo com parâmetros pré-definidos, qual o melhor sistema a ser utilizado pelo critério do usuário;
4. Aperfeiçoar a análise técnica econômica pelo valor presente e incluir fluxo de caixa;
5. Incluir modelagem para simulações com coletores evacuados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas, 1988. Coletores Solares Planos para Líquidos, Determinação do Rendimento térmico, Método de Ensaio. Rio de Janeiro, Brasil. (NBR10184)
- Aita, F., 2006. Estudo do Desempenho de um Sistema de Aquecimento de Água por Energia Solar e Gás. Dissertação de Mestrado, Promec, UFRGS, Porto Alegre, RS.
- Close, D. J., 1962. The Performance of Solar Water Heaters with Natural Circulation, Solar Energy, Vol. 6, pp. 33-40.
- CEMIG, 1993. Seminário – Aquecimento Solar na Atualidade – Conforto e Economia na Construção de Edificações e em sua Utilização, Belo Horizonte.
- Collares-Pereira, M., Rabl, A., 1979. The Average Distribution of Solar Radiation – Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values, Solar Energy, Vol. 22, pp. 155-164.
- Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1991. Solar Engineering of Thermal Process, Wiley, New York.
- Guigas, M., Dalenback, J.O., 1998. A review of large-scale solar heating systems in Europe, Solar energy, Vol.63, pp 355-366.
- Huang, B.J., 1980. Similarity Theory of Solar Heater with Natural Circulation, Solar Energy, Vol 25, pp. 105-116.
- Hussein, H.M.S., 2002. Transient Investigation of a Two Phase Closed Thermosyphon Flat Plate Solar Water Heater, Energy Conversion and Management 43, pp. 2479-2492.

- Lima, J., Prado, R., Taborianski, V., 2005. 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*, Vol. 31, pp. 1581-1595.
- Kreith, F., Kreider, J. F., 1978. *Principles of Solar Engineering*, Mc Graw-Hill.
- Krenzinger, A., 1994. Modelo do Peixe: Sequências Horárias de Radiação Solar, Anais do V Encontro Nacional de Ciências Térmicas (ENCIT), São Paulo.
- Krenzinger, A., LAFAY, J.M., 2002. Análise Experimental de um Sistema, IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Aquecimento de Água com Energia Solar e Gás e Ciências Térmicas, Caxambu, MG, Brasil.
- Krenzinger, A., Farenzena, D.S., 2003. Synthesizing Sequences of Hourly Ambient Temperatura Data, Anais do 17th International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo.
- Krenzinger, A., Siqueira, A.M., Oliveski, R., 2003. Aquesolgas, Anais do 17th International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo
- Lafay, J.M., 2005. Análise Energética de Sistema de Aquecimento de Água com Energia Solar e Gás. Tese de Doutorado, Promec, UFRGS, Porto Alegre, RS.
- Lima, J. B. A., 2003. Otimização de Sistema de Aquecimento Solar de Água em Edificações Residenciais Unifamiliares Utilizando o Programa TRNSYS. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP.
- Lourenço, I. J., 2000. Estudo de um Sistema de Aquecimento de Água Híbrido Gás-Solar. Dissertação de Mestrado, Promec, UFRGS.
- Martin, J.V., Garcia, R., López, R.S., Casado, J.M., 2004. Integration de calderas e calentadores individuales en las instalaciones de ACS com energia solar. XII

Congresso Ibérico y VII Congresso Íbero Americano de Energia Solar, Vigo, Espanha.

Martins, F., Pereira, E., Guarnieri, R., Yamashita, C., Silva, S., Chagas, R., Corra, H., Souza, H., Abreu, S., 2007. Mapeamento dos Recursos de Energia Solar no Brasil. Anais do I CBENS, Fortaleza, Brasil.

Morrison G. L., Ranatunga D. B. J., 1980. Transient Response of Thermosyphon Solar Collectors, Solar Energy, 24, pp. 55-61, Australia.

Morrison G. L., Braun, J. E., 1984. System Modeling and Operation Characteristics of Thermosyphon Solar Water Heaters, Australia.

Morrison G. L., Tran H. N., 1984. Simulation of the Long Term Performance of Thermosyphon Solar Water Heaters, Australia.

Morrison G. L., Tran H. N., 1992. Energy Rating Domestic Water Heaters, Anzes, Annual Conference, Australia.

Naspolini, H. F., Militao, H., Ruther, R., 2008. Avaliação do Potencial da Agregação da Energia Solar Térmica para Fins de Aquecimento da Água para o Banho Humano em Núcleos Habitacionais de Baixa Renda, Anais do II CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar, Florianópolis.

Oliveski, R. C., 2000. Análise numérica e experimental dos campos de temperatura e velocidade em armazenamentos térmicos, Tese de Doutorado, Promec, UFRGS, Porto Alegre, RS.

Shitzer A., Kalmanovis D., Zvirin Y., Grossman G., 1979. Experiments with a Flat Plate Solar Water Heater System in Thermosyphon Flow, Solar Energy, Vol. 22, pp. 27-35.

Siqueira A.M.O., 2003. Desenvolvimento de um Programa de Simulação Computacional de Sistemas de Aquecimento Solar para Água, Tese de Doutorado, Promec, UFRGS, Porto Alegre, RS.

Tiwari, G. N., 2006. Solar Energy Technology Advances, Nova Science Publishers, Inc., New York.

Treis, F.L., 1991. Simulação de Sistemas de Aquecimento de Água por Energia Solar com Circulação Natural, Dissertação de Mestrado, Promec, UFRGS, Porto Alegre, RS.

Vieira, Luiz Rosa, 2001. Estratégias para Minimizar o Consumo de Energia Elétrica no Apoio a Sistemas Solares de Aquecimento de Água, Dissertação de Mestrado, Promec, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., Menicucci, D., 1987. A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces. Solar Energy, Vol. 39, pp. 221-231.

CONSULTAS

ABENS, Associação Brasileira de Energia Solar. www.abens.com.br

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. www.aneel.gov.br

ASADES, Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. www.asades.org.ar

Axaopoulos, P., Pitsilis, G., 2006. Energy Software Programs for Educational Use. Renewable Energy, Vol. 32, pp. 1045-1058.

Biaou, A.L., Bernier, M.A., 2006. Achieving Total Domestic Hot Water Production with Renewable Energy. Building and Environment, Vol. 43, pp. 651-660.

CEPEL-CRESESB, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. www.cepel.br

CIDADES SOLARES, ONG sócio ambiental. www.cidadessolares.com.br

Colle, S.; Pereira, E. B., 1998. Atlas de irradiação solar do Brasil. Brasília: INMET.

Cooper P. I., 1981. The Effect of Inclination on the Heat Loss from Flat Plate Solar Collectors, *Solar Energy*, Vol. 27, No 5, pp. 413-420.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2007.

Hellstrom, B., Adsten, M., Nostell, P., Karlsson, B., Wackelgard, E., 2002. The Impact of Optical and Thermal Properties on the Performance of Flat Plate Solar Collectors. *Renewable Energy*, Vol. 28, pp. 331-344.

Horta, P., Carvalho, M., Pereira, M., Carbajal, W., 2008. Long Term Performance Calculations base on Steady-State Efficiency Tests Results: Analysis of Optical Effects Affecting Beam, Diffuse and Reflected Radiation. *Solar Energy*.

INETI, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Informação de Portugal. Informações do software Solterm 5.0. www.ineti.pt

Jansa P., Chungpaibulpatana S. and Limmeechokchai B., 2004. A Simulation Model for Predicting the Performance of a Built in Storage Solar Water Heater, *Thammasat Int. J. Sc. Tech*, Vol. 9, No. 4, Thailand.

Kablan, M.M., 2004. Techno-Economic Analysis of the Jordanian Solar Water Heating Systems. *Energy*, Vol. 29, pp 1069-1079.

Kaldellis, J.K., 2005. Feasibility Analysis of Domestic Solar Water Heating Systems in Greece. *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 659-682.

Khiari, B, Mabrouk, S., 2004. Technical and Economic Survey of Low Enthalpy Solar Installations for Heating Sanitary Water. *ScienceDirect*, Vol. 165, pp. 259-268.

Morrison G.L., Wood B. D. Packed Solar Water Heating Technology Twenty Years of Progress, 1986. School of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of New South Wales, Australia.

Oliveski, R.C., Krenzinger, A., Vielmo, H. A., 2003. Cooling of Cylindrical Vertical Tanks Submitted to Natural Internal Convection, International Journal of Heat and Mass Transfer, Elsevier Science Ltd., Vol. 46, pp. 2015-2026.

Peter, M., 2008. Testing of Controllers for Thermal Solar Systems. Solar Energy, Vol. 82, pp. 676-685.

Pillai, I., Banerjee, R., 2006. Methodology for estimation of Potencial for Solar Water Heating in a Target Area. Solar Energy, Vol. 81, pp. 162-172.

Riffel, B. D., 2007. Simulação do Aporte Térmico de Coletores Solares Planos em um Tanque Cilíndrico Estratificado, I CBENS – Congresso Brasileiro de Energia Solar, Florianópolis.

Rojas, D., Beermann, J., Klein, S.A., Rein, D.T., 2008. Thermal Performance Testing of Flat Plate Collectors. Solar Energy, Vol. 82, pp. 746-757.

Shinnar, R., Citro, F., 2007. Solar Thermal Energy: The Forgotten Energy Source. Technology in Sociaty, Vol. 29, pp. 261-270.

Tang, R., Sun, Z., Li, Z., Yu, Y., Zhong, H., Xia, C., 2008. Experimental Investigation on thermal Performance of Flat Plate Collectors at Night. Energy Conversion and Management.

Thur, A., Furbo, S., Shah, L, 2006. Energy Savings for Solar Water Heating. Solar Energy, Vol. 80, pp. 1463-1474.

WORLD ENERGY COUNCIL, Conselho Mundial de Energia. www.worldenergy.org

Ucar, A., Inalli, M., 2008. Thermal and Economic Comparisons of Solar Heating Systems with Seasonal Storage Used in Building Heating. *Renewable Energy*.

Zilles, R., 1987. Comparação Experimental de Testes de Coletores Solares. Planos com Simulador e com Radiação Solar, Dissertação, PROMEC, Porto Alegre, RS.