

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

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA COM**  
**ENERGIA SOLAR E GÁS**

**por**

**Jean-Marc Stephane Lafay**

**Tese de Doutorado**

**Porto Alegre, junho de 2005**

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA COM  
ENERGIA SOLAR E GÁS**

**por**

**Jean-Marc Stephane Lafay  
Mestre em Engenharia**

**Tese 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 a obtenção do Título de**

**Doutor em Engenharia**

**Área de concentração: Energia**

**Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger**

**Banca examinadora:**

**Prof. Dr. Paulo Otto Beyer**

**Prof. Dr. Pio Caetano Lobo**

**Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan**

**Prof. Dr. Flávio Lorini  
Coordenador do PROMEC**

**Porto Alegre, junho de 2005.**

“A verdadeira medida de um homem não é como ele se comporta em momentos de conforto e conveniência, mas como ele se mantém em tempos de controvérsia e desafio”.

Martin Luther King

Dedico este Trabalho àqueles que acreditaram incondicionalmente em mim desde pequeno, meus queridos pais, Jean-Pierre e Josette, que me educaram e me fizeram perseguir meus sonhos. Ao meu amado filho, Jean-Luc, que me fez querer ser um exemplo ou pelo menos dar de mim o melhor. À minha parceira, Cíntia, por me ensinar a arte da paciência e do amor. À minha filhinha que está para nascer a qualquer momento.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a este grande país chamado Brasil, por ter me acolhido e propiciado a qualidade de vida que usufruo atualmente. Agradeço o Centro Federal de Educação Tecnológica, especialmente aos colegas da Coordenação de Eletromecânica que permitiram o meu afastamento para realizar este trabalho. Agradeço ao CNPq pela bolsa de estudos. Agradeço as pessoas que trabalham nos bastidores do PROMEC na UFRGS.

Agradeço igualmente ao meu orientador Dr. Arno Krenzinger pela dedicação e humor com que trabalha e orienta. Ao M. Sc. César Wilhelm Massen Prieb um muito obrigado pelo “help” prestado ao longo destes quatro anos.

Também sou grato ao amigo Airton Cabral de Andrade por me mostrar o que realmente significa a palavra amizade e ao amigo Daniel Sampaio Figueira por estar sempre um passo a frente na trilha do doutorado, clareando o caminho a ser percorrido. Sinto-me grato e satisfeito de ter convivido com os bolsistas e colegas do Laboratório de Energia Solar, Aguiar, Batista, Fabio, Felipe (Cubano), Gustavo, Heston, Joaquim, Luis (Argentino), Kell, Medina, Moisés, Oliboni, Pablo, Patric, Polozine (Russo), Roberto, Rossini, Scain, Steigleder e Wagner, pela atmosfera de alegria, amizade e respeito que ajudaram a construir.

## RESUMO

Esta Tese apresenta uma análise do comportamento térmico de um sistema de aquecimento de água combinando energia solar e gás como fontes energéticas. A ênfase desta análise está na influência que a forma de conexão dos coletores solares e do circuito da fonte auxiliar de energia ao reservatório exercem sobre a eficiência e o custo de operação do sistema. O trabalho engloba uma montagem experimental, caracterização de componentes, validação experimental de um programa de simulação, análises de eficiência utilizando o programa e análises econômicas com dados simulados.

Na fase experimental desta Tese, foram montados três sistemas de aquecimento de água. Dois sistemas utilizando reservatórios verticais e um sistema utilizando reservatório horizontal. Os sistemas foram montados com componentes similares: reservatórios metálicos isolados termicamente com capacidade de 600 litros (verticais), reservatório de polietileno isolado termicamente com capacidade de 600 litros (horizontal), 2 coletores solares de placas planas, tubulação de cobre e aquecedores a gás de passagem de 7,5 ℓ /min. Os componentes foram caracterizados mediante a curva de eficiência dos coletores solares, eficiência dos aquecedores a gás de passagem e o coeficiente de perdas térmicas dos reservatórios.

Sensores foram instalados para monitorar os sistemas em operação. Os sinais dos sensores foram medidos através de uma central de aquisição de dados conectado a um computador. Temperaturas, irradiância solar, consumo de gás e consumo de água foram registrados ao longo do tempo. Os resultados experimentais foram comparados com resultados calculados por meio de um programa desenvolvido no Laboratório de Energia Solar apresentando boa concordância.

Utilizando o mesmo programa determinou-se a configuração do sistema de aquecimento de água com energia solar e gás mais eficiente para a cidade de Porto Alegre com um determinado perfil de consumo. Outros tipos de sistemas de aquecimento de água foram simulados para atender o mesmo perfil de demanda. Análises econômicas comparando estes sistemas entre si foram realizadas considerando diversos cenários econômicos.

## ABSTRACT

This Thesis presents an analysis of the thermal behavior of a water heating system combining solar energy and gas as energy sources. This analysis is focused on how the efficiency and operational cost of the system are influenced by the way the solar collectors and the auxiliary energy source are connected to the reservoir. The work includes the assembly of an experimental system, the characterization of its components and the validation of a computer simulation program. Analyses of the system efficiency using the software and economical analyses with simulated data were also performed.

Three water heating systems were assembled in the experimental phase of this Thesis. Two of them featured vertical tanks and the other had a horizontal tank. Similar components were employed in each system: a thermal insulated tank with 600 liters capacity, two flat plate solar collectors, copper piping and a 7.5  $\ell$  /min instant gas heater. The components were characterized through the solar collectors efficiency curve, the efficiency of the instant gas heaters and overall thermal loss coefficient of the tanks.

Several sensors were installed for monitoring the systems under operation. Their signals were measured by a data acquisition system connected to a computer. Temperatures, solar irradiance, gas and water consumption were registered along the time. The experimental results were compared to the results obtained from a simulation program developed at the UFRGS Solar Energy Laboratory with a good agreement.

The most efficient configuration for a hybrid solar-gas water heating system for the city of Porto Alegre, for a given load profile, was determined with the same software. Different types of water heating systems were also simulated and the results were compared considering several economical scenarios.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>SUMÁRIO</b> .....	viii
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	xi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xiii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xix
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 Justificativa.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Escopo da Tese .....	5
<b>2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	6
2.1 Energia Elétrica.....	6
2.2 Gás Natural.....	8
2.2.1 Gás Associado.....	9
2.2.2 Gás Não Associado.....	10
2.3 Gás Liquefeito de Petróleo.....	10
2.4 Energia Solar.....	15
2.5 Componentes de Sistemas de Aquecimento de Água com Energia Solar.....	15
2.5.1 Coletores Solares .....	15
2.5.2 Reservatórios Térmicos.....	18
2.5.3 Fonte de Energia Auxiliar. ....	22
2.6 Configurações dos Sistemas de Aquecimento de Água com Energia Solar .....	22
2.6.1 Sistema Passivo Direto. ....	23
2.6.2 Sistema Passivo Indireto.....	23
2.6.3 Sistema Ativo Direto. ....	24
2.6.4 Sistema Ativo Indireto.....	25
2.7 Parâmetros de Projeto.....	25
2.7.1 Temperatura de Operação.....	25
2.7.2 Perfil de Consumo .....	26
2.8 Aspecto Econômico de Sistemas de Aquecimento de Água. ....	28
2.9 Aspecto Ambiental de um Sistema Solar de Aquecimento de Água. ....	29



<b>3.0</b>	<b>MONTAGEM EXPERIMENTAL DOS SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE</b>	
	<b>ÁGUA</b> .....	31
3.1	Sistema de Aquisição de Dados .....	34
3.1.1	Central de Aquisição de Dados .....	36
3.1.2	Sensor Resistivo PT100.....	37
3.1.3	Sensor de Circuito Integrado .....	39
3.1.4	Piranômetro Fotovoltaico .....	41
3.1.5	Medidor de Consumo de Gás .....	42
3.1.6	Medidor de Consumo de Água.....	43
<b>4.0</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DOS SISTEMAS</b> .....	44
4.1	Caracterização dos Reservatórios Térmicos.....	44
4.1.1	Alteração do Isolamento do Reservatório Térmico Vertical.....	51
4.2	Caracterização dos Coletores Solares.....	53
4.2.1	Calibração do Fluxímetro.....	59
4.2.2	Medidas de Eficiência de Coletores Solares.....	60
4.3	Sistema de Aquecimento a Gás .....	63
4.3.1	Determinação do Rendimento do Aquecedor a Gás de Passagem.....	64
4.3.1.1	Condições de Ensaio.....	64
4.3.1.2	Rendimento e Potência do Aquecedor a Gás.....	66
4.3.2	Dispositivo Contra Falhas no Acendimento do Gás no Aquecedor de Passagem.....	69
4.4	Válvula de Controle de Consumo (Solenóide).....	71
<b>5.0</b>	<b>ANÁLISE DAS INCERTEZAS</b> .....	73
5.1	Incerteza na Medida dos Sensores de Temperatura.....	73
5.2	Energia Proveniente do Gás.....	74
5.3	Energia Associada ao Coletor Solar.....	80
5.4	Energia Associada ao Consumo.....	81
5.5	Energia Associada às Perdas Térmicas.....	82
<b>6.0</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b> .....	85
6.1	Comportamento dos Sistemas .....	89
6.2	Influência do Aquecedor a Gás nos Perfis de Temperaturas.....	89
6.3	Influência da Configuração Sobre a Temperatura de Operação dos Coletores.....	92
6.4	Influência do Consumo no Perfil de Temperaturas .....	93
6.5	Influência do Horário de Consumo na Eficiência dos Sistemas.....	96
<b>7.0</b>	<b>PROGRAMA DE SIMULAÇÃO</b> .....	104

7.1	Metodologia de Validação do Programa de Simulação .....	108
7.2	Validação dos Módulos do Programa de Simulação .....	109
<b>8.0</b>	<b>ANÁLISE DOS SISTEMAS</b> .....	<b>123</b>
8.1	Determinação da Configuração do Sistema de Aquecimento Mais Eficiente.....	123
8.1.1	Resultados das Simulações.....	125
8.2	Comparação de Sistemas de Aquecimento de Água .....	130
8.3	Método Econômico .....	132
<b>9.0</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>145</b>
	Referências Bibliográficas .....	148
	Bibliografia Complementar.....	153
	Publicações Geradas por esta Tese.....	153

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Valor no período $N$	[R\$]
$A_c$	Área do coletor	[m <sup>2</sup> ]
$c_p$	Calor específico à pressão constante	[J/kg°C]
$d$	Taxa de juros do mercado	[%]
$E_i$	Energia interna	[J]
$F_R$	Fator de remoção de calor	[-]
$G_o$	Irradiância solar extraterrestre sobre uma superfície horizontal	[W/m <sup>2</sup> ]
$G_{sc}$	Constante solar	[W/m <sup>2</sup> ]
$G_T$	Energia da radiação solar sobre a superfície do coletor	[J]
$k$	Condutividade térmica	[W/m°C]
$M$	Índice de qualidade do acumulador em função da área e volume	[-]
$m$	Massa	[kg]
$\dot{m}$	Vazão mássica	[kg/s]
$N$	Número de pagamentos	[-]
$n$	Número do dia do ano	[-]
$P$	Pressão	[N/m <sup>2</sup> ]
PCS	Poder calorífico superior	[kJ/m <sup>3</sup> ]
$q$	Quantidade de calor trocado entre dois corpos	[J]
$Q_a$	Energia armazenada	[J]
$Q_{cons}$	Energia de consumo	[J]
$Q_{gás}$	Energia do gás	[J]
$Q_{solar}$	Energia do coletor solar	[J]
$Q_p$	Energia associada às perdas	[J]
$Q_u$	Energia útil	[J]
$Q_{uc}$	Energia útil do coletor solar	[J]
$\dot{Q}_u$	Potência útil	[W]
$R$	Resistência	[Ω]
$S$	Energia da radiação solar absorvida	[J]
$t$	Tempo	[s]
$T$	Temperatura absoluta	[K]
$T_a$	Temperatura ambiente	[°C]
$T_{cons}$	Temperatura de consumo	[°C]

$T_e$	Temperatura de entrada	[°C]
$T_s$	Temperatura de saída	[°C]
$T_m$	Temperatura média	[°C]
$T_q$	Temperatura interna (uniforme)	[°C]
$T_{rede}$	Temperatura da água da rede	[°C]
$U$	Coeficiente de perdas térmicas do reservatório	[W/m <sup>2</sup> °C]
$U_L$	Coeficiente de perdas térmicas do coletor solar	[W/°C]
$U_T$	Coeficiente global de perdas térmicas	[W/°C]
VP	Valor presente	[R\$]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$V_0$	Volume normalizado	[m <sup>3</sup> ]
$W_C$	Incerteza na calibração do sensor de temperatura	[°C]
$W_E$	Incerteza devido a instabilidade do sensor de medida da temperatura	[°C]
$W_S$	Incerteza na medida de temperatura do sistema de aquisição de dados	[°C]
$W_T$	Incerteza na medida da temperatura	[°C]
$W_{Qcons}$	Incerteza na medida da energia de consumo	[J]
$W_{Qsolar}$	Incerteza na medida da energia associada aos coletores solares	[J]
$W_{Qperdas}$	Incerteza na medida da energia associada as perdas térmicas	[J]
$W_{Qgás}$	Incerteza na medida da energia do gás	[J]

### **Caracteres Gregos**

$\alpha$	Difusividade térmica	[m <sup>2</sup> /s]
$\varepsilon$	Emissividade da superfície	[-]
$\eta$	Rendimento	[%]
$\eta_c$	Rendimento do coletor solar	[%]
$\eta_s$	Rendimento do sistema de aquecimento de água	[%]
$\lambda$	Comprimento de onda	[m]
$\rho$	Massa específica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\beta$	Inclinação da superfície em relação ao solo	[°]
$(\tau\alpha)_e$	Produto da transmitância-absortância efetivo	[-]

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Preço médio de revenda de Gás Natural. ANP, 2005.....	9
Figura 2.2	Reservatório produtor de óleo e gás associado. (COMPET, 2004).....	10
Figura 2.3	Reservatório produtor de gás não-associado. (COMPET, 2004) .....	10
Figura 2.4	Preço médio de revenda de gás liquefeito de petróleo ANP, 2005 .....	13
Figura 2.5	Representação esquemática da localização da fonte auxiliar de energia em sistemas passivos diretos... ..	23
Figura 2.6	Representação esquemática da localização da fonte auxiliar de energia em sistemas passivos indiretos... ..	24
Figura 3.1	Vista geral dos sistemas de aquecimento de água .....	32
Figura 3.2	Representação esquemática das conexões de ambos os sistemas.....	32
Figura 3.3	Vista geral do sistema de aquecimento de água com reservatório horizontal .....	33
Figura 3.4	Localização dos sensores PT100 no sistema 1 (paralelo).....	34
Figura 3.5	Localização dos sensores PT100 no sistema 2 (série).....	35
Figura 3.6	Localização dos sensores PT100 no sistema 3 (horizontal) .....	35
Figura 3.7	Posicionamento dos sensores C.I. no interior do reservatório térmico .....	36
Figura 3.8	Isolamento elétrico do PT100.....	38
Figura 3.9	Detalhe da fixação do sensor PT100 na tubulação de cobre .....	39
Figura 3.10	LM35 com massa térmica na perna do terra.....	40
Figura 3.11	Haste de CPVC com LM35 em seu interior .....	40
Figura 3.12	Calibração dos sensores C.I.s com o banho termostático e o tubo acoplado a ele .....	41
Figura 3.13	Conexão dos sensores C.I. ao cartão multiplexador HP 34901A.....	41
Figura 3.14	Piranômetro fotovoltaico .....	42
Figura 3.15	Medidor de consumo de gás .....	42
Figura 3.16	Hidrômetro.....	43
Figura 4.1	Dimensões do reservatório térmico vertical em mm.....	44
Figura 4.2	Dimensões do reservatório térmico horizontal em mm.....	45
Figura 4.3	Vista em perspectiva do reservatório horizontal.....	45
Figura 4.4	Curva de resfriamento do reservatório vertical .....	47
Figura 4.5	Relação entre potencia térmica transferida e diferença média de temperatura do reservatório para o ambiente para calcular os coeficientes globais de	

	perdas dos sistemas série(2) e paralelo(1).....	48
Figura 4.6	Comparação da variação de energia interna medida e calculada por dois métodos diferentes.....	51
Figura 4.7	Isolamento adicional de poliuretano.....	52
Figura 4.8	Enlonamento para diminuir a ação do vento.....	52
Figura 4.9	Blindagem de alumínio para radiação solar.....	52
Figura 4.10	Coletores sob teste na bancada Aquatherm. O gabinete da esquerda é o sistema de refrigeração e o do fundo abriga os sistemas de aquecimento e circulação de água.....	56
Figura 4.11	Diagrama esquemático do circuito hidráulico de medição Aquatherm WS 83.....	56
Figura 4.12a	Piranômetro Eppley PSP utilizado para medir a radiação solar.....	57
Figura 4.12b	Anemômetro utilizado para medir a velocidade do vento.....	57
Figura 4.13	Controle de vazão e caixa de conexões para os sensores de temperatura, radiação e velocidade do vento.....	58
Figura 4.14	Esquema do sistema de aquisição de dados.....	58
Figura 4.15	Tela principal do programa Aquatherm de aquisição de dados.....	59
Figura 4.16	Curva de calibração do fluxímetro utilizado nos ensaios.....	60
Figura 4.17	Curva de eficiência instantânea medida dos coletores utilizados.....	61
Figura 4.18	Comparação entre a variação de energia medida e calculada do sistema paralelo.....	62
Figura 4.19	Aquecedores e botijões de 45kg com válvula de redução de pressão.....	63
Figura 4.20	Esquema do ensaio com o posicionamento dos equipamentos.....	66
Figura 4.21	Variação de temperatura entre a entrada e saída dos aquecedores do sistema 1 e 2 (22/01/04).....	67
Figura 4.22	Variação de temperatura entre a entrada e saída dos aquecedores do sistema 1 e 2 (19/01/04).....	67
Figura 4.23	Comparação da variação da energia interna medida e calculada, quando é acionado o aquecedor a gás.....	68
Figura 4.24	Diagrama esquemático do controlador de religamento do gás.....	70
Figura 4.25	Placa de circuito impresso – vista superior (esq.) e inferior (dir.).....	70
Figura 4.26	Variação da energia interna devido ao consumo.....	72
Figura 6.1	Variação da energia interna dos reservatórios quando os sistemas operaram apenas com energia solar, utilizando coeficiente global de perdas do sistema igual a 10 W/°C para o sistema 1 (paralelo) e 8,5 W/°C para o sistema 2	

	(série).....	85
Figura 6.2	Variação da energia interna dos sistemas de aquecimento apenas com energia solar, utilizando coeficiente global de perdas de 9,5 W/°C para o sistema 1 e 8,1 W/°C para o sistema 2 .....	86
Figura 6.3	Variação da relação entre potência transferida e diferença média de temperatura entre o interior do reservatório e o ambiente do sistema paralelo e série.....	87
Figura 6.4	Variação da energia interna dos reservatórios dos sistemas, considerando as perdas térmicas e a energia solar, utilizando coeficiente global de perdas de 9,77 W/°C para o sistema 1 e 8,24 W/°C para o sistema 2 .....	88
Figura 6.5	Variação da energia interna dos reservatórios dos sistemas, considerando as perdas térmicas e a energia solar, utilizando coeficiente global de perdas de 9,5 W/°C para o sistema 1 e 8,1 W/°C para o sistema 2 .....	88
Figura 6.6	Temperatura média da água no interior dos reservatórios, temperatura ambiente e perdas térmicas ao longo de um período de três dias. Utiliza-se $t_{m1}$ para temperatura média do sistema 1, $t_{m2}$ para temperatura média do sistema 2 e $t_a$ para a temperatura ambiente.....	89
Figura 6.7	Perfis de temperatura da água do reservatório do sistema paralelo quando o aquecedor é acionado. Utiliza-se $T_{egas}$ para a temperatura da água na entrada do aquecedor a gás, $T_{sgas}$ para a temperatura da água na saída do aquecedor a gás, $E_{gas}$ para a energia fornecida pelo aquecedor a gás e $T_1$ a $T_8$ para a temperatura da água nas camadas de 1 a 8. ....	90
Figura 6.8	Perfis de temperaturas da água do reservatório do sistema série quando o aquecedor é acionado. Utiliza-se $T_{egas}$ para a temperatura da água na entrada do aquecedor a gás, $T_{sgas}$ para a temperatura da água na saída do aquecedor a gás, $E_{gas}$ para a energia fornecida pelo aquecedor a gás e $T_1$ a $T_8$ para a temperatura da água nas camadas de 1 a 8. ....	90
Figura 6.9	Perfis de temperaturas do sistema Paralelo ao longo de três dias de ensaio, com todos os componentes atuando de forma integrada .....	91
Figura 6.10	Perfis de temperaturas do sistema Série ao longo de três dias de ensaio, com todos os componentes atuando de forma integrada. ....	92
Figura 6.11	Temperaturas da água na entrada e saída dos coletores solares de ambos os sistemas. Onde $T_a$ corresponde a temperatura ambiente, $T_{e1}$ e $T_{s1}$	

	correspondem as temperaturas de entrada e de saída da água do coletor do sistema paralelo, $T_{e2}$ e $T_{s2}$ correspondem as temperaturas de entrada e de saída da água do coletor do sistema série. ....	93
Figura 6.12	Influência do consumo no perfil de temperaturas do sistema paralelo. São utilizados $T_{cons}$ para a temperatura de consumo, $T_{rede}$ para a temperatura do sensor da água da rede (água de reposição) e $P_{cons}$ para a potência associada ao consumo de água quente. ....	94
Figura 6.13	Influência do consumo no perfil de temperaturas do sistema série. São utilizados $T_{cons}$ para a temperatura de consumo, $T_{rede}$ para a temperatura do sensor da água da rede (água de reposição) e $P_{cons}$ para a potência associada ao consumo de água quente. ....	95
Figura 6.14	Acionamento do aquecedor a gás causando oscilação na temperatura da camada T5. ....	95
Figura 6.15	Influência do consumo às 19 horas no sistema paralelo. ....	98
Figura 6.16	Influência do consumo às 19 horas no sistema série. ....	98
Figura 6.17	Influência do consumo às 15 horas no sistema paralelo. ....	99
Figura 6.18	Influência do consumo às 15 horas no sistema série. ....	99
Figura 6.19	Influência do consumo às 9 horas no sistema paralelo. ....	100
Figura 6.20	Influência do consumo às 9 horas no sistema série. ....	100
Figura 6.21	Comparação da variação da energia interna do reservatório do sistema 1 (paralelo), medido e calculado. ....	101
Figura 7.1	Formulário de entrada de valores da geometria do sistema a ser simulado .....	106
Figura 7.2	Formulário de dimensões e eficiência do coletor do programa de simulação (dados do coletor utilizado no trabalho). ....	106
Figura 7.3	Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema paralelo no dia 23/03/2003. ....	110
Figura 7.4	Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema paralelo no dia 23/03/2003. ....	110
Figura 7.5	Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema paralelo no dia 01/04/2004. ....	111
Figura 7.6	Resultado experimental do perfil de temperaturas das camadas de água no	



	interior do reservatório no dia 05/04/2004. ....	112
Figura 7.7	Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório no dia 08/04/2004. ....	112
Figura 7.8	Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório horizontal no dia 11/02/2005. ....	113
Figura 7.9	Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema paralelo com acionamento automático do aquecedor a gás, no dia 17/04/2004. ....	114
Figura 7.10	Temperatura média simulada e experimental correspondente a figura 7.9. ....	114
Figura 7.11	Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema série com acionamento de gás automático, no dia 17/04/2004. ....	115
Figura 7.12	Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório horizontal com acionamento de gás automático, no dia 27/04/2005. ....	116
Figura 7.13	Dados de irradiância solar e temperatura ambiente do dia 13/09/2003. ....	117
Figura 7.14	Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema paralelo no dia 13/09/2003. ....	118
Figura 7.15	Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema série no dia 13/09/2003. ....	118
Figura 7.16	Dados de irradiância solar e temperatura ambiente do dia 15/02/2005. ....	119
Figura 7.17	Temperaturas de entrada e saída dos coletores solares do sistema horizontal experimental (a) e simulado (b), no dia 15/02/2005. ....	119
Figura 7.18	Resultado experimental do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema horizontal no dia 15/02/2005. ....	120
Figura 7.19	Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas da água no interior do reservatório do sistema paralelo quando ocorre consumo de água quente, acionamento do aquecedor e funcionamento dos coletores solares. ....	121
Figura 7.20	Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas da água no interior do reservatório do sistema série quando ocorre consumo de água quente, acionamento do aquecedor e funcionamento dos coletores solares. ....	121

Figura 7.21	Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas da água no interior do reservatório do sistema com reservatório horizontal quando ocorre consumo de água quente, acionamento do aquecedor e funcionamento dos coletores solares. ....	122
Figura 8.1	Eficiência média do sistema solar das 20 configurações simuladas com dois e três coletores solares. ....	126
Figura 8.2	Fração solar das 20 configurações simuladas com dois e três coletores solares. ....	126
Figura 8.3	Energia térmica agregada ao reservatório das 20 configurações com dois e três coletores solares. ....	127
Figura 8.4	Consumo anual de gás das 20 configurações simuladas com dois e três coletores solares. ....	128
Figura 8.5	Representação esquemática da configuração oito .....	130
Figura 8.6	Relação entre o valor presente total dos sistemas e o custo do coletor solar utilizando taxa de financiamento de 5%. ....	140
Figura 8.7	Relação entre o valor presente total dos sistemas e o custo do coletor solar utilizando taxa de financiamento de 2%. ....	141
Figura 8.8	Relação entre o valor presente total dos sistemas e o custo do coletor solar utilizando taxa de financiamento de 1% (cenário 3). ....	141
Figura 8.9	Relação entre o valor presente total dos sistemas e o custo do coletor solar utilizando taxa de financiamento de 5% (cenário 4). ....	142
Figura 8.10	Relação entre o valor presente total dos sistemas e o custo do coletor solar utilizando taxa de financiamento de 2% (cenário 5). ....	143
Figura 8.11	Relação entre o Valor presente total dos sistemas e o custo do coletor solar utilizando taxa de financiamento de 1% (cenário 6). ....	144

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Tarifas médias de energia elétrica, classe residencial, para o estado do Rio Grande do Sul. ANEEL, 2005 .....	7
Tabela 2.2	Tarifa convencional do setor residencial. CEEE, 2005.....	7
Tabela 2.3	Alíquota de ICMS em função das Classes.....	8
Tabela 2.4	Comparações entre GN e GLP. (COMPET, 2004) .....	14
Tabela 2.5	Propriedades termofísicas de alguns materiais a 30°C, Incropera (1998).....	20
Tabela 4.1	Parâmetros do sistema de aquecimento a gás, determinados experimentalmente.....	68
Tabela 4.2	Vazão mássica de consumo de água quente dos sistemas, determinadas experimentalmente.....	71
Tabela 5.1	Valores das incertezas utilizadas no cálculo da incerteza do volume de gás .....	77
Tabela 5.2	Valores das incertezas utilizados no cálculo da incerteza da eficiência do aquecedor.....	78
Tabela 5.3	Valores das incertezas utilizados no cálculo da incerteza da eficiência do coletor... ..	80
Tabela 5.4	Valores médios para cálculo da incerteza da energia associada aos coletores solares.....	81
Tabela 5.5	Valores médios para cálculos da incerteza da energia associada ao consumo.....	82
Tabela 5.6	Incertezas das variáveis da energia associada às perdas térmicas .....	83
Tabela 5.7	Valores das variáveis utilizadas no cálculo da incerteza da energia associada as perdas térmicas. ....	84
Tabela 6.1	Balanco de energia de ambos os sistemas .....	96
Tabela 6.2	Coefficientes utilizados nos cálculos do balanço de energia.....	101
Tabela 6.3	Balanco energético dos sistemas para os diferentes horários de consumo, ao longo de três dias .....	102
Tabela 6.4	Estimativa das eficiências do sistema paralelo e série .....	103
Tabela 7.1	Parâmetros dos sistemas de aquecimento de água quente.....	107
Tabela 7.2	Alturas de conexão dos componentes do sistema paralelo, série e horizontal .....	107
Tabela 8.1	Alturas de conexões do coletor solar e aquecedor a gás das configurações simuladas.....	124
Tabela 8.2	Resultados das simulações das configurações mais eficientes utilizando 4 coletores solares.....	129
Tabela 8.3	Resultados das simulações das configurações mais eficientes utilizando 5 coletores solares.....	129

Tabela 8.4	Custo do sistema de aquecimento de água com energia solar (com 1 coletor solar).	131
Tabela 8.5	Custo do sistema de aquecimento a gás.....	131
Tabela 8.6	Custos dos sistemas. ....	132
Tabela 8.7	Custo dos combustíveis em R\$/MJ. ....	133
Tabela 8.8	Valores presentes dos custos de implantação, manutenção, operação e total dos sistemas de aquecimento simulados (cenário 1).....	134
Tabela 8.9	Valores presentes dos custos de implantação, manutenção, operação e total dos sistemas de aquecimento simulados (cenário 2).....	135
Tabela 8.10	Valores presentes dos custos de implantação, manutenção, operação e total dos sistemas de aquecimento simulados (cenário 3).....	136
Tabela 8.11	Valores da energia elétrica, botijão de gás e suas taxas de inflação. (ANEEL, 2005 e ANP, 2005) .....	137
Tabela 8.12	Valores presentes dos custos dos sistemas de aquecimento (cenário 4).....	138
Tabela 8.13	Valores presentes dos custos dos sistemas de aquecimento (cenário 5).....	138
Tabela 8.14	– Valores presentes dos custos dos sistemas de aquecimento (cenário 6). ....	139

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica no Brasil depende quase que exclusivamente das hidrelétricas (95%), tendo muito pouca contribuição por outras formas de geração de energia tais como térmica a carvão, gás e nuclear e menos ainda de fontes alternativas como solar e eólica (PROCEL, 2003). Esta política de geração de energia elétrica expõe o país a situações como o apagão de 2001, que na ausência de chuvas fez o sistema de geração de energia e a economia do país entrar em colapso. Modificar a estrutura de uma matriz energética é um processo que envolve planejamento de longo prazo, investimento e vontade política. A questão ambiental aparece de pano de fundo em conjunto com a economia devendo nortear o planejamento para um desenvolvimento sustentável.

A recente crise de energia que o Brasil enfrentou renovou o interesse em fontes de energias alternativas. De acordo com programa de conservação de energia elétrica do Brasil (PROCEL, 2003), aproximadamente 25% do consumo de energia elétrica do setor residencial são utilizados para aquecimento de água para banho. O chuveiro elétrico é o dispositivo de aquecimento de água mais utilizado no país, estando presente em 70% dos lares brasileiros, (ANEEL, 1998). A ABRAVA (1996) (Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento) afirma em suas publicações que mais de 6% de todo o consumo nacional de energia elétrica, é utilizado para alimentar chuveiros elétricos. A utilização em larga escala do chuveiro elétrico no Brasil deve-se ao relativo baixo custo do próprio chuveiro elétrico e da energia elétrica. Atualmente o cenário brasileiro indica uma previsão de aumento da demanda por energia elétrica superior a capacidade de aumento na geração de energia elétrica que os investimentos atuais serão capazes de realizar. Um fator agravante é a utilização do chuveiro nos ditos horários de pico, que sobrecarregam a rede de distribuição nestes horários. Segundo a Diretoria de Operações da Eletrobrás, na hora de pico (entre 18:00 e 21:00h), os chuveiros elétricos são responsáveis por quase 20% do consumo nacional de eletricidade, ANEEL (1998).

O aquecimento de água utilizando aquecedores a gás também é amplamente utilizado no país. Os sistemas apresentam eficiência da ordem de 80% para aquecedores de passagem e 85% para aquecedores de acumulação, considerando apenas a eficiência na transferência de calor

entre a câmara de combustão e a água e não no armazenamento de água quente. Respeitando aspectos de instalação, os aquecedores a gás podem ser considerados seguros. Embora resolvam o problema da sobrecarga do horário de pico que os chuveiros elétricos causam, a energia utilizada é de origem não renovável e é, portanto uma solução não sustentável.

Por outro lado o Brasil tem uma área territorial imensa e toda ela com uma boa incidência de radiação solar. A utilização da energia solar, uma energia renovável, para aquecimento de água em residências reduziria o problema elétrico e ambiental. Segundo Tolmasquim (2003), o Brasil atingiu cerca de 1,3 milhões de metros quadrados de área coletora instalada (coletores solares), em 2001. Cerca de 80% deste valor corresponde a instalações residenciais de aquecimento solar de pequeno porte em circulação natural.

Sistemas de aquecimento de água diferem entre si sob diferentes aspectos. Dentre os principais pode-se citar o custo de implantação, custo de operação e atendimento ao perfil de consumo. O chuveiro elétrico é o que apresenta o menor custo de implantação, seguido dos aquecedores a gás de passagem, aquecedores elétricos de acumulação, aquecedores a gás de acumulação e, por último, o aquecimento com energia solar.

O custo de operação é função do preço do combustível utilizado, eficiência do sistema de aquecimento e do perfil de consumo. Os sistemas de aquecimento com energia solar diferem dos demais, pois necessitam de uma fonte auxiliar de energia para suprir a demanda de água quente em dias de baixa radiação solar. Este fato faz com que o custo de operação não se mantenha constante, ficando dependente das condições climáticas, eficiência e conseqüentemente da fração em que a fonte auxiliar será utilizada, como demonstrado por Schröder e Reddemann (1982).

A capacidade “instantânea” de suprir a demanda é um fator limitante dos sistemas de aquecimento de passagem. Nos casos em que é necessário fornecer grandes quantidades de energia em curtos períodos de tempo, são favorecidos os sistemas que utilizam acumulação. Nesta categoria encontram-se os aquecedores de acumulação que utilizam energia elétrica, gás e energia solar.

Sistemas de aquecimento de água com energia solar tradicionalmente utilizam eletricidade como fonte auxiliar de energia. Como tais sistemas são projetados para suprir a demanda mesmo nos meses de inverno, o alto custo da energia elétrica faz com que o dimensionamento se dê de forma que a fração da fonte auxiliar de energia seja pequena, empregando uma grande área de coletores solares. Esta prática aumenta o custo de implantação e fornece um excedente de calor no verão.

No Brasil o custo equivalente do gás (GLP ou GN) é mais baixo que o da energia elétrica (tarifa residencial). Este fato faz com que, no dimensionamento de sistemas de aquecimento de água com energia solar que utilizam gás como fonte auxiliar, possa ser proposta uma fração da fonte auxiliar maior, com conseqüente área menor de coletores. Nestes sistemas pode-se utilizar um reservatório térmico com maior capacidade volumétrica e temperatura de operação mais baixa, resultando em menores perdas térmicas, como demonstrado por Krenzinger et al (2002). Assim, além do menor custo de implantação, é obtida uma maior eficiência do sistema solar ao longo do ano todo.

A eficiência dos coletores solares é função da radiação solar, temperatura ambiente e da temperatura da água na entrada do coletor. Quanto menor for a temperatura de entrada da água no coletor maior será a eficiência deste e, conseqüentemente, do sistema de aquecimento solar. Algumas recomendações para baixar a temperatura de entrada da água no coletor são listadas a seguir:

- Aumentar a relação volume do reservatório e área de coletores;
- Utilização de reservatório vertical, favorecendo a estratificação;
- Consumo de água quente de manhã.

As três alternativas foram adotadas nos sistemas em estudo nesta tese. Deve-se ainda considerar que o perfil de distribuição de temperatura no interior do tanque é influenciado pela posição, potência e instante em que é acionada a fonte de energia auxiliar.

A utilização da energia solar para aquecimento de água para fins residenciais, industriais e comerciais vem aumentando nos últimos anos no mundo todo. Percebe-se, no entanto, que para uma disseminação mais intensa do uso destas tecnologias são necessários programas de apoio e estímulo promovidos por órgãos governamentais. Um dos quesitos que retarda a expansão deste mercado é o custo inicial de um sistema de aquecimento de água com energia solar. Embora se saiba que estes sistemas apresentam um ciclo de vida elevado (aproximadamente 20 anos) e que neste período eles conseguem facilmente pagar o investimento inicial através da economia obtida no consumo de energia elétrica, a realidade econômica da maioria das famílias brasileiras não permite adquirir tais sistemas.

## **1.1 Justificativa**

No Brasil, a utilização de sistemas de aquecimento de água com energia solar é muito pequena devido aos seus altos custos de instalação. A utilização de chuveiros elétricos, em larga escala, sobrecarrega a rede de distribuição nos horários de pico. O custo do gás natural ou

do gás liquefeito de petróleo é menor do que a energia elétrica (tarifa residencial). Diante deste cenário o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul propõe um sistema de aquecimento de água que permite reduzir o custo de instalação de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás sem comprometer seu desempenho. O sistema de aquecimento de água com energia solar e gás proposto pode ser montado aumentando gradativamente o número de coletores e conseqüentemente diminuindo o custo de operação (consumo de gás).

O comportamento térmico deste tipo de sistema não é conhecido e programas de simulação disponíveis comercialmente não permitem variar as alturas das conexões dos componentes dos sistemas ao reservatório térmico. Para analisar o comportamento destes sistemas foi desenvolvido um programa de simulação por computador, no âmbito de um projeto conjunto entre UFRGS, PETROBRÁS e FINEP. Para validar o programa de simulação foram montados e monitorados três sistemas que utilizam gás como fonte auxiliar de energia, no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, para obter dados experimentais. Dois sistemas foram montados com reservatórios verticais e um terceiro com reservatório horizontal.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo principal desta tese é realizar um estudo sobre a influência que a forma de conexão dos coletores solares e do circuito da fonte auxiliar de energia ao reservatório exercem sobre a eficiência e o custo de operação do sistema de aquecimento.

Para atingir o objetivo principal será necessário efetuar várias etapas as quais caracterizam-se como objetivos específicos:

1. Caracterizar os componentes do sistema;
2. Montar três sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás;
3. Montar o sistema de aquisição de dados para monitorar as variáveis envolvidas;
4. Desenvolver um programa de controle dos sistemas de aquecimento de água;
5. Verificar os valores dos parâmetros, obtidos na caracterização dos componentes, com os sistemas operando, através do balanço de energia;
6. Gerar dados experimentais do comportamento dos sistemas de aquecimento;
7. Verificar experimentalmente a influência do perfil de consumo na eficiência dos sistemas;
8. Efetuar ajustes e validar o programa de simulação “Aquesolgás”;
9. Determinar a configuração que apresenta a melhor eficiência;



10. Efetuar uma análise econômica da configuração mais eficiente e compará-la com outros tipos de sistema para um caso de consumo na cidade de Porto Alegre.

### **1.3 Escopo da Tese**

Para a apresentação da tese, este documento é organizado em capítulos.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre as fontes de energia e os sistemas de aquecimento de água com energia solar. Descreve seus principais componentes, parâmetros de projeto, assim como aspectos econômicos e ambientais.

O capítulo 3 apresenta a descrição dos sistemas propostos e analisados nesta tese, bem como da central de aquisição de dados.

O capítulo 4 apresenta a caracterização dos componentes dos sistemas e detalhes da montagem experimental. Descreve o método de determinação dos parâmetros de projeto. Um programa desenvolvido em Visual Basic efetuou cálculos de balanço de energia, com os dados gerados experimentalmente. A comparação dos resultados calculados com os resultados experimentais comprovou a precisão dos parâmetros obtidos.

O capítulo 5 apresenta a análise das incertezas das variáveis experimentais e a propagação destas incertezas no cálculo do balanço de energia dos sistemas.

O capítulo 6 apresenta a metodologia de ensaio dos sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás e os resultados experimentais dos diversos ensaios realizados.

O capítulo 7 apresenta o programa de simulação por computador de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás, desenvolvido pela equipe do Laboratório de Energia Solar da UFRGS. Descreve os modelos adotados pelo programa, apresenta resultados da validação do programa, resultados simulados comparados com resultados experimentais.

O capítulo 8 apresenta a determinação da configuração mais eficiente assim com uma análise econômica de diferentes sistemas de aquecimento de água. Apresenta comparações entre o sistema proposto e o sistema de aquecimento de água com energia solar e apoio elétrico.

O capítulo 9 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 Energia Elétrica**

Por sua natureza, a energia elétrica é uma forma de energia que não pode ser armazenada. Assim, ela tem que ser produzida no momento em que se deseja utilizá-la ou convertida em outra forma de energia para seu armazenamento. Esta característica fundamental determina as possibilidades tecnológicas para seu fornecimento.

Devido a grande utilização da energia elétrica na sociedade, o seu fornecimento deve ser contínuo e ininterrupto. Ninguém está disposto a ficar sem a energia elétrica, seja qual for o período de tempo. Em países em desenvolvimento, como o Brasil, o crescimento do consumo de energia elétrica é uma constante (entre 3 e 5 % a.a.). Mesmo nos períodos em que se verificou uma estagnação econômica, o consumo não parou de crescer. Para atender a este consumo, novas usinas geradoras, sistemas de transmissão e distribuição devem ser construídos. A construção de novas usinas e sistema de transmissão está associada a grandes investimentos, longos prazos para conclusão das obras e significativos impactos ambientais. Quando é economizada energia elétrica, a energia não gasta pode ser fornecida a um outro consumidor, para prestação de um outro serviço, eliminando a necessidade de expansão do sistema.

É natural que as atividades humanas interfiram no meio ambiente. Porém, quando a interferência atinge um nível que desequilibra essa estrutura natural, ocorre o que se denomina “impacto ambiental”. É importante mencionar que todas as formas de geração de energia elétrica provocam interferências no meio ambiente. Algumas são mais impactantes e outras menos.

As usinas hidrelétricas provocam vários impactos ambientais, como a inundação de áreas (destruindo a flora e a fauna), interferência no curso natural dos rios e nos seus ciclos (devido ao represamento e controle das águas) e deslocamento de populações. As linhas de transmissão também produzem impactos ambientais, embora de dimensão bastante inferior aos das usinas de geração.

A Tabela 2.1 apresenta a evolução dos valores históricos das tarifas de energia elétrica no Brasil. Observa-se que a tarifa sofreu sucessivos aumentos de 1986 até 1993, em 1994

e 1995 ocorreram duas quedas nos preços, voltando a subir entre 1995 e 2001. Cabe ressaltar que verificando a evolução dos preços de outros energéticos neste mesmo período, observou-se o mesmo comportamento da tarifa de energia elétrica. Esta informação é bastante útil em análises econômicas de sistemas que utilizam combustíveis, como será visto no capítulo 8 desta tese.

Tabela 2.1 – Tarifas médias de energia elétrica, classe residencial, para o estado do Rio Grande do Sul. ANEEL, 2005.

Ano	Consumidor residencial (R\$/MWh)
1995	75,55
1996	104,16
1997	122,32
1998	129,42
1999	141,16
2000	156,95
2001	182,27
2002	210,75
2003	236,61
2004	274,16

O custo da energia elétrica para o setor residencial, adota um critério de redução de tarifa em função da faixa de consumo, como apresentado na Tabela 2.2, onde o valor de referência é o consumo mensal residencial. Os valores da Tabela 2.2 devem ser acrescidos do imposto sobre circulação de mercadorias (ICMS) apresentado na Tabela 2.3, para o cálculo final do custo do kWh.

Tabela 2.2 Tarifa convencional do setor residencial. CEEE 2005.

<b>BAIXA TENSÃO</b>	<b>CONSUMO</b>
<b>Subgrupo B1-CLASSE residencial</b>	<b>R\$/kWh</b>
<b>Consumo mensal ATÉ 30 kWh</b>	<b>0,106500</b>
<b>Consumo mensal DE 31 A 100 kWh</b>	<b>0,182610</b>
<b>Consumo mensal DE 101 A 160 kWh</b>	<b>0,273940</b>
<b>Consumo mensal SUPERIOR A 160 kWh</b>	<b>0,303500</b>
<b>Consumo mensal residencial</b>	<b>0,304360</b>

Tabela 2.3 – Alíquota de ICMS em função das Classes.

<b>Alíquotas de ICMS</b>	<b>Classes</b>
<b>30%</b>	<b>Residencial (+ de 50 kWh), comercial p. públ., serv. públ.</b>
<b>17%</b>	<b>Industrial</b>
<b>20%</b>	<b>Iluminação pública</b>
<b>7%</b>	<b>Residencial até 50 kWh</b>
<b>30%</b>	<b>Rural</b>

## **2.2 Gás Natural**

O gás natural é um combustível fóssil encontrado em rochas porosas no subsolo, podendo estar associado ou não ao petróleo. Sua formação resulta do acúmulo de energia solar sobre matérias orgânicas soterradas em grandes profundidades, do tempo pré-histórico, devido ao processo de acomodação da crosta terrestre.

O gás natural permanece no estado gasoso, sob pressão atmosférica e temperatura ambiente. Mais leve que o ar, o gás natural dissipa-se facilmente na atmosfera em caso de vazamento. Para que se inflame, é preciso que seja submetido a uma temperatura superior a 620°C. Além disso, é incolor e inodoro, queimando com uma chama quase imperceptível. Por questões de segurança, o GN comercializado é odorizado com enxofre. Além dos benefícios econômicos, o GN é um combustível não-poluente. Sua combustão é limpa, razão pela qual dispensa tratamento dos produtos lançados na atmosfera, apesar de, evidentemente, ser fonte de liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Sua composição pode variar dependendo do fato do gás estar associado ou não ao óleo, ou de ter sido ou não processado em unidades industriais. A composição básica inclui metano, etano, propano e hidrocarbonetos de maior peso molecular (em menores proporções). Normalmente apresenta baixos teores de dióxido de carbono, água, compostos de enxofre e nitrogênio.

No uso em residências, o gás natural é chamado de "gás domiciliar". É um mercado em franca expansão, especialmente nos grandes centros urbanos de todo o País. As companhias distribuidoras estaduais têm planos de grande ampliação de suas redes, e o aumento do consumo de gás domiciliar demanda investimentos expressivos em conversões e em recebimento e adaptações nas residências.

No uso em automóveis, ônibus e caminhões, o gás natural recebe o nome de "gás veicular", oferecendo vantagem no custo por quilômetro rodado. O gás natural não provoca resíduos de carbono nas partes internas do motor, o que, de um lado, aumenta a vida útil do

motor e o intervalo de troca de óleo e, do outro, reduz significativamente os custos de manutenção.

A Figura 2.1 apresenta a evolução dos preços do gás natural entre agosto de 2004 e janeiro de 2005 para três regiões do país, indicando uma tendência de aumento dos preços nas regiões sul e nordeste e estabilidade na região sudeste.

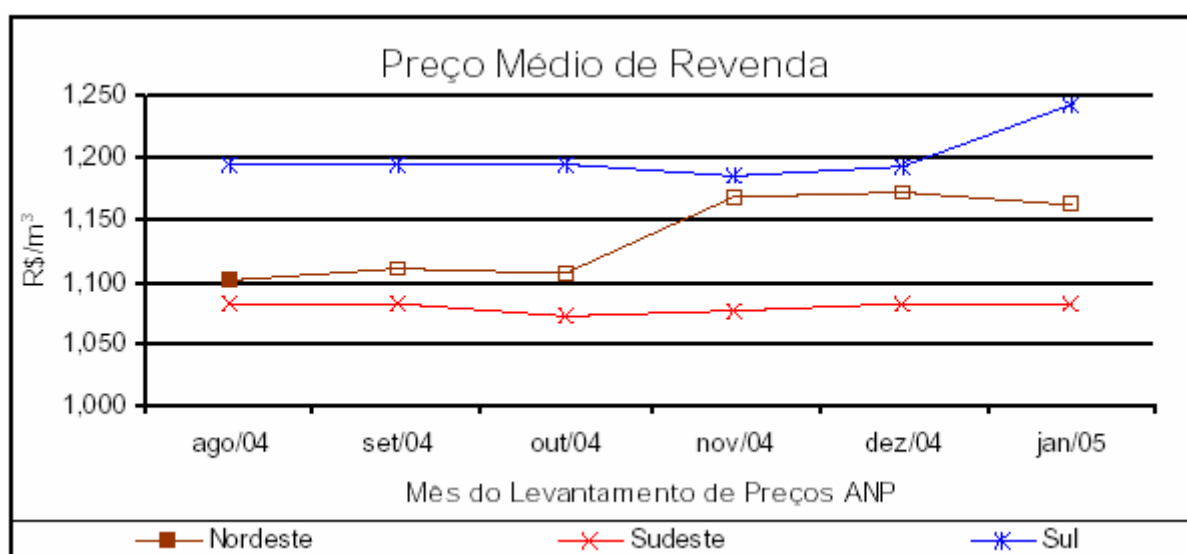


Figura 2.1 – Preço médio de revenda de Gás Natural. ANP, 2005.

São inúmeras as vantagens econômicas do uso do gás natural, mas sua maior contribuição está ligada diretamente na melhoria dos padrões ambientais quando comparado com outros combustíveis. O uso do GN em substituição ao carvão ou óleo combustível assegura a melhoria da qualidade do ar que se respira, baixando os índices de poluição e, conseqüentemente, de doenças respiratórias. Numa época em que as atenções estão cada vez mais voltadas para o meio ambiente, o gás natural apresenta-se como uma boa alternativa energética de hoje - um combustível versátil, econômico e menos poluente que a maioria dos outros, que será disponibilizado em escala compatível com a demanda nacional.

### 2.2.1 Gás Associado

É aquele que, no reservatório, está dissolvido no óleo ou sob a forma de capa de gás. Neste caso, a produção de gás é determinada diretamente pela produção do óleo. Caso não haja condições econômicas para a extração, o gás natural é reinjetado na jazida ou queimado, a fim de evitar o acúmulo de gases combustíveis próximos aos poços de petróleo. O gás natural não

associado é mais interessante do ponto de vista econômico, devido ao grande acúmulo de propano e de hidrocarbonetos mais pesados.

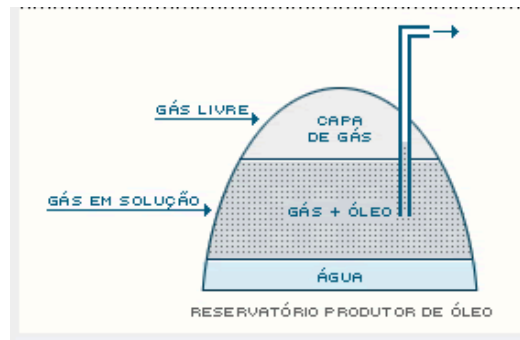


Figura 2.2 - Reservatório produtor de óleo e gás associado. (COMPET, 2004)

### 2.2.2 Gás Não Associado

É aquele que, no reservatório, está livre ou junto a pequenas quantidades de óleo. Neste caso, só se justifica comercialmente produzir o gás. As maiores ocorrências de gás natural no mundo são de gás não associado.

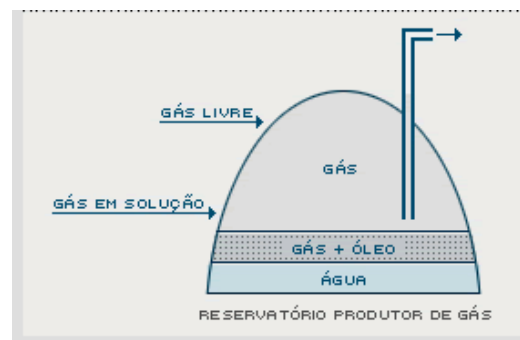


Figura 2.3 - Reservatório produtor de gás não-associado. (COMPET, 2004)

### 2.3 Gás Liquefeito de Petróleo

O GLP - gás liquefeito de petróleo - pode ser separado das frações mais leves de petróleo ou das mais pesadas de gás natural. À pressão atmosférica e temperaturas normalmente encontradas no ambiente é um produto gasoso, inflamável, inodoro e asfixiante, quando aspirado em altas concentrações. À temperatura ambiente, mas submetido à pressão na faixa de 0,3 a 1,5 MPa, o GLP se apresenta na forma líquida. Deste fato resultam o seu nome - gás liquefeito de petróleo - e a sua grande aplicabilidade como combustível, devido à facilidade de

armazenamento e transporte do líquido de GLP, a partir do seu engarrafamento em vasilhames. Para que os vazamentos de gás sejam facilmente identificados, compostos a base de enxofre são adicionados, apenas para lhe dar um odor característico, sem lhe atribuir características corrosivas.

O GLP consumido no País provém em sua maior parte do refino do petróleo. É um derivado composto da mistura de hidrocarbonetos com 3 e 4 átomos de carbono com ligação simples, denominados de propano e butano. Ligações duplas, propeno e buteno, também ocorrem com frequência, principalmente na corrente de GLP proveniente das refinarias. Constituintes mais leves, como etano, e mais pesados como pentanos, são admitidos desde que a pressão de vapor a 37,8 °C não ultrapasse o valor de 1,5 MPa ( o que limita a quantidade de leves) e o ponto de ebulição de 95% do volume de gás, a 0,1 MPa, não ultrapasse o valor de 2°C (característica conhecida como intemperismo, o que limita a quantidade de pesados). A quantidade de enxofre é limitada em 0,36 g/m<sup>3</sup>, o que normalmente só é obtido em refinarias após a corrente de gás passar por tratamento específico.

A primeira etapa do processo de refino é a destilação atmosférica. Nela o petróleo é aquecido e fracionado em uma torre, de onde são extraídos, por ordem crescente de densidade, gases combustíveis, GLP, gasolina, nafta, solventes e querosenes, óleo diesel e um óleo pesado, chamado de resíduo atmosférico, extraído pelo fundo da torre. Em seguida este resíduo é reaquecido e enviado para uma outra torre onde o fracionamento se dá a uma pressão abaixo da atmosférica, sendo então extraída mais uma parcela de óleo diesel e um produto chamado genericamente de gasóleo. O resíduo de fundo desta destilação, chamada a vácuo, pode ser especificado como óleo combustível ou asfalto, ou até mesmo servir como carga de outras unidades mais complexas de refinação, sempre com o objetivo de se produzir produtos mais nobres do que a matéria-prima que os gerou.

O gasóleo, por exemplo, serve como matéria-prima para o processo de craqueamento catalítico, onde altas temperaturas conjugadas à presença de catalisadores químicos partem as moléculas, transformando-o em gases combustíveis, GLP, gasolina e outros produtos. Esta unidade de craqueamento catalítico fluído, conhecida como FCC, é a grande geradora de GLP produzido nas refinarias brasileiras. Após tratamento para remoção de enxofre e compressão dos gases, a parte que se liquêfaz à temperatura ambiente é armazenada em esferas e denominada gás liquefeito de petróleo, GLP.

Outro processo de onde é extraída parte do GLP consumido no País é o que ocorre nas Unidades de Processamento de Gás Natural, UPGN, nas quais as frações mais pesadas do gás são separadas da corrente, produzindo GLP e um derivado na faixa da gasolina. De cada

barril de petróleo a refinar, o rendimento em derivados varia de acordo com o tipo de petróleo, as condições operacionais e, por último, com os processos utilizados. Por exemplo, petróleos mais leves geram maior quantidade de derivados leves, como gases combustíveis, GLP e gasolina. Petróleos pesados geram mais óleo combustível ou asfalto.

De qualquer forma existe uma limitação na quantidade de GLP produzida a partir da refinação do petróleo. Atualmente, com a gama de tipos de petróleo processados e as unidades em operação nas refinarias brasileiras, aproximadamente 9% do petróleo refinado é transformado em GLP. Em 1997, as unidades em operação nas refinarias, somadas com as UPGN, produziram uma média mensal de cerca de 325.000 toneladas (t) de GLP, o que fica muito aquém da demanda média brasileira de aproximadamente 525.000 t/mês. A diferença, em torno de 40% do consumo, é completada a partir de GLP importado. Daí a importância da existência de projetos de racionalização do uso deste combustível.

A opção de se aumentar a oferta de GLP simplesmente a partir do aumento da capacidade de refino não revela-se a mais atraente do ponto de vista de custos, uma vez que o aumento de 60% da capacidade de refino, necessário para atender o mercado, acarretaria uma sobra considerável de outros combustíveis, principalmente gasolina e óleo combustível, e a conseqüente dificuldade de comercializá-los a preços atrativos. Desta forma, a menos que aconteça um rearranjo do perfil de consumo de derivados no País, a importação de GLP se fará presente ainda por muito tempo.

GLP é comercializado no País em quase sua totalidade como uma mistura de gases na faixa de hidrocarbonetos com 3 e 4 átomos de carbono. No entanto também estão disponíveis no mercado os principais componentes do mesmo em graus de pureza variados, quais sejam: Propano Especial com concentração mínima de 90% em volume de propano e máxima de 5% de propeno; Propano Comercial com concentração típica de 90% em volume de propano; Butano Comercial com concentração típica de 90% em volume de butano.

Os consumos de propano e butano respondem atualmente por menos de 1% da demanda total dos gases na faixa do GLP. As aplicações típicas destes gases (fornecidos desodorizados) são para pressurização de aerossóis, em substituição ao CFC que agride a camada de ozônio da atmosfera e no caso do propano especial como combustível para corte e tratamento térmico de metais.

O GLP é largamente conhecido como "gás de cozinha", devido à sua principal aplicação como gás para cocção de alimentos, estimada em mais de 90% da demanda brasileira. Outras aplicações comumente encontradas são as de combustível industrial em fábricas e como combustível de empilhadeiras, utilizadas em ambientes fechados.



A forma de comercialização mais comum é a de engarrafamento em botijões de 13 kg de gás. Estima-se que existam mais de 70 milhões de vasilhames deste tipo em circulação pelo País. Cilindros de 45 kg de gás também são largamente comercializados, principalmente para estabelecimentos comerciais. Recipientes com capacidades diferentes também podem ser encontrados, mas em número muito menor. Em ambos, quando cheios, a pressão fica em torno de 1,5 MPa. A essa pressão e à temperatura ambiente, 85% do seu volume está no estado líquido e 15 % no estado vapor.

A Figura 2.4 apresenta a evolução dos preços do gás liquefeito de petróleo no período de agosto de 2004 a janeiro de 2005 nas cinco regiões do Brasil, indicando uma tendência de aumento de preços nas regiões sul e sudeste e baixa de preços nas demais regiões. O botijão de gás de 13 kg é comercializado em um valor aproximado de R\$ 32,00 na região sul.

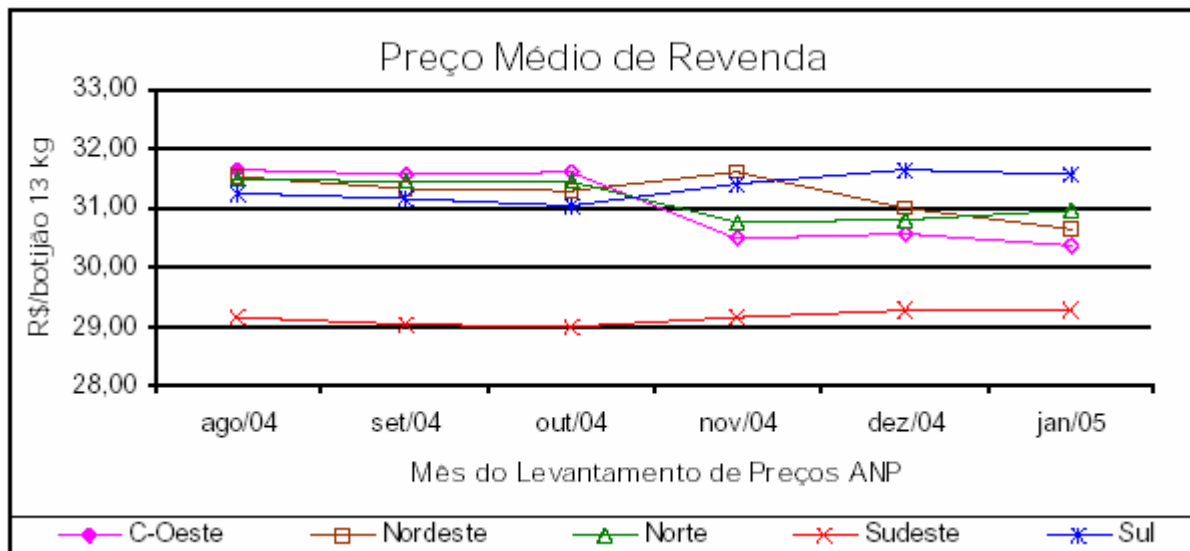


Figura 2.4 – Preço médio de revenda de Gás Liquefeito de petróleo. ANP, 2005.

O Governo Brasileiro faz uma política social de apoio à população mais pobre, subsidiando o GLP para uso doméstico através de uma parcela embutida no preço de outros combustíveis, principalmente da gasolina. Devido a isto, o GLP tem uma penetração muito grande em todo o País, substituindo até mesmo parte da lenha para cocção de alimentos na zona rural. Por outro lado, preços baixos acarretam a utilização indevida deste combustível, em veículos e utilitários leves. Estas aplicações são ilegais e muitas vezes perigosas, devido às improvisações e à falta de regulamentação nos equipamentos que dele se utilizam.

A Tabela 2.4 apresenta um quadro comparativo das principais características dos gases (GN e GLP), evidenciando as diferenças de poder calorífico, densidade e pressões de armazenamento.

Tabela 2.4 – Comparações entre GN e GLP. (CONPET, 2004)

	GN	GLP	GÁS DE RUA	GÁS DE REFINARIA
ORIGEM	RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO E DE GÁS NÃO ASSOCIADO	DESTILAÇÃO DE PETRÓLEO E PROCESSAMENTO DE GÁS NATURAL	REFORMA TERMO-CATALÍTICA DE GÁS NATURAL OU DE NAFTA PETROQUÍMICA	<b>PROCESSOS DE REFINO DE PETRÓLEO (CRAQ. CATALÍTICO, DESTILAÇÃO, REFORMA E COQUEAMENTO RETARDADO)</b>
PESO MOLECULAR	17 A 21	44 A 56	16	<b>24</b>
PODER CALORÍFICO SUPERIOR (kJ/m <sup>3</sup> )	RICO: 45627 PROCESSADO:38930	100464 A 133792	18000	<b>41860</b>
DENSIDADE (kg/m <sup>3</sup> )	0,58 A 0,72	1,5 A 2,0	0,55	<b>0,82</b>
PRINCIPAIS COMPONENTES	METANO E ETANO	PROPANO E BUTANO	HIDROGÊNIO, METANO, NITROGÊNIO, MONÓXIDO E DIÓXIDO DE CARBONO	<b>HIDROGÊNIO, NITROGÊNIO, METANO E ETANO</b>
PRINCIPAIS UTILIZAÇÕES	RESIDENCIAL, COMERCIAL, AUTOMOTIVO E GERAÇÃO TERMELÉTRICA. INDUSTRIAL, PETROQUÍMICA E SIDERÚRGICA	INDUSTRIAL, RESIDENCIAL E COMERCIAL	RESIDENCIAL E COMERCIAL	<b>INDUSTRIAL, PETROQUÍMICA</b>
PRESSÃO DE ARMAZENAMENTO	200 ATM	15 ATM	-	-

Nesta tese será trabalhado com gás GLP por não haver canalização de gás natural instalada nas proximidades da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por ser muito complicado o processo de aquisição/transporte/instalação de gás natural veicular (GNV) em cilindros e por seu elevado custo (aproximadamente 28 R\$/m<sup>3</sup>) quando comprado a granel de empresas de comercialização de gases. Os aquecedores a gás utilizados nos ensaios experimentais poderiam utilizar gás natural mediante aumento na regulação da vazão do gás, por apresentar menor poder calorífico superior e menor densidade que o gás GLP.

## **2.4 Energia Solar**

O Sol é a estrela mais próxima da Terra. A sua estrutura e características determinam a natureza da energia irradiada no espaço. É constituído por matéria gasosa, principalmente hidrogênio, possui uma temperatura efetiva de corpo negro de aproximadamente 5777 K. Emite radiação eletromagnética entre os comprimentos de onda de 0,2 e 25  $\mu\text{m}$ , estando a faixa do visível localizada entre 0,38 e 0,78  $\mu\text{m}$ . A intensidade da radiação varia com o comprimento de onda e atinge 95% do total da energia solar dentro do intervalo de 0,3 a 2,12  $\mu\text{m}$ .

A energia recebida, por unidade de tempo, em uma área unitária perpendicular à direção de propagação da radiação e medida na distância média entre o Sol e a Terra, fora da atmosfera, é chamada de constante solar e assume o valor de 1367  $\text{W}/\text{m}^2$ , segundo Duffie (1991).

A radiação que incide em um determinado ponto na superfície da terra é inferior a constante solar, pois ao atravessar a atmosfera parte desta radiação é absorvida e ou refletida (causando espalhamento da radiação, dispersão) pelos constituintes da atmosfera, tais como poeira, vapor d'água, ar e aerossóis.

Para calcular a radiação solar que atinge uma superfície horizontal na Terra, é necessário estabelecer algumas relações geométricas entre a posição do Sol no céu e as coordenadas desta superfície na Terra, conforme apresentado em Duffie (1991).

## **2.5 Componentes de Sistemas de Aquecimento de Água com Energia Solar**

Os sistemas de aquecimento de água com energia solar são constituídos por coletores solares, reservatórios térmicos, reservatórios de água, fonte auxiliar de energia e tubulação.

### **2.5.1 Coletores Solares**

O cientista Horace-Bénédict de Saussure é o responsável pela analogia entre o envidraçamento de uma estufa e a atmosfera terrestre. Em 1780 ele realizou uma demonstração experimental, que posteriormente foi citada por Fourier e Pouillet, com o objetivo de mostrar o efeito da energia solar sobre o ar em função da altitude. Construiu um dispositivo composto por cinco caixas de vidro, encaixadas umas nas outras e equipadas de termômetros. O objetivo era mostrar o efeito da radiação solar sobre a temperatura do ar contido nas caixas transparentes. Realizou ensaios nos cumes de montanhas e nos vales. O seu helio-termômetro está na origem

dos coletores solares e conseqüentemente da tecnologia solar alternativa, descrita pelo físico André Mouchot (1825-1912) em “Chaleur solaire et ses applications”.

O coletor solar é um equipamento que capta a energia irradiada pelo Sol e converte esta energia em calor útil. É um tipo especial de trocador de calor, pois a maioria dos trocadores de calor realiza a transferência de calor de fluido para fluido, com alta taxa de transferência, pouco importando a parcela radiante. Já no coletor solar a transferência de energia ocorre entre uma distante fonte de energia radiante e um fluido.

Existem dois tipos de coletores, os coletores de concentração e os coletores planos. O coletor de concentração é utilizado para atingir temperaturas mais elevadas, seu princípio de funcionamento baseia-se em focalizar a energia radiante para um absorvedor, utilizando uma lente de Fresnel ou um espelho parabólico. Estes coletores conseguem atingir temperaturas elevadas, pois concentram a energia proveniente do Sol no absorvedor que apresenta uma área reduzida o que diminui as perdas térmicas. Para que a energia radiante seja focalizada no absorvedor é necessário que os coletores acompanhem o movimento aparente do sol, requerendo um dispositivo motorizado de rastreamento do sol. Este dispositivo é caro, complexo e exige manutenção.

Coletores solares planos são geralmente utilizados em aplicações que requerem um fornecimento baixo de energia para atingir temperaturas inferiores a 100°C. São considerados equipamentos simples do ponto de vista de fabricação e quase não requerem manutenção, por não apresentarem partes móveis. A placa absorvedora é a própria superfície que recebe radiação. É constituído por uma placa absorvedora, tubulação por onde escoar o fluido que irá trocar calor, cobertura transparente e isolamento térmico.

Quando a radiação incide no coletor, boa parte da mesma atravessa a cobertura, uma parte menor é refletida e outra é absorvida pela cobertura. A maior parte da fração que atravessou a cobertura é absorvida pela placa absorvedora, de cor preta e de material bom condutor de calor, esta emite radiação em uma faixa de comprimentos de onda maiores que a da radiação incidente, devido a baixa temperatura em que se encontra. Para esta faixa de comprimentos de onda a cobertura, geralmente vidro, é opaca e não deixa passar a energia radiante. A cobertura então absorve esta energia e emite novamente, causando efeito estufa. A energia absorvida pela placa é removida pelo fluido que escoar no interior dos tubos, que estão em contato térmico com a placa absorvedora. O fluido, geralmente água (no Brasil), circula por termossifão até um reservatório térmico, onde a energia será armazenada.

O coletor plano apresenta uma série de vantagens sobre os coletores de concentração, tais como:

- Simplicidade de construção;
- Relativo baixo custo;
- Baixa manutenção;
- Facilidade de operação em dias nublados;
- Alta durabilidade

Zilles (1987) realizou ensaios experimentais, no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, comparando testes de coletores solares planos, através da determinação da eficiência térmica instantânea em regime quase permanente. Foram comparados os resultados dos ensaios realizados com simulador solar e com radiação solar. Os ensaios realizados com radiação solar utilizaram a mesma bancada de testes, Aquaterm ws83, que a utilizada para determinar a eficiência térmica instantânea dos coletores utilizados nesta tese. O método de determinação da eficiência instantânea assim como outras normas internacionais são apresentadas. Os resultados permitiram obter uma correlação entre os ensaios “indoor” com os “outdoors”. A utilização do método “indoor” para efetuar testes em coletores, permite o levantamento dos pontos nas condições prescritas na norma, em apenas 8 horas, tornando-se rápida a caracterização do coletor.

Marroquin (1989) efetuou ensaios experimentais de diversos tipos de coletores, variando parâmetros de geometria e materiais. Com o resultado destes testes experimentais validou um programa de computador desenvolvido por ele para determinar a eficiência instantânea de coletores em função de materiais. Utilizou diversos materiais tais como: cobre, alumínio, ferro em diversas espessuras, variou a quantidade de tubos assim como o espaçamento entre eles com o intuito de determinar a melhor relação de custo/benefício dos coletores. O programa calcula a curva da eficiência térmica instantânea dos coletores utilizando a teoria de Hottel, Whillier e Bliss mencionada por Duffie e Beckman (1991) e fornece uma relação de custo/benefício. É alimentado por dados de geometria do coletor e características dos materiais utilizados.

Mveh (1999) realizou testes experimentais de coletores solares sem cobertura analisando a influência do vento sobre a eficiência dos mesmos. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Energia Solar da UFRGS utilizando a mesma bancada de teste utilizada por Zilles, Marroquin e nesta tese. Também se efetuou a comparação entre os resultados experimentais e os teóricos, obtidos seguindo-se os modelos matemáticos propostos por Sharples e Charlesworth (1998). Os resultados desta comparação mostraram-se bastante satisfatórios. Verificou-se, como era esperado, que a ação do vento sobre coletores solares sem cobertura

diminui a eficiência dos mesmos e que não exerce tanta influência quando o coletor possui cobertura de vidro.

Costa (2002) investigou os limites de aplicabilidade de coletores sem cobertura para aquecimento de água doméstica, utilizando um procedimento de cálculo do comportamento térmico do sistema para dias típicos em cidades de diferentes climas. Utilizando a bancada Aquaterm ws 83 caracterizou o coletor em estudo (sem cobertura) obtendo a curva de eficiência térmica instantânea do mesmo, para duas faixas de velocidade de vento. Efetuou simulações com os dados do coletor em diversas cidades e comparou os resultados obtidos com coletores com cobertura. Concluiu que a utilização de coletores solares sem cobertura é interessante em localidades cuja temperatura média seja superior a 20° C, pois a ação do vento sobre os coletores sem cobertura, em temperaturas inferiores a indicada, aumentam demasiadamente as perdas térmicas.

### **2.5.2 Reservatórios Térmicos**

Uma limitação do uso de energia solar para aquecimento de água para banho é a defasagem entre a disponibilidade da energia e a hora do consumo. Devido a esse fato torna-se necessária a utilização de um reservatório de armazenamento isolado termicamente, o que diminui a eficiência do sistema.

Os reservatórios podem ser de dois tipos: os fechados ou pressurizados e os reservatórios abertos ou não pressurizados. Os reservatórios fechados trabalham sob pressão acima da atmosférica, geralmente pressurizados por uma caixa de água mais elevada, que proporciona a alimentação do sistema. Já os reservatórios abertos trabalham nivelados com outra caixa d'água ou, por um sistema de bóia, recebem alimentação de outra caixa em nível superior ou diretamente da rua. Os reservatórios abertos trabalham sempre em pressão atmosférica independente da forma de alimentação. Os reservatórios utilizados nesta tese são do tipo aberto com alimentação por uma caixa d'água nivelada com o reservatório.

ASHRAE (1996) afirma que “o projeto e seleção do equipamento de armazenamento é um dos elementos mais negligenciados nos sistemas de energia solar”, além de recomendar o uso de reservatórios na vertical, pois dessa forma propicia a estratificação térmica.

Muitos autores recomendam que seja utilizado um reservatório de volume proporcional à área de coletores solares utilizada. Esta proporção está entre 50 e 100 litros por metro quadrado de coletor. Neste trabalho esta proporção é ultrapassada utilizando-se uma relação de 330 litros por metro quadrado de coletor. A relação entre 50 e 100 l/m<sup>2</sup> foi estipulada

com base numa metodologia de dimensionamento que utiliza energia elétrica como fonte de energia auxiliar. Na metodologia proposta, utiliza-se gás e, devido ao seu relativo baixo custo, aumenta-se a parcela em que o gás contribui para o aquecimento da água do sistema.

Segundo Krenzinger (2002), em sistemas de aquecimento solar é usual utilizar um reservatório com um volume de aproximadamente o dobro do volume de água quente a ser consumido em um dia. Nesta hipótese está incluída uma temperatura relativamente alta (em torno de 60 a 70°C).

No modelo proposto neste trabalho o volume deve ser maior para trabalhar com temperaturas médias mais baixas. Uma análise simples demonstra que reservatórios maiores são energeticamente mais favoráveis, relativamente, que reservatórios menores, levando em conta que a área aumenta com o tamanho do reservatório, mas o volume aumenta proporcionalmente mais (área aumenta com o quadrado e volume com o cubo da dimensão).

Considere-se um reservatório cilíndrico vertical isolado, com um coeficiente de transferência de calor  $U$  independente da superfície analisada (topo, fundo e lateral tem o mesmo coeficiente) e com raio  $R$  e altura  $H$ . A área é calculada como  $A=(2\pi R^2+2\pi RH)$  e considerando  $T_q$  a temperatura da água interna (uniforme) e  $T_a$  a temperatura exterior, o fluxo de calor total pelas paredes do reservatório seria  $q=UA(T_q-T_a)$ . Por outro lado usando a temperatura ambiente como referência, verifica-se que a energia armazenada pode ser expressa pela equação 2.1:

$$Q_a = V \rho c_p (T_q - T_a) \quad (2.1)$$

onde  $V$  é o volume ( $\pi R^2 H$ ),  $\rho$  é a massa específica da água na temperatura  $T_q$ ,  $c_p$  é o calor específico da água na temperatura  $T_q$ . Logo, pode-se definir  $M=Q_a/q$  como uma figura de mérito diretamente proporcional à qualidade proporcionada pela forma do acumulador. Quanto maior  $M$  tanto melhor seria o reservatório.

Fixando a razão de aspecto do reservatório de forma que  $H=3R$ , pode-se verificar que:

$$M = \frac{3 \rho c_p R}{8U} \quad (2.2)$$

indicando a vantagem de reservatórios maiores. Para manter a quantidade de calor e ainda aumentar o volume, a temperatura de acumulação seria mais baixa. Este valor de temperatura,

entretanto não pode baixar de um valor mínimo (45°C) sob pena de não atender à qualidade da demanda.

Segundo Shah et al (2003), a estratificação térmica em sistemas de aquecimento de água com energia solar que utilizam acumulação (a grande maioria), é o fator de maior influência na eficiência destes sistemas. Dependendo da geometria do reservatório (altura principalmente) e das vazões de entrada e saída dos reservatórios pode ocorrer a desestratificação térmica. O autor sugere a utilização de difusores nas entradas e saídas dos reservatórios assim como vazões baixas para evitar a formação de jatos que são capazes de provocar a homogeneização da temperatura no interior dos reservatórios.

A água apresenta um coeficiente de condução de calor igual a 0,634 W/m K na temperatura de 42°C (temperatura média dos reservatórios utilizados neste trabalho), segundo a Tabela 2.5, pode-se observar que apenas o ar e o poliestireno expandido, que são isolantes térmicos, apresentam condutividade inferior a água.

Tabela 2.5 – Propriedades termofísicas de alguns materiais a 30°C, Incropera (1998).

Material	Calor Específico (kJ/kg°C)	Condutividade térmica (W/m°C)	Difusividade (m <sup>2</sup> /s)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
Água	4,178	0,620	1,5 . 10 <sup>-4</sup>	995
Aço inox	0,480	15,1	3,91 . 10 <sup>-6</sup>	8055
Cobre	0,385	401	1,17 . 10 <sup>-4</sup>	8933
Ar	1,007	0,0263	2,25 . 10 <sup>-5</sup>	1,1614
Vidro	0,750	1,4	7,46 . 10 <sup>-4</sup>	2500
Poliestireno expandido	1,210	0,035	4,05 . 10 <sup>-4</sup>	55

Em sistemas de aquecimento de água com energia solar a captação de água geralmente se dá pela parte inferior e o retorno mais quente se dá pela parte superior. Havendo uma certa distância entre o ponto inferior e o superior estabelece-se uma diferença de temperaturas ao longo das alturas, a este fenômeno chama-se estratificação de temperaturas.

Oliveski (2000) desenvolveu um ensaio experimental dos campos de temperatura e velocidade em armazenadores térmicos via calor sensível. Utilizou um reservatório cilíndrico vertical de aço inoxidável, com razão de aspecto (H/D) de 1,4. A construção do modelo experimental serviu de base para validar um modelo numérico desenvolvido no Laboratório de



Energia Solar da UFRGS. Os ensaios levaram em consideração a importância que a convecção exerce no campo de temperatura no interior do reservatório, portanto o reservatório foi submetido a duas condições de operação: fechada e aberta. Na primeira o reservatório estava desconectado do resto do sistema e, na segunda, o reservatório estava sujeito a entrada e saída de água pelo seu topo e base, respectivamente.

A abordagem numérica foi executada utilizando-se um modelo bidimensional transiente e subrotinas previamente elaboradas por Patankar (1980), modificadas a fim de resolver o transiente não linear requerido. Os resultados experimentais validaram, em duas fases, o modelo numérico desenvolvido. Após a validação simulou-se o resfriamento de acumuladores térmicos com diversas características construtivas. Estas características foram variadas através da razão de aspecto, das perdas térmicas para o ambiente e do volume do reservatório. Os resultados destas simulações serviram para analisar a formação do perfil térmico no interior do reservatório, assim como as causas que contribuem para a degradação da estratificação térmica.

Siqueira (2003) desenvolveu um programa de simulação computacional de sistemas de aquecimento solar para água que foi validado pela caracterização experimental de cada componente que compõe o sistema. O reservatório térmico foi modelado com estratificação térmica, convecção e condução entre as camadas. Este programa, Termosim, que já estava em desenvolvimento em 2001, serviu de base para o desenvolvimento do programa AQUESOLGÁS utilizado nesta tese.

Existem várias formas de conectar os coletores solares ao reservatório, a mais usual é a de conectar a saída para os coletores no fundo do reservatório e o retorno no topo do mesmo. Já para a fonte auxiliar de energia é comum a utilização de resistências elétricas ou trocadores de calor localizados no fundo dos reservatórios. Os dois trabalhos citados não estudam a influência que as alturas de conexão exercem sobre o perfil de temperaturas no interior do reservatório, ocasionado pelas diversas alturas de conexão possíveis dos sistemas de aquecimento ao reservatório.

Hussein (2002) sugeriu uma nova proposta para as equações que reproduzem o comportamento do reservatório térmico e das tubulações hidráulicas da conexão. Estas equações surgiram após um estudo teórico e experimental de um sistema de aquecimento de água com energia solar operando por termossifão. Esta nova proposta foi modificada por Krenzinger et al (2003) e é utilizada neste trabalho.

### **2.5.3 Fonte de Energia Auxiliar**

Sistemas de aquecimento de água com energia solar necessitam de uma fonte de energia auxiliar para suprir a demanda de energia em períodos prolongados de baixa ou nenhuma radiação solar. Esta fonte de energia pode ser elétrica, gás ou gerada por uma bomba de calor. O aquecimento pode ser localizado internamente ao reservatório ou externamente. Quando externo, pode ser de acumulação ou de passagem. No presente trabalho optou-se por uma fonte de energia auxiliar a gás de passagem.

Os métodos de dimensionamento, como “F-Chart”, consagrados através de livros como o de Duffie e Beckman (1991), sugerem que a fração solar anual (razão entre a energia térmica fornecida pela conversão da energia solar e a energia térmica total) seja de 75%. Fish, Guigas e Dalemback (1998) também sugerem que o sistema de aquecimento de água com energia solar deve atender entre 50 e 70% da demanda global de aquecimento.

Normalmente se busca uma fração solar anual elevada devido ao alto custo da energia de apoio, como a eletricidade. No caso do apoio a gás, no entanto, a situação fica alterada tendo em vista o menor custo do combustível. Um sistema com energia de apoio a gás permite um dimensionamento que busque não desperdiçar a energia fornecida pelos coletores solares, adotando uma menor fração solar. O resultado pode ser mais adequado, já que há a combinação de um menor investimento inicial (menos coletores) com um aproveitamento mais abrangente dos mesmos (menor desperdício).

## **2.6 Configurações dos Sistemas de Aquecimento de Água com Energia Solar**

A circulação de água nos circuitos hidráulicos entre os coletores e o reservatório pode ser realizada de forma natural (termossifão) ou por um sistema de bombeamento (forçada). A água aquecida fica com massa específica mais baixa e ocupa posições mais elevadas no circuito hidráulico, este gradiente de temperaturas e conseqüente gradiente de massas específicas causam uma circulação natural através dos coletores que é chamada de circulação por termossifão. Quando a circulação se dá por termossifão, o sistema é classificado como passivo e quando a circulação se dá por bombeamento, é classificado como ativo. A água para consumo pode ser aquecida diretamente pelo coletor ou pode-se utilizar um fluido refrigerante no circuito do coletor e um trocador de calor no reservatório para aquecer a água de consumo. Neste caso diz-se que o aquecimento é de forma indireta.

Pode-se obter na combinação destas classificações quatro configurações distintas:

- Sistema passivo direto (utilizado no trabalho)
- Sistema passivo indireto
- Sistema ativo direto
- Sistema ativo indireto

### 2.6.1 Sistema Passivo Direto

O sistema passivo direto é o mais utilizado no Brasil devido a sua simplicidade. O sistema pode apresentar variação quanto à posição da fonte de energia auxiliar. O sistema passivo direto mais utilizado é o apresentado na Figura 2.5(a) o qual utiliza uma resistência elétrica no interior do reservatório térmico. A Figura 2.5(b) utiliza uma fonte de energia auxiliar ligada em série com o reservatório na tubulação de consumo. Geralmente utiliza-se um aquecedor de passagem elétrico embora um aquecedor de passagem a gás também possa ser utilizado, apesar de exigir um controle de temperatura mais sofisticado. A Figura 2.5(c) representa a forma de conexão utilizada neste trabalho onde a fonte de energia auxiliar é instalada externamente, no caso desta Tese é utilizado um aquecedor a gás de passagem.

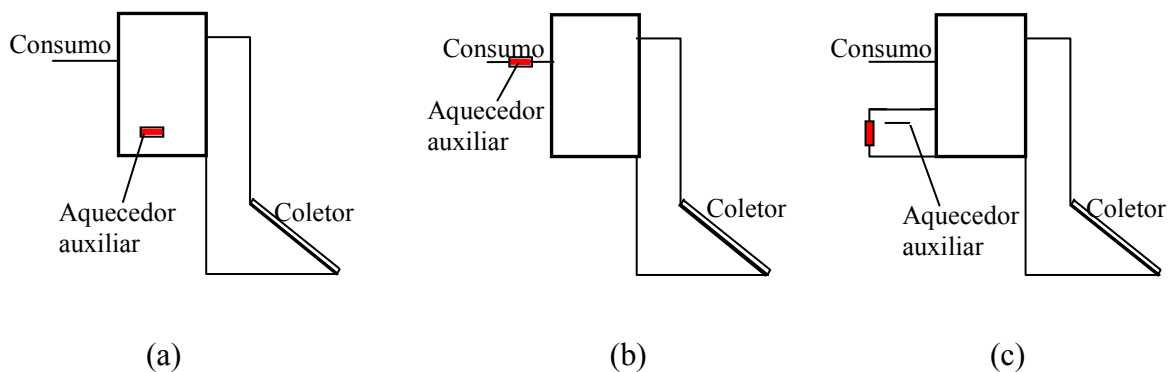


Figura 2.5 (a), (b) e (c) – Representação esquemática da localização da fonte auxiliar de energia em sistemas passivos diretos.

### 2.6.2 Sistema Passivo Indireto

A principal razão para o uso de sistemas indiretos é a proteção ao congelamento segundo Hudson e Markell (1985). O etileno-glicol juntamente com o propileno-glicol são os fluidos refrigerantes mais utilizados, podendo variar o percentual de diluição em função do clima do local. A Figura 2.6 (a), (b) e (c) mostram, de forma análoga à Figura 2.5, a localização da

fonte de energia auxiliar, porém neste caso a diferença está na inserção de um trocador de calor conectado em circuito fechado com o coletor solar.

Os sistemas de aquecimento em estudo nesta tese diferenciam-se dos sistemas apresentados na Figura 2.6, pois utilizam um aquecedor a gás de passagem que também efetua, quando acionado, o deslocamento de camadas de água do reservatório. Isto não ocorre nos modelos apresentados na figura.

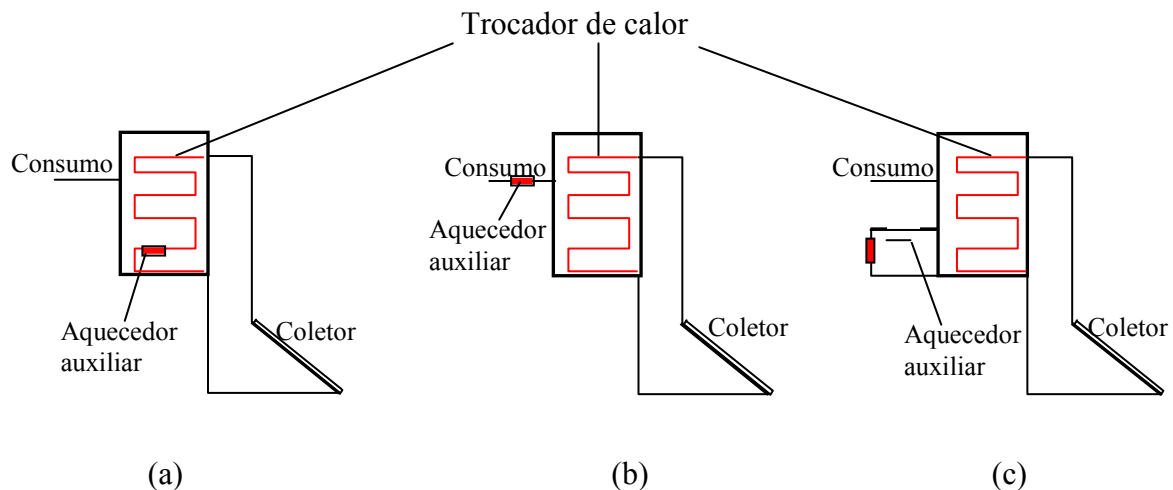


Figura 2.6 (a), (b) e (c) – Representação esquemática da localização da fonte auxiliar de energia em sistemas passivos indiretos.

Martin et al (2004) apresenta um estudo sobre os impactos que traria a integração de aquecedores a gás de passagem utilizando água pré-aquecida, com energia solar. Salienta principalmente que tal medida implicaria em uma adequação dos materiais constituintes do aquecedor para suportarem altas temperaturas de entrada. Outra questão é a temperatura de consumo, que deve atender aos quesitos de consumo sem oferecer risco de queimaduras. Para resolver esta questão apresenta três soluções que variam em função do custo e da instalação, mas todas envolvem a instalação de um dispositivo eletrônico para misturar e ou desviar água monitorando a temperatura da mesma.

### 2.6.3 Sistema Ativo Direto

No sistema ativo a circulação da água é realizada utilizando-se uma motobomba, por isso a localização do reservatório pode assumir qualquer posição em relação aos coletores

solares. O acionamento da bomba é realizado por um controle termostático diferencial entre a entrada e saída dos coletores solares.

O sistema ativo permite a instalação de um sistema de aquecimento de água com energia solar em qualquer tipo de edificação, pois o reservatório pode ser instalado em qualquer lugar devido ao uso da motobomba. Entretanto os custos deste sistema superam os custos do passivo direto, pois requerem mais dispositivos para seu funcionamento, tais como bomba, sensores e controles diferenciais de temperatura.

#### **2.6.4 Sistema Ativo Indireto**

O sistema indireto ativo é utilizado em regiões onde o risco de congelamento da água nas tubulações é elevado.

### **2.7. Parâmetros de Projeto**

Embora sistemas de aquecimento de água com energia solar sejam sistemas relativamente simples, existem parâmetros de projeto que influenciam o seu desempenho. Entre eles pode-se citar:

- Temperatura de operação
- Perfil de consumo

#### **2.7.1 Temperatura de Operação**

A temperatura de operação é um parâmetro que determina o atendimento da temperatura de consumo exigida, visando o mínimo de perdas térmicas do sistema. A temperatura da água para banho é de aproximadamente 38°C e considerando as perdas térmicas na tubulação entre o ponto de consumo e o local do reservatório térmico deve-se elevar em pelo menos 5°C a temperatura de operação para garantir minimamente a qualidade da água de consumo. A maioria dos projetos utiliza uma temperatura de operação superior a 60 °C. Com esta elevação de temperatura consegue-se atender aos quesitos de qualidade da água para consumo, porém perde-se energia. Quanto mais alta é a temperatura maiores serão as perdas térmicas, obtidas através da equação 2.3.

$$Q_p = U (T_m - T_a) t \quad (2.3)$$

onde  $U$  é o coeficiente global de perdas ( $W/^\circ C$ ),  $T_m$  é a temperatura média da água no interior do reservatório ( $^\circ C$ ),  $T_a$  é a temperatura do ar ambiente e  $t$  é o intervalo de tempo em que ocorrem perdas.

Outro fator importante associado à temperatura de operação é o risco de contaminação por uma bactéria chamada *Legionella Pneumophila*. Esta bactéria é responsável pela transmissão da pneumonia pela inalação de ar contaminado ou de aerossóis formados na água do banho. Desenvolve-se na água em temperaturas entre 38 e 45  $^\circ C$  e sabe-se que não há presença de colônias de bactérias na água a 60 $^\circ C$ , Prado et Al (1998).

Neste trabalho adota-se uma temperatura de operação inferior a 60 $^\circ C$ , porém é favorecida a estratificação térmica, permitindo que as camadas superiores do reservatório (na altura do consumo) atinjam temperaturas superiores a 60 $^\circ C$ .

### 2.7.2 Perfil de Consumo

O perfil de consumo é representado pela seqüência de vazões de demanda de água quente ao longo do tempo. O perfil de consumo influencia a eficiência dos sistemas de aquecimento de água com energia solar e fonte auxiliar de energia, pois desloca camadas de água no interior do reservatório, tanto pela retirada de água quente através do consumo propriamente dito como pela reposição de água fria. Este deslocamento de camadas modifica a temperatura de entrada da água no coletor solar e esta afeta consideravelmente a eficiência dos coletores. Como será visto no capítulo três a eficiência de um coletor solar aumenta quando a temperatura da água de entrada diminui.

Gutierrez, Hincapie, Duffie e Beckman (1974), simularam sistemas de aquecimento de água com energia solar com circulação forçada, utilizando armazenamento estratificado. Um mês de dados meteorológicos foram utilizados para examinar o efeito de três tipos de aquecedores auxiliares e três diferentes tamanhos de reservatórios. Diversas distribuições de períodos e magnitudes de carga (consumo) foram estudadas. Devido a grande possibilidade de combinações, apenas a pior e a melhor situação foram selecionadas para o estudo. A pior e a melhor condição estão definidas em termos da fração da carga (consumo) fornecida pela energia auxiliar. A melhor situação requer o mínimo de energia auxiliar enquanto a pior requer o máximo.

Os autores afirmam que se as perdas térmicas do reservatório forem pequenas a diferença na eficiência também será pequena, ao escolher em qual hora o consumo irá ocorrer

(entre o fim do dia e a manhã do dia seguinte), para a pior condição. A configuração que apresentou uma eficiência superior é a que apresenta a resistência elétrica no interior do reservatório embora que quando o sistema pode fornecer energia para o consumo somente com energia solar esta superioridade tende a zero.

A hora menos favorável para efetuar consumo de água quente, segundo os autores, é justo antes dos coletores iniciarem a operar. A hora mais favorável para efetuar consumo é nas primeiras horas da tarde, quando a temperatura da água na entrada do coletor e conseqüentemente as perdas térmicas no coletor são máximas. O método de suprimento de energia auxiliar demonstrou ter pouca influência sobre a eficiência quando a temperatura de operação ajustada for baixa.

Shariah (1997), simulou dois sistemas de aquecimento de água com energia solar com circulação por termossifão e apoio com energia elétrica utilizando o programa TRNSYS. A fonte auxiliar localizou-se no interior do reservatório térmico para a primeira configuração e foi conectada em série com a tubulação de consumo para a segunda configuração. A simulação utilizou dados meteorológicos da Califórnia, duas diferentes temperaturas de consumo (60 e 80°C) e dois volumes de consumo (250 e 150 litros). Quatro tipos de perfis de consumo diário de água quente foram utilizados, denominados: “rand” (randômico), contínuo, tarde e manhã. Os resultados mostraram que se o consumo ocorre segundo o horário do perfil “rand”, o sistema opera com eficiência máxima quando a fonte de energia auxiliar está localizada no interior do reservatório (primeira configuração). Quando o sistema operou com os outros três perfis, entretanto, a melhor eficiência ocorreu quando a fonte de energia auxiliar encontrava-se localizada externamente ao reservatório (segunda configuração).

Lourenço Jr.(2000) adquiriu dados experimentais de um sistema de aquecimento de água com energia solar e gás, similar ao estudado neste trabalho. Diversos horários e quantidades de consumo de água foram aplicadas ao sistema ao longo de oito dias de ensaios. Os dados experimentais foram confrontados com dados simulados pelo programa TRNSYS, com resultados razoáveis mas que apresentam diferenças significativas nas seqüências de temperatura das camadas do reservatório

Vieira (2001) utilizou o programa TRNSYS para efetuar diversas simulações de sistemas de aquecimento de água com energia solar operando por termossifão visando atender o consumo de água de uma residência unifamiliar habitada por cinco pessoas. Verificou que diferentes perfis de consumo resultam em configurações distintas de sistemas para o mesmo consumo de energia auxiliar (eletricidade). Utilizou dois perfis de consumo diferenciados: distribuído ao longo do dia e concentrado no final da tarde. Sugeriu ainda a instalação de um

CLP (controlador lógico programável) para controlar o horário de acionamento da fonte de energia auxiliar. Demonstrou que utilizando o CLP pode-se obter uma economia de até 35% no consumo de energia auxiliar para perfil de consumo concentrado no final do dia.

Siqueira e Krenzinger (2003) apresentam o cálculo da eficiência diária em média mensal de um sistema de aquecimento de água com energia solar operando em regime de termossifão. Afirmam que a eficiência do sistema é uma função das condições meteorológicas, da qualidade do coletor e dos parâmetros de projeto que relacionam o volume do tanque, volume de demanda e área de coleta. Utilizaram um perfil de demanda fixo, da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG, 1987), cujo consumo ocorre: 30% entre 7 e 10hs e 70% entre 18 e 21hs.

## **2.8 Aspecto Econômico de Sistemas de Aquecimento de Água**

Segundo Shröder (1982), o dimensionamento de sistemas de aquecimento de água pode ser realizado por meio de três critérios econômicos, “Life cycle savings”, “Payback” e “Internal rate of return”. Goldemberg (1998), afirma que existem vários indicadores de mérito econômico que podem ser utilizados para medir o custo efetivo de investimentos de eficiência energética: o retorno do investimento simples, o custo da energia economizada, a taxa interna de retorno e o custo do ciclo de vida.

O retorno simples é a razão do investimento inicial para as economias do primeiro ano. O custo da energia economizada é um índice que permite uma comparação fácil entre os investimentos nas alternativas de eficiência da energia e suprimento da energia. O custo da energia economizada é o custo reembolsado anual para um empréstimo hipotético obtido para pagar o investimento na melhora da eficiência da energia, dividido pela economia energética esperada. A taxa interna de retorno é um enfoque alternativo para a economia da eficiência energética para tratar as opções alternativas como oportunidades de investimento e tentar garantir que o consumidor faça decisões econômicas da forma com que os investidores fazem. O custo do ciclo de vida é o valor total atual descontados todos os custos futuros associados com o fornecimento de um serviço energético particular em um período específico. O custo do ciclo de vida anualizado é o custo anualizado total com o fornecimento deste serviço energético: o custo operacional (principalmente combustível) mais o custo anualizado do investimento inicial, como definido pelo conceito do custo da energia economizada.

Stanford (1999) aponta as incertezas como sendo os inconvenientes para investir no uso de sistema de aquecimento de água com energia solar. Estas aparecem de várias formas como: (a) na descontinuidade e na estocasticidade do fluxo solar; (b) na necessidade de



armazenamento; (c) no fato de que o não uso da instalação, por um eventual comprador, não significa poupança, de forma que a fonte tem que ser utilizada ao máximo para otimizar o retorno; (d) no investimento que é muito arriscado, pois depende da dinâmica de outros mercados como preços futuros e poupança da energia convencional; (e) na baixa liquidez, ou seja, o capital de uma instalação solar não é maleável; e finalmente (f) no longo tempo de retorno, que faz com que o comprador fique sujeito a incertezas inevitáveis e preso a uma tecnologia que pode ser ultrapassada a qualquer instante.

Afirma também que o tempo de retorno do investimento está altamente correlacionado com o tempo de vida útil do equipamento, com a taxa de juros real, com os custos de operação do equipamento solar, com o preço do investimento e com os preços futuros da energia convencional. Dado que a maioria desses fatores é incerta, não se pode usar, para tal análise, modelos determinísticos. Waley e Campello (1990) desenvolveram um modelo estocástico para analisar tais sistemas de aquecimento permitindo a flexibilização de cenários futuros, mais otimistas ou mais pessimistas.

## **2.9 Aspecto Ambiental de um Sistema Solar de Aquecimento de Água**

As energias renováveis são apontadas como uma contribuição para a solução de problemas ambientais e de diversificação energética com que a sociedade se debate: apresentam potencial para diminuir as emissões de vários poluentes atmosféricos ao evitarem a queima de combustíveis fósseis; reduzem a dependência energética de um país importador de combustíveis e podem contribuir para dinamizar a indústria local.

A avaliação de ciclo de vida (“Life Cycle Assesment”) é uma ferramenta de análise ambiental que permite a avaliação dos impactos ambientais associados a um produto ou serviço, ao longo do seu ciclo de vida, o qual se estende desde a extração de matérias primas até o seu destino final. Metodologicamente a ACV (Análise de ciclo de vida) pode ser dividida em quatro fases interligadas, de acordo com a norma ISO14040:

- A definição do objetivo e do âmbito da análise;
- O inventário dos processos;
- A avaliação dos impactos ambientais;
- A interpretação de resultados.

A primeira fase da ACV envolve a definição do objetivo do estudo e seu âmbito, sendo definido o tipo de estudo a realizar, a sua motivação, o objetivo a atingir, a unidade funcional e as fronteiras do sistema. Durante a fase de inventário dos processos contabilizam-se as entradas e saídas, em termos de massa e energia, através das fronteiras dos sistemas analisados.

Na fase de avaliação é possível obter os impactos segundo determinadas categorias, como o efeito estufa ou o consumo de energia. Para tal, estabelecem-se correspondências entre as intervenções ambientais obtidas na fase de inventário e as categorias de impactos ambientais. A fase de avaliação dos impactos ambientais pode resultar na obtenção de um valor único que permite aferir o desempenho ambiental do produto ou serviço em análise. A última fase, interpretação dos resultados, perpassa todas as anteriores, sendo aferidos os resultados obtidos nas fases do inventário e de avaliação face aos objetivos do estudo.

Lages (2001), efetuou uma análise de ciclo de vida de um sistema de aquecimento de água com energia solar. O sistema analisado corresponde a um sistema solar térmico disponível no mercado português, o qual é tipicamente utilizado para famílias com quatro pessoas, inclui um coletor solar de 2m<sup>2</sup> e um reservatório de 200 litros e assume-se um tempo de vida mínimo de 12 anos. Quando utilizado em Lisboa, é capaz de fornecer 1320 kWh por ano, o que corresponde cerca de 80 % do consumo de energia anual da família, para aquecimento de água a 45 °C.

Concluiu-se que o sistema estudado compensou rapidamente os gastos energéticos decorrentes de seu ciclo de vida, sendo o tempo de retorno energético inferior a dois anos, para as taxas de reciclagem superiores a 50 %. Quanto às emissões de gases de efeito estufa e para uma taxa de reciclagem de metais e vidros de 50 %, o tempo de retorno ambiental varia entre cinco meses (na situação em que a energia auxiliar é eletricidade) e um ano e dois meses (quando a energia auxiliar é o gás natural).

## CAPÍTULO 3

### MONTAGEM EXPERIMENTAL DOS SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

Foram montados dois sistemas de aquecimento utilizando reservatório vertical e um sistema de aquecimento utilizando um reservatório horizontal. Os dois sistemas que utilizaram reservatórios verticais foram montados segundo duas configurações, denominadas série e paralelo. Estas configurações diferenciam-se apenas quanto à forma de conexão de seus componentes entre si.

Os sistemas funcionam por termossifão e utilizam um aquecedor a gás de passagem como fonte auxiliar de energia. Um termostato, instalado a 680 mm do fundo do reservatório vertical e a 525 mm do fundo do reservatório horizontal, aciona automaticamente a motobomba e o aquecedor a gás de passagem assim que a temperatura no interior do reservatório fica abaixo da temperatura de operação ajustada (43 °C).

Os sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás são constituídos por dois coletores de placas planas conectados em paralelo, um reservatório termicamente isolado, um aquecedor a gás de passagem, uma bomba e um termostato. Os componentes do sistema estão ligados por tubos de cobre isolados com espuma de poliuretano. Um reservatório de fibra de vidro armazena água fria para abastecer de forma compartilhada os sistemas com reservatório vertical e individualmente para o sistema com reservatório horizontal (por ter sido montado posteriormente). O reservatório com água fria conecta-se ao fundo dos reservatórios repondo a água consumida por gravidade, estando nivelado com os outros reservatórios.

Na configuração paralela, a entrada do coletor solar e a entrada do aquecedor a gás estão conectadas ao fundo do reservatório e suas saídas ao topo deste. Na configuração série, a entrada do coletor solar também está conectada ao fundo do reservatório, mas o retorno se dá no meio do reservatório. A entrada do aquecedor a gás conecta-se ao meio do reservatório enquanto sua saída está conectada ao topo do mesmo.

A Figura 3.1 apresenta uma vista geral dos sistemas série e paralelo (com reservatório vertical) e a Figura 3.2 representa um diagrama das suas principais conexões hidráulicas.



Figura 3.1 - Vista geral dos sistemas de aquecimento de água.

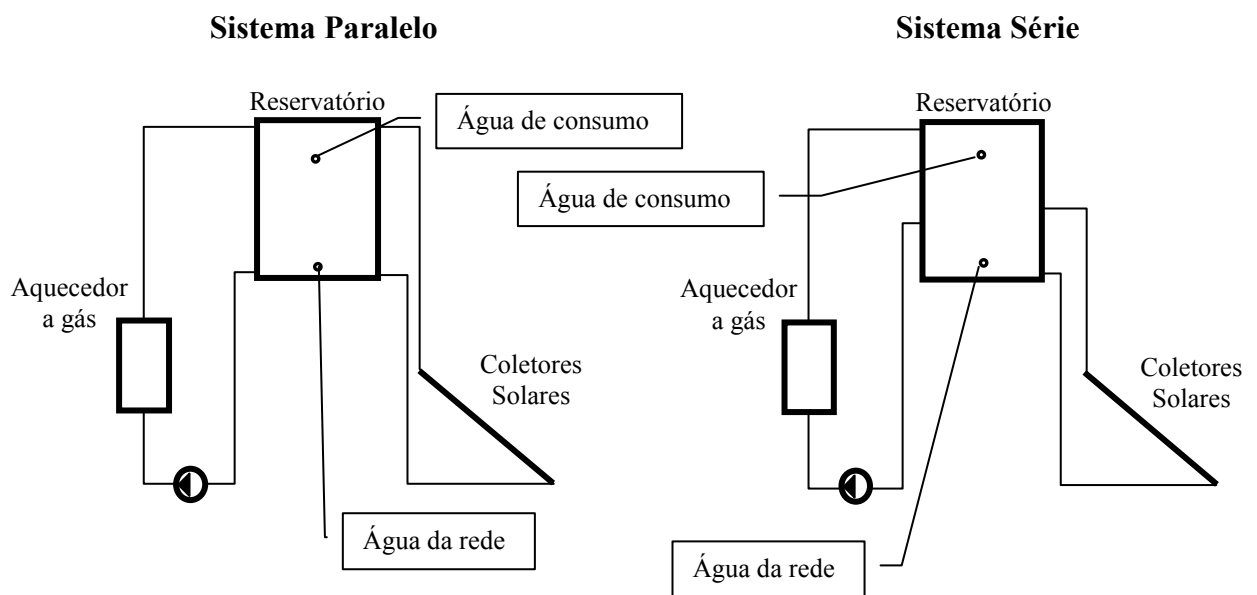


Figura 3.2 - Representação esquemática das conexões de ambos os sistemas.

A Figura 3.3 apresenta uma vista do sistema de aquecimento de água com energia solar e gás, utilizando reservatório horizontal. Nesta figura podem ser identificadas as suas principais conexões.

Um programa de computador desenvolvido no laboratório, utilizando a linguagem Qbasic (DOS), comanda uma central de aquisição de dados, o acionamento dos aquecedores a gás e as válvulas de consumo de água quente. A central de aquisição de dados recebe os valores medidos pelos sensores instalados no sistema de aquecimento de água. Sensores de temperatura

foram instalados para monitorar a temperatura da água e do ar ambiente. A irradiação solar foi medida por um piranômetro fotovoltaico. Todos os sinais dos sensores são coletados automaticamente gerando arquivos de dados.



Figura 3.3 - Vista geral do sistema de aquecimento de água com reservatório horizontal.

A temperatura de um sensor posicionado a 680 mm do fundo do reservatório vertical e 525 mm do fundo do reservatório horizontal exerce a função de termostato tendo sua temperatura monitorada. Ao ser alcançado um valor inferior a 43° C, para o reservatório vertical, e 45 ° C para o reservatório horizontal, o programa de controle envia um comando, via porta paralela, para energizar a bomba que aciona o aquecedor a gás. Quando a temperatura deste sensor atinge 44 °C e 46° C (vertical e horizontal respectivamente) o programa envia outro comando para desligar a bomba. Um sensor instalado na altura da tomada de água para consumo monitora a temperatura de consumo. No horário ajustado para ocorrer o consumo, o programa envia um sinal para que a válvula solenóide se abra, liberando água numa vazão constante. O critério adotado para encerrar o consumo evoluiu de uma situação em que ocorria consumo durante 30 minutos para uma situação em que após ter sido atingido um valor determinado de energia associada ao consumo de água quente o programa manda encerrar o consumo de água. Este critério foi adotado pois havia diferença de temperatura de consumo entre os sistemas, causando diferenças nas parcelas do balanço de energia entre os sistemas. Desta forma ao comparar-se a eficiência dos sistemas sabe-se que a retirada de energia em ambos os sistemas exerceu influência equivalente sobre o comportamento dos mesmos.

### 3.1 Sistema de Aquisição de Dados

Cada sistema de aquecimento de água com energia solar e gás foi equipado com um piranômetro fotovoltaico, 7 sensores PT100, uma fonte de corrente estabilizada, 10 sensores de circuito integrado para temperatura (C.I.), uma fonte de tensão contínua de 5 V, uma central de aquisição de dados HP34970A e um microcomputador Pentium 133MHz. Além disto há um medidor de consumo de gás, medidor de consumo de água, manômetro para pressão de gás e um manômetro para pressão de água.

As Figuras 3.4, 3.5 e 3.6 indicam as posições dos sensores que monitoram a temperatura da água ao longo da tubulação dos sistemas paralelo, série e horizontal respectivamente. As posições dos sensores são mantidas nas três configurações. Sensores PT 100 são utilizados na entrada e saída dos coletores solares, na saída do reservatório para o coletor, na entrada do reservatório vindo do coletor solar, na entrada e saída do reservatório da água quente vinda do aquecedor a gás e no interior do tanque de água fria.

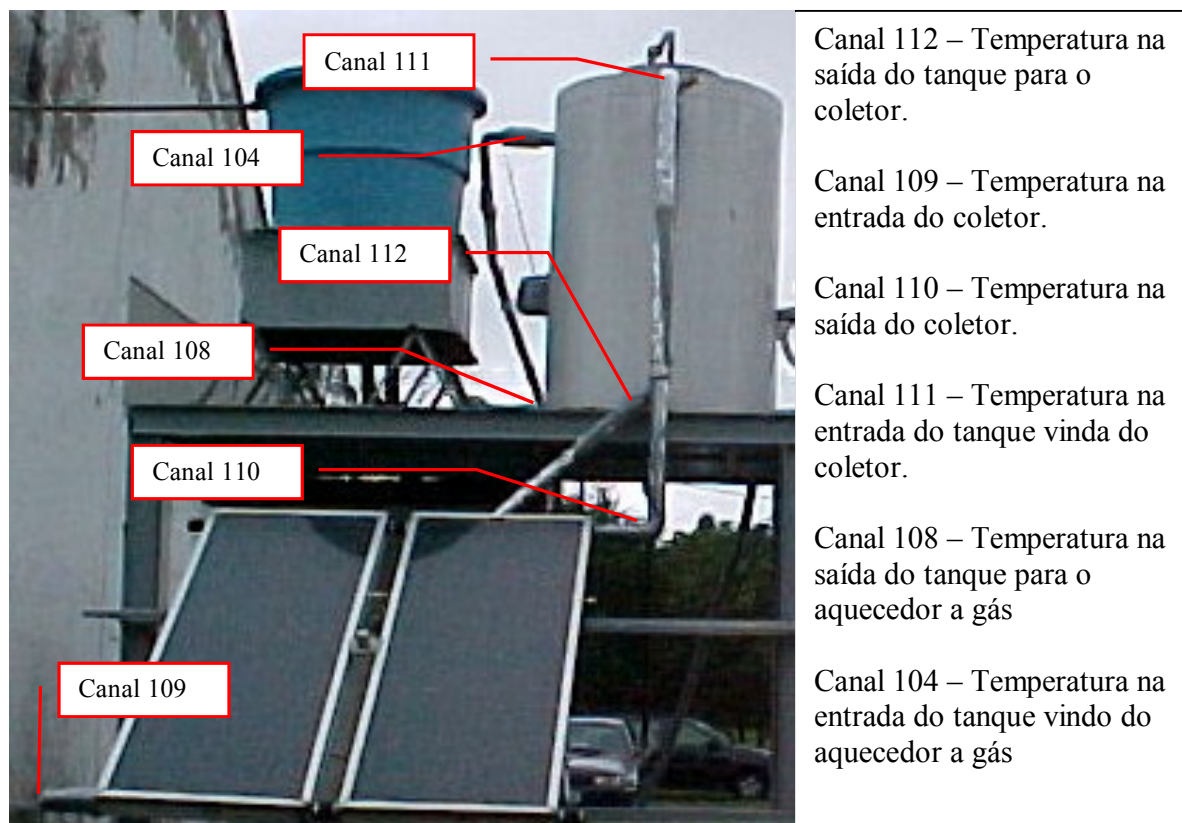


Figura 3.4 - Localização dos sensores PT100 no sistema 1(paralelo).



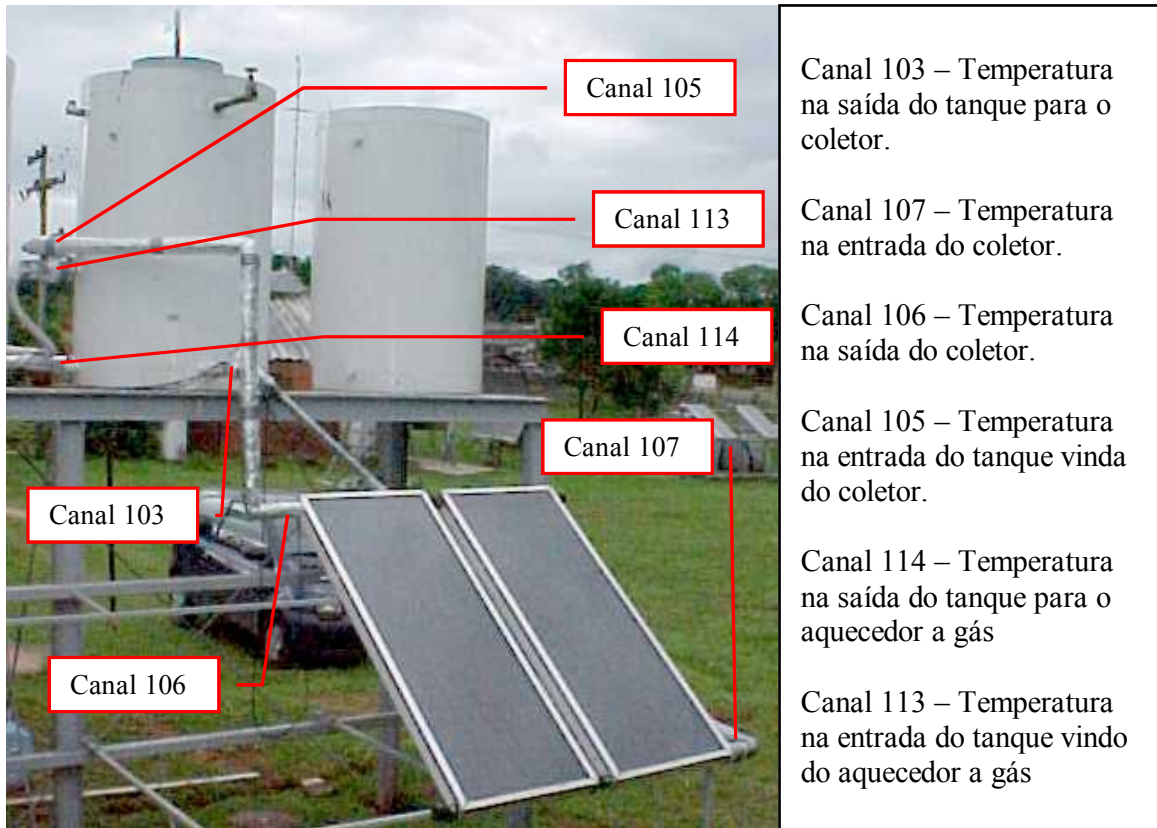


Figura 3.5 - Localização dos sensores PT100 no sistema 2 (série).

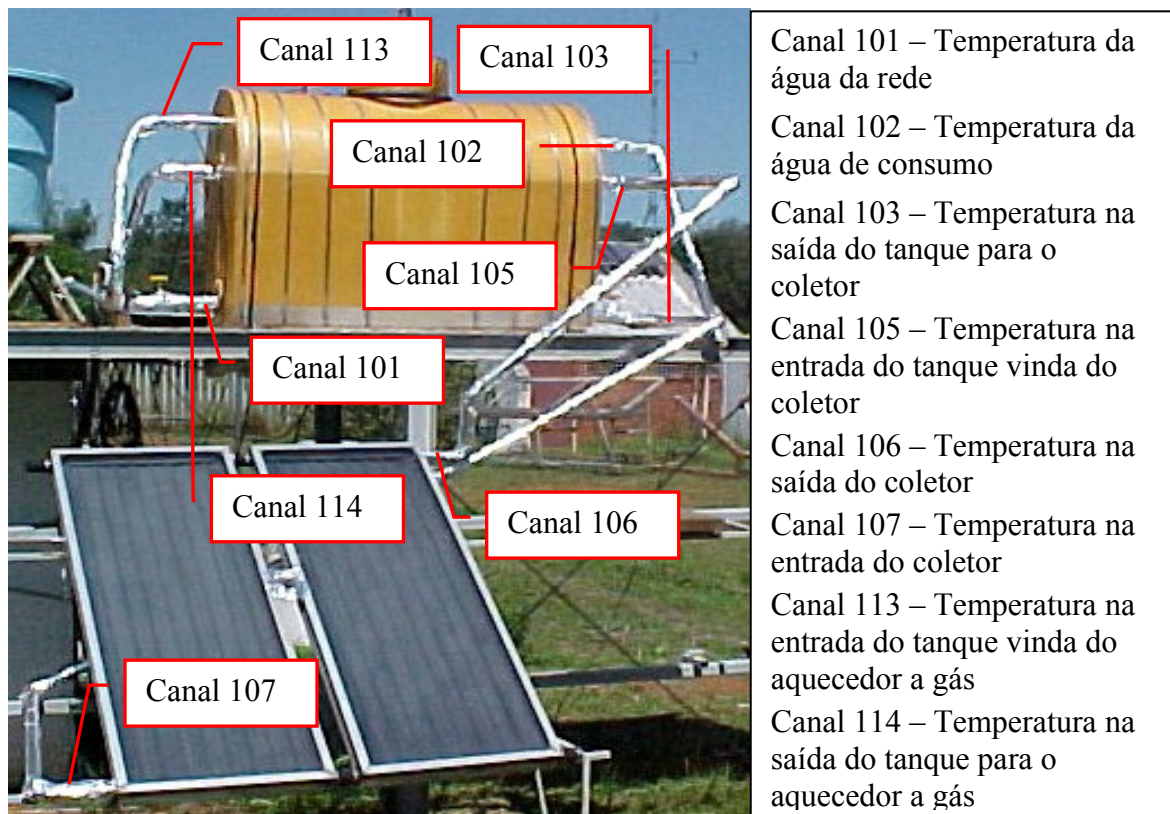


Figura 3.6 - Localização dos sensores PT100 no sistema 3 (horizontal).

Os sensores de C.I. medem a temperatura do ar ambiente na sombra e protegido de radiações, temperatura de reposição da água da rede e oito C.I.s foram introduzidos num tubo de CPVC para medir as camadas de temperaturas no interior do reservatório de água quente, indicados na Figura 3.7.

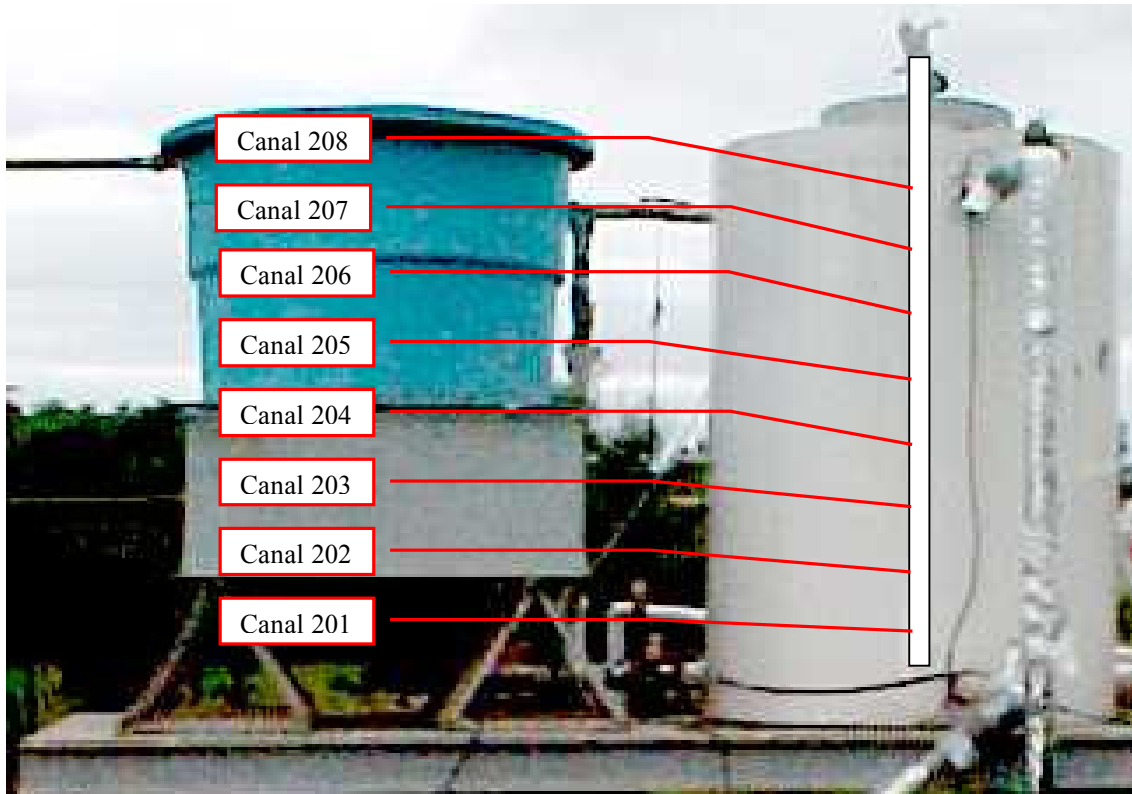


Figura 3.7 - Posicionamento dos sensores C.I. no interior do reservatório térmico.

### 3.1.1 Central de Aquisição de Dados

Para medida das diversas temperaturas e radiação solar foi utilizado um sistema de aquisição de dados HP 34970A, equipado com um multímetro interno que permite leituras de até 6 e 1/2 dígitos, controlado remotamente por um microcomputador via porta serial RS232. O sistema tem capacidade para 3 multiplexadores com vinte canais cada.

Todas as leituras foram feitas em medida de tensão usando 5 e 1/2 dígitos a 20 bits e escala de 1 V. Estas medidas apresentam uma incerteza equivalente a inexatidão na medida de tensão, segundo o manual do instrumento corresponde a  $60 \mu\text{V}$ , equivalente a  $\pm 0,006 \text{ }^\circ\text{C}$ , que será assumida como a incerteza para o sistema de aquisição de dados.



O sistema de aquisição de dados é comandado através do programa já citado, instalado em um microcomputador. O dados são coletados, em média, a cada 43 segundos (tempo da varredura) e armazenados no disco rígido.

### 3.1.2 Sensor Resistivo PT100

O PT100 é um sensor de temperatura que tem um resistor com uma resistência de platina de  $100\Omega$  a  $0K$  e varia sua resistência linearmente com o aumento da temperatura, segundo a equação 3.1:

$$R = R_0 (1 + \alpha (T - T_0)) \quad (3.1)$$

Ao alimentar o sensor com uma fonte de corrente estabilizada e medindo-se a tensão no resistor, obtêm-se um sinal em tensão que corresponde a resistência segundo a equação 3.2:

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.2)$$

Sabendo-se que o PT100 apresenta um comportamento de variação de resistência em função da temperatura e que esta resistência pode ser calculada medindo-se a corrente da fonte estabilizada e a queda de tensão no PT100, obtêm-se a temperatura.

Abaixo são apresentadas algumas características dos PT100:

- alto grau de precisão ao medir a temperatura;
- não são oxidáveis e possuem boa resistência mecânica;
- alta reprodutividade dos valores a serem medidos;
- usando circuito adequado podem ser usados a grandes distâncias;
- são mais estáveis que os termopares e que os C.I.s;
- sua curva de resistência elétrica em função da temperatura é mais linear que os termopares;

A estabilidade, característica de repetir seu resultado em várias medidas, pode ser considerada da ordem de  $0,01\text{ }^\circ\text{C}$ .

Todos os sensores PT100 foram conectados em uma fonte de corrente estabilizada e ao multiplexador através do sistema a quatro fios. O uso de tal técnica se deve ao fato de que a medida de resistência a quatro fios é o método que fornece os resultados mais exatos para

pequenas resistências. Através desse sistema, os efeitos das resistências dos fios, cabos, do multiplexador e dos contatos são automaticamente reduzidos. Essa técnica é adotada, normalmente, quando são necessários longos cabos entre o sensor e o conversor A/D.

O método a quatro fios consiste em uma fonte de corrente que força uma corrente conhecida a passar pela resistência  $R$  e o multímetro mede a queda de tensão entre os outros dois fios. A resistência desconhecida é calculada usando a lei de OHM. Este método possui a desvantagem que exige mais um par de fios, mas a exatidão na medida compensa.

A calibração dos PT100 foi realizada num banho termostático (Lauda), onde foi regulada a temperatura desejada e gravaram-se os valores de resistência indicados pelos PT100 àquela temperatura, obtendo-se 40 valores de resistência por sensor. Repetiu-se este procedimento para outras temperaturas e calculou-se a média destes 40 valores, ajustando-se uma reta com coeficiente de determinação da ordem de 0,9999. Estas equações são funções das temperaturas e dos valores médios de resistência para cada sensor.

Após ter sido realizada a calibração dos sensores, as equações das retas são inseridas num programa de computador. O programa realiza a validação da calibração ao verificar o valor da temperatura indicado pelos sensores quando estes são colocados novamente no banho termostático, numa temperatura conhecida. O erro da medida em relação à temperatura do banho (incerteza da calibração) obtido é de  $0,2^{\circ}\text{C}$ . A vantagem apresentada neste processo é que todos os sensores são calibrados e validados nas mesmas condições e ao mesmo tempo.

Para melhorar o contato térmico do sensor com a água sem prejudicar o fluxo da mesma pelo interior da tubulação do sistema, foi soldado um tubo de cobre no interior da tubulação de água dos sistemas e envolvido o sensor PT100 numa espiral de cobre, conforme Figura 3.9. Por terem sido detectados problemas elétricos com o encapsulamento do PT100 recorreu-se a um isolamento com um plástico termoretrátil, conforme mostra a Figura 3.8.



Figura 3.8 – Isolamento elétrico do PT100.

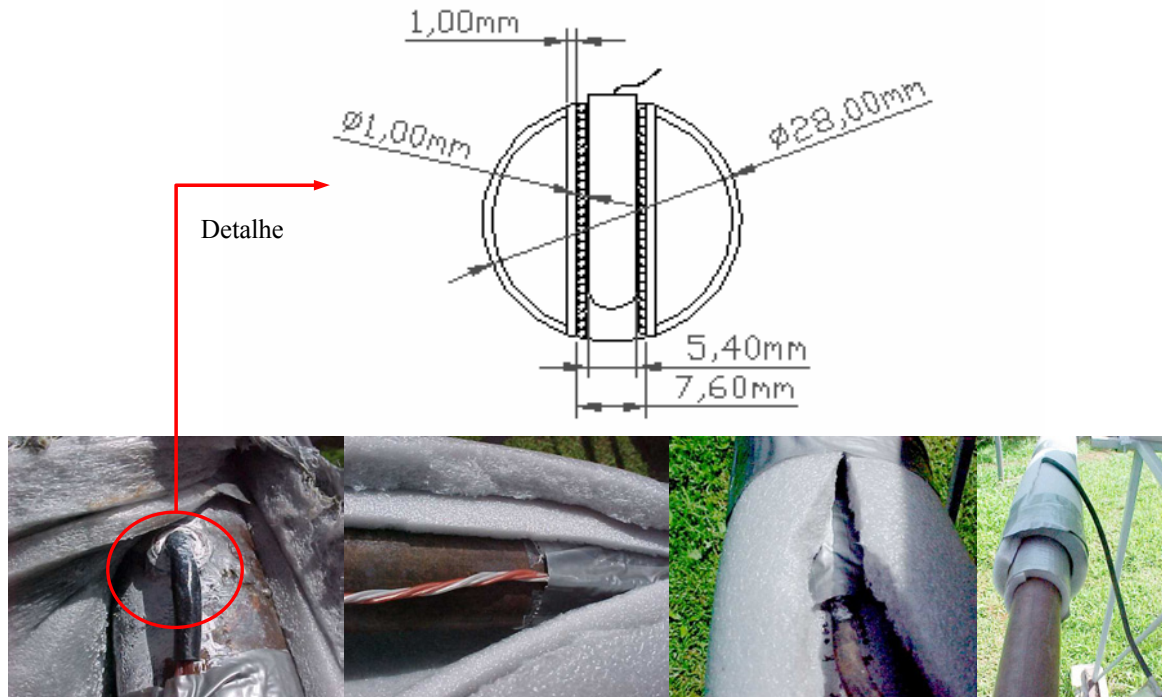


Figura 3.9 - Detalhe da fixação do sensor PT100 na tubulação de cobre.

### 3.1.3 Sensor de Circuito Integrado

O LM35 é um circuito integrado que fornece um sinal de tensão contínua proporcional à temperatura na razão de 10 mV/°C.

A seguir são apresentadas algumas características destes C.I.s:

- alcance de 0°C até +100°C;
- facilidade para montar um sistema de aquisição de dados;
- operam de 4 a 30 volts;
- trabalham com menos de 60  $\mu$ A de corrente;
- baixo auto-aquecimento: cerca de 0,08 °C.

Além destas características foi considerada uma incerteza nas medições realizadas com o sensor correspondente a sua estabilidade que, conforme a documentação do mesmo, é de  $\pm 0,4$  °C.

A fim de melhorar o contato térmico com a parede do tubo de CPVC foi soldada uma pequena aleta de cobre no terminal correspondente ao terra do circuito integrado, como pode ser visto na Figura 3.10, de forma a aumentar a sensibilidade do sensor no interior do tubo. Este terminal foi flexionado de forma a produzir uma pequena pressão da aleta contra a parede do tubo.



Figura 3.10 – LM35 com massa térmica na perna do terra.

A opção pela utilização dos C.I.s para a medição das temperaturas no interior do tanque teve diversos motivos. Um deles é a sua maior resistência mecânica quando comparado com os frágeis PT100. Outra é o seu baixo custo. Entretanto a principal razão é que, possuindo estes sensores apenas os dois terminais de alimentação e uma saída, para  $n$  sensores são necessários  $n + 2$  fios (contra  $n \times 4$  fios no caso dos PT100). Assim, ao minimizar o número de condutores elétricos, minimiza-se a condução térmica (na direção axial) através destes, a qual poderia mascarar a medida das temperaturas.

Foram instalados oito sensores C.I. em cada conjunto, distantes 15 cm entre si e sustentados nas linhas de alimentação. O conjunto foi introduzido no interior de um tubo de CPVC, conforme mostrado na Figura 3.11. O tubo foi fechado com um tampão na extremidade inferior e vedado com borracha de silicone na superior.

A calibração dos sensores C.I. na haste foi realizada acoplando-se um tubo de água, de 50 mm de diâmetro, ao banho termostático, conforme indicado na Figura 3.12, introduzindo-se a vara de sensores no interior deste tubo, sendo que a calibração prossegue da mesma maneira que a calibração dos PT100 obtendo-se uma incerteza de calibração de  $0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .



Figura 3.11 – Haste de CPVC com LM35 em seu interior.



Figura 3.12 – Calibração dos sensores C.I.s com o banho termostático e o tubo acoplado a ele.



Figura 3.13 – Conexão dos sensores C.I. ao cartão multiplexador HP 34970A.

Para diminuir os erros devido aos ruídos do sistema foram colocados capacitores e resistores em paralelo com a alimentação negativa e o sinal, conforme indicado na Figura 3.13.

#### 3.1.4 Piranômetro Fotovoltaico

O piranômetro é o instrumento mais utilizado para medir a radiação solar incidente numa superfície. A medida realizada por este instrumento inclui a radiação direta, proveniente do disco solar, e a radiação difusa, proveniente do hemisfério celeste. Caso a superfície esteja inclinada o instrumento recebe também a radiação refletida pelo solo (albedo). Para medir a radiação incidente no plano dos coletores foi utilizado um piranômetro fotovoltaico desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da UFRGS.

Foi realizada a calibração do piranômetro fotovoltaico com um piranômetro Eppley (padrão secundário), por comparação, obtendo-se a constante de  $19,36 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ . Segundo Zanesco (1991), um instrumento similar ao utilizado, apresentou, quando comparado a um piranômetro Eppley um desvio médio de 1,2% na medida horária da radiação solar em dias de



céu limpo. A Figura 3.14 apresenta o piranômetro fotovoltaico utilizado, já instalado no plano dos coletores.



Figura 3.14 – Piranômetro fotovoltaico.

### 3.1.5 Medidor de Consumo de Gás

O medidor de gás utilizado foi o modelo LAO/G1, medidor de gás totalizador, com vazão máxima de consumo de  $1,7\text{m}^3/\text{h}$ , vazão mínima de  $0,016\text{m}^3/\text{h}$ , pressão máxima  $50\text{ kPa}$ , volume de compartimento de  $0,4\text{ dm}^3$  e resolução de  $0,2\text{ dm}^3$ . A Figura 3.15 apresenta o medidor de gás utilizado.



Figura 3.15 – Medidor de consumo de gás.

### 3.1.6 Medidor de Consumo de Água

Para medir o consumo de água uma válvula solenóide acionada pelo computador. Previamente foi realizada uma calibração medindo o escoamento da água em função do tempo de abertura da válvula. A água coletada em um balde foi pesada, tendo-se repetido o procedimento por diversas vezes.

Para determinar a massa de água contida nos reservatórios foi utilizado um hidrômetro com resolução de  $0,05 \text{ dm}^3$ , apresentado na Figura 3.16. Este mesmo instrumento também foi utilizado para medir a vazão de água nos ensaios dos aquecedores a gás.



Figura 3.16 – Hidrômetro.

## CAPÍTULO 4

### CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DOS SISTEMAS

#### 4.1 Caracterização dos Reservatórios Térmicos

Os reservatórios verticais empregados são dois reservatórios cilíndricos de aço inoxidável, isolados com poliuretano expandido (50 mm de espessura) e envoltos em chapas de aço e um reservatório horizontal cilíndrico de polietileno de alta densidade, isolado com poliuretano expandido. A capacidade nominal de cada reservatório é de 600 litros e a razão de aspecto dos reservatórios verticais foi escolhida visando uma maior estratificação da temperatura da água dentro do reservatório. Para a análise de seus comportamentos térmicos durante a operação dos sistemas, os reservatórios verticais foram subdivididos em oito camadas igualmente espaçadas, e o reservatório horizontal em cinco camadas.

As Figuras 4.1 e 4.2 indicam as dimensões e as alturas das conexões dos reservatórios térmicos vertical e horizontal, respectivamente.

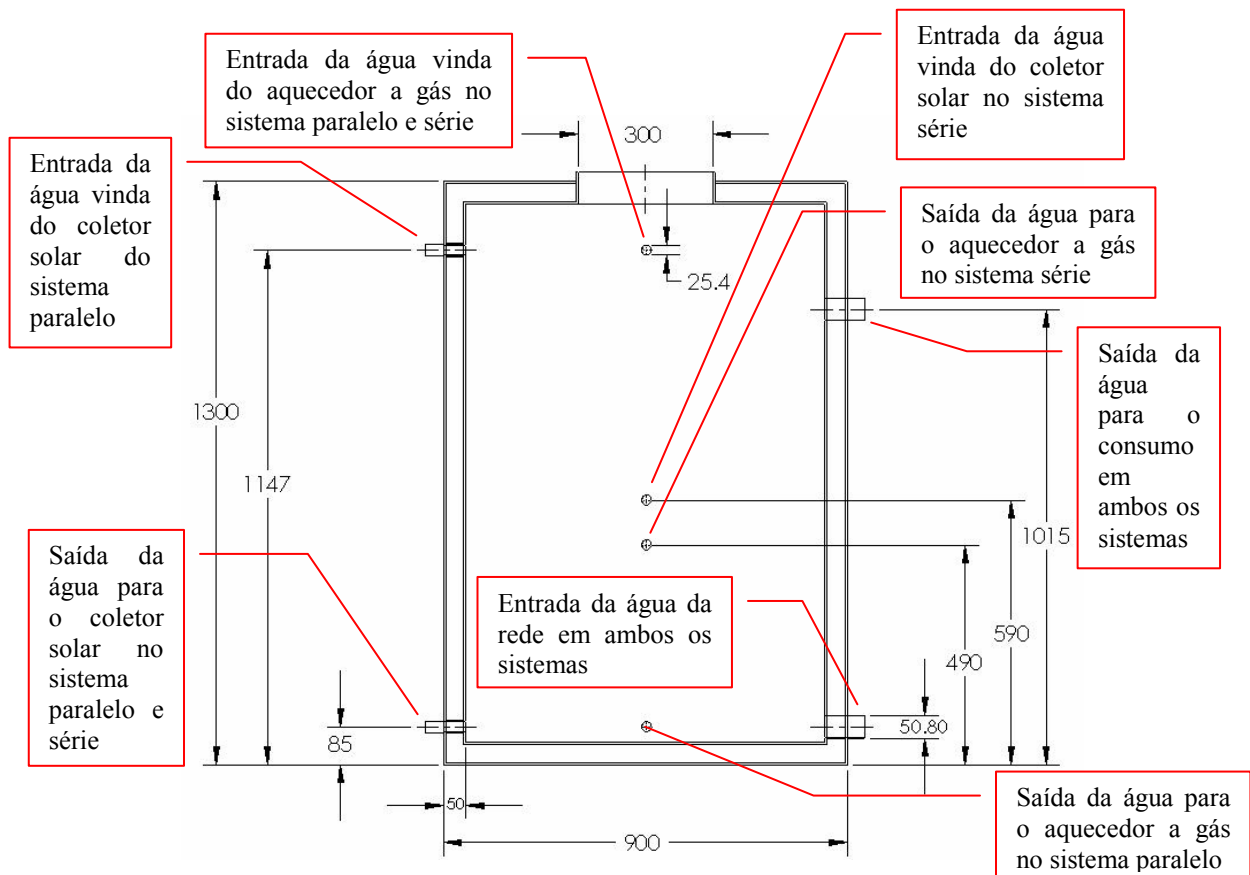


Figura 4.1 – Dimensões do reservatório térmico vertical em mm.



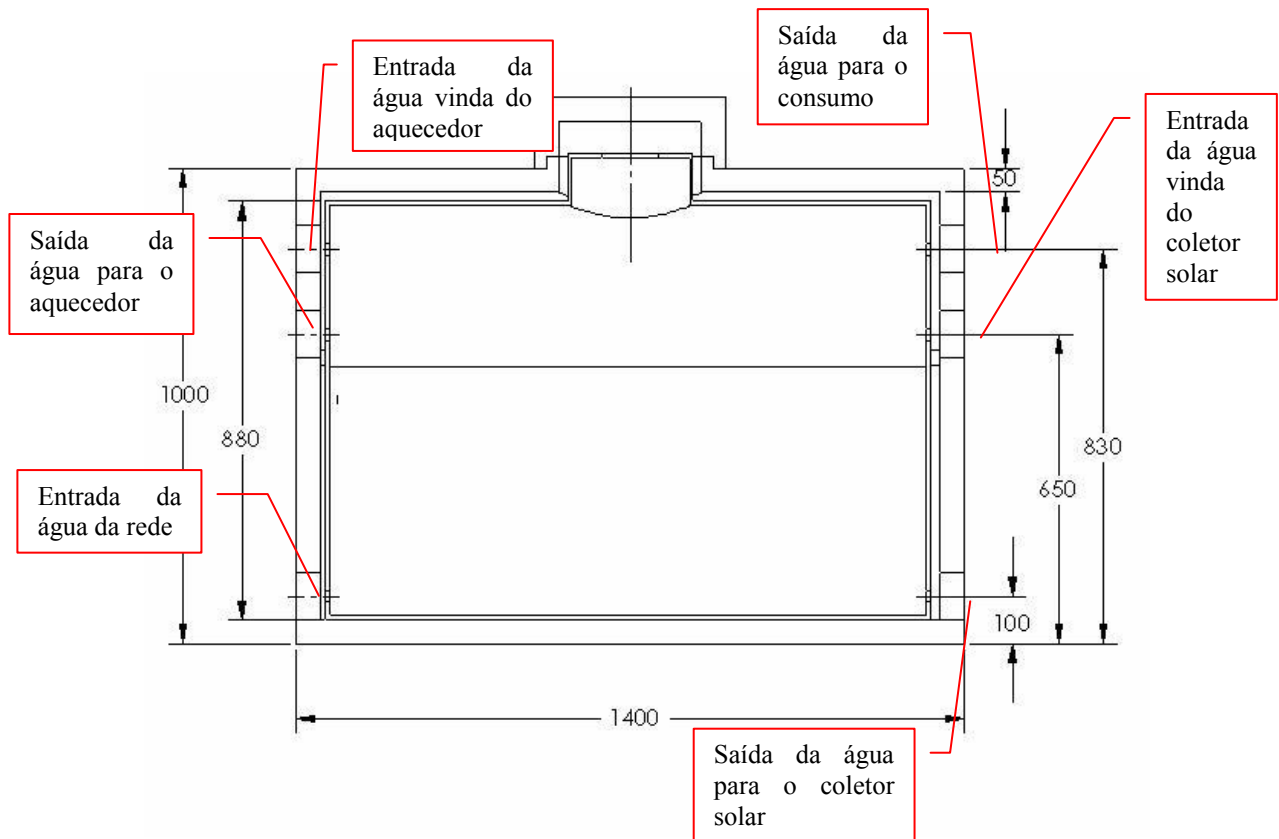


Figura 4.2 – Dimensões do reservatório térmico horizontal em mm.

A Figura 4.3 apresenta uma vista em perspectiva do reservatório horizontal utilizado. Observa-se que o formato não é cilíndrico (base).

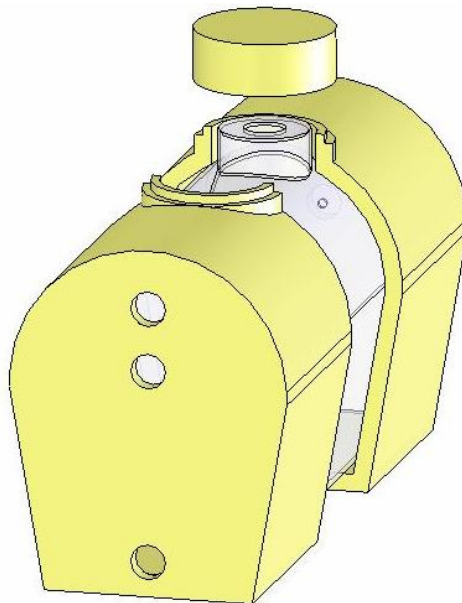


Figura 4.3 – Vista em perspectiva do reservatório horizontal.

Os reservatórios ocupam uma posição central em sistemas de aquecimento de água com acumulação, pois todas as fontes de geração de energia estão conectadas a ele. Embora eles sejam isolados termicamente ainda ocorrem perdas térmicas através de sua superfície para o meio ambiente ao longo do tempo. É desejável utilizar reservatórios com baixos coeficientes globais de perdas térmicas de modo a preservar ao máximo a energia fornecida pelos coletores solares e pelos aquecedores a gás.

O coeficiente global de perdas térmicas dos reservatórios vertical e horizontal, usados neste trabalho foi experimentalmente avaliado. O método empregado consistiu em determinar a potência média exigida por um aquecedor elétrico instalado no interior do reservatório para que se mantivesse a água em uma certa temperatura. O coeficiente global de perdas térmicas é o resultado da divisão desta potência pela diferença entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura da água. Tal método tem a vantagem de que o cálculo do coeficiente é independente do volume do reservatório e da área, bem como do material e da espessura do isolamento. O teste foi executado em um lugar a uma temperatura constante. O reservatório foi preenchido com água e um conjunto de três resistências elétricas, com uma potência total de 400 W, foi instalado dentro da água, no fundo do reservatório. A colocação das resistências no fundo permitiu que a movimentação convectiva da água, causada pelo aquecimento, promovesse a homogeneização da temperatura dentro do reservatório. Os aquecedores foram controlados por um termostato instalado na parte superior do reservatório, ajustado a 60°C.

Três sensores de resistência de platina posicionados a alturas igualmente espaçadas mediram a temperatura da água dentro do reservatório. Outro sensor mediu a temperatura do ar ambiente. Um sistema de aquisição de dados registrou as temperaturas, bem como a corrente e a tensão aplicada às resistências. A coleta de dados começou depois que um estado estável foi estabelecido e continuado por cerca de 5 dias. O consumo de energia, correspondeu a uma potência média de 215 W, para o reservatório vertical. As temperaturas médias da água e do lugar foram de 60.4°C e 24.6°C respectivamente, resultando em um coeficiente de perdas de aproximadamente 6 W/°C (o qual pode ser considerado alto para um reservatório de 600 l quando comparado com o reservatório horizontal e outros já ensaiados no laboratório). A Figura 4.4 apresenta o resultado do resfriamento da água no interior do reservatório comparado com o resfriamento que teria com um coeficiente de perdas térmicas de 6 W/°C (obtido no ensaio descrito).

É importante salientar que o coeficiente global de perdas térmicas dos reservatórios foi determinado considerando homogênea a temperatura no interior do reservatório e que sistemas de aquecimento com energia solar, quando operam, apresentam estratificação térmica

no interior do reservatório. Isto altera as perdas térmicas relativas à base, à lateral e ao topo devido às características particulares de cada região e à temperatura da água no mesmo local. Embora o coeficiente médio assim como a temperatura média do reservatório sejam aproximações, elas representam satisfatoriamente o que ocorre na realidade.

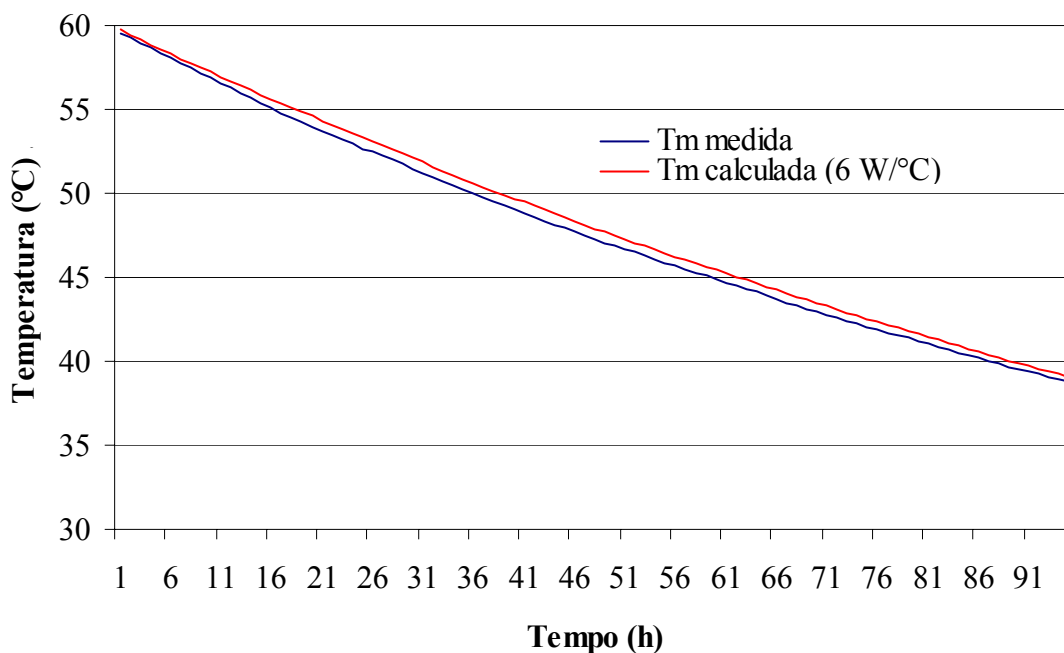


Figura 4.4 – Curva de resfriamento do reservatório vertical.

Quando os reservatórios foram expostos às condições externas e conectados aos coletores e aquecedores a gás, observaram-se coeficientes maiores do que os determinados experimentalmente. Devido à necessidade de conhecer com mais certeza o valor efetivo dos coeficientes de perdas dos sistemas, uma outra metodologia foi utilizada, visto que o coeficiente global de perdas do sistema sempre é maior do que do reservatório, por introduzir a tubulação que o conecta aos outros componentes. Medindo a temperatura média da água no reservatório e sua variação em períodos em que o aquecedor a gás e o coletor solar não estiveram em operação, estimou-se o coeficiente de perdas térmicas do sistema. Este incremento deve-se principalmente a ação do vento e das perdas pela tubulação da instalação.

Os coeficientes de perdas térmicas dos sistemas são calculados durante a noite, aplicando a metodologia apresentada a seguir. Se a diferença entre a temperatura média do reservatório e a temperatura do ar ambiente for inferior a  $\pm 0,3$  °C então se considera o fluxo de calor igual a zero, caso contrário o coeficiente é calculado pela equação 4.1.

$$U_T = \frac{\Delta E_i}{(T_a - T_m)\Delta t} \quad (4.1)$$

onde  $\Delta E_i$  é a variação da energia interna do reservatório,  $T_a$  é a temperatura do ar ambiente,  $T_m$  é a temperatura média da água no interior do reservatório e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo considerado.

Foi elaborado um programa de computador para verificar o valor dos parâmetros dos sistemas durante os ensaios realizados. Na verificação do valor do coeficiente global de perdas térmicas utilizou-se o artifício de zerar o valor deste quando assumir valores superiores a 14 ou inferiores a 7 W/°C (quando há consumo ou ganho de energia através dos coletores). Os valores dos coeficientes dos sistemas são calculados através da relação entre a potência térmica transferida do interior do reservatório para o ar ambiente e a diferença média de temperatura entre o interior do reservatório e o ambiente do mesmo. Estas relações são calculadas a cada hora e são apresentados na Figura 4.5.

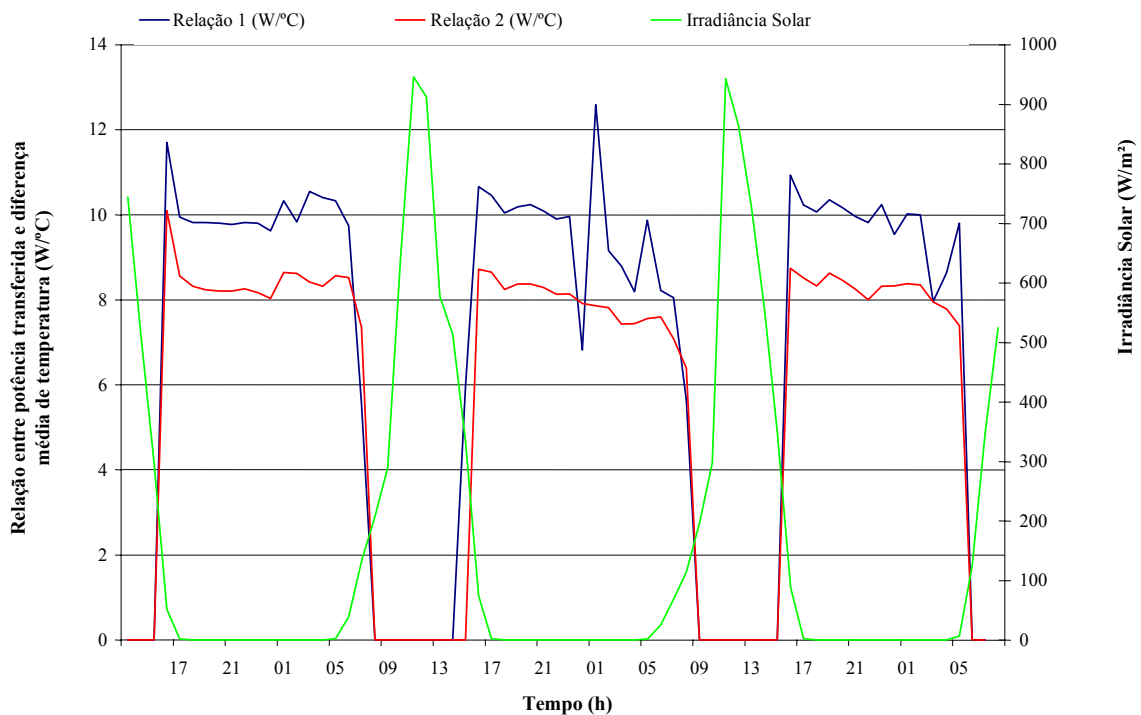


Figura 4.5 – Relação entre potencia térmica transferida e diferença média de temperatura do reservatório para o ambiente para calcular os coeficientes globais de perdas dos sistemas série(2) e paralelo(1).

Uma vez determinado o coeficiente de perdas térmicas do sistema é possível obter as perdas térmicas através da equação 4.2:

$$Q_p = U_T \Delta t (T_m - T_a) \quad (4.2)$$

A variação da energia interna do reservatório é obtida de duas formas, a primeira delas medindo-se a temperatura da água nas oito camadas no interior do reservatório e calculando-se a temperatura média da água no interior do reservatório no momento inicial e final do período ensaiado. De posse desta temperatura calcula-se a energia interna do reservatório, denominada variação da energia medida, através da equação 4.3:

$$\Delta E_i = m c_p (T_{mi} - T_{mf}) \quad (4.3)$$

onde  $m$  representa a massa de água contida no reservatório em (kg),  $c_p$  é o calor específico da água em (kJ/kg°C),  $T_{mi}$  é a temperatura média inicial da água no interior do reservatório em (°C) e  $T_{mf}$  é a temperatura média final da água no interior do reservatório em (°C).

A segunda maneira de calcular a variação de energia interna, denominada variação de energia calculada, é utilizando a equação 4.4:

$$\Delta E_i = m c_p (T_m - T_0) - Q_p \quad (4.4)$$

onde  $m$  representa a massa de água contida no reservatório em (kg),  $c_p$  é o calor específico da água em (kJ/kg°C),  $T_m$  é a temperatura média da água no interior do reservatório em (°C),  $T_0$  é a temperatura considerada a 0°C e  $Q_p$  é a energia associada as perdas térmicas do sistema em (kJ).

Posteriormente é realizada a média do coeficiente do sistema no intervalo ensaiado, obtendo-se os valores, para a seqüência de dias da Figura 4.5, de 10 W/°C para o sistema paralelo (1) e 8,5 W/°C para o sistema série (2). Como o reservatório horizontal foi montado posteriormente a montagem dos reservatórios verticais seus ensaios foram realizados isoladamente, obtendo-se o valor de 4,2 W/°C para o sistema que utiliza o reservatório horizontal.

Deve-se ressaltar que os reservatórios verticais, embora tenham sido encomendados com as mesmas características, apresentam diferenças dos coeficientes globais de perdas térmicas que indicam pequenas diferenças construtivas.

É importante salientar que o coeficiente global de perdas de um sistema de aquecimento é uma variável que depende muito do coeficiente global de perdas do reservatório e das condições climáticas. Embora a velocidade do vento não tenha sido medida, é de conhecimento que a intensidade dos ventos aumenta à noite nesta localidade (Hernandez, 2004). Visto que o coeficiente dos reservatórios ensaiados e utilizados no experimento mostrou-se elevado concluiu-se que a ação do vento causou significativa influência sobre ele.

No programa de simulação desenvolvido na UFRGS deve-se fornecer o valor do coeficiente como sendo uma constante do sistema. Nestas situações os erros nos balanços de energia tornam-se inevitáveis. A equação 4.4 na realidade é um balanço de energia simplificado, pois considera a energia interna do reservatório no momento inicial e subtrai deste valor a energia perdida pelo reservatório ao longo do tempo obtendo como o resultado a quantidade de energia interna restante no reservatório no momento determinado.

Outra questão interessante é a variação do coeficiente global de perdas térmicas do sistema quando é calculado de dia e de noite, tomando-se o cuidado de desconectar os coletores solares. Procedeu-se da mesma forma do método anterior, ou seja, garante-se que a variação de energia se dará apenas devido às perdas térmicas. Porém o período avaliado introduz o dia, quando há incidência de radiação solar e quando a temperatura ambiente é mais elevada.

A Figura 4.6 mostra a diferença que os métodos de determinação dos coeficientes globais de perdas ocasionam nas curvas da variação de energia interna do reservatório. O coeficiente médio determinado à noite é  $9,71 \text{ W/}^\circ\text{C}$  enquanto que o coeficiente médio determinado durante todo o intervalo de tempo (dia e noite) é  $8,65 \text{ W/}^\circ\text{C}$ , ambos para o sistema paralelo (1). Na figura são apresentadas três curvas de resfriamento (variação de energia interna) onde uma delas é medida e as outras duas são calculadas através do uso dos coeficientes globais de perdas térmicas calculados a noite e incluindo o dia e a noite. A curva que utiliza o coeficiente de perdas noturno apresenta resultado muito próximo do experimental no primeiro dia, que foi nublado, e durante a primeira noite. No segundo dia começa a haver um distanciamento do resultado experimental. No entanto a curva que utiliza o coeficiente de perdas calculado com o dia e a noite apresenta uma curva de resfriamento mais afastado da curva experimental e vai aproximando-se dela no decorrer do segundo dia.

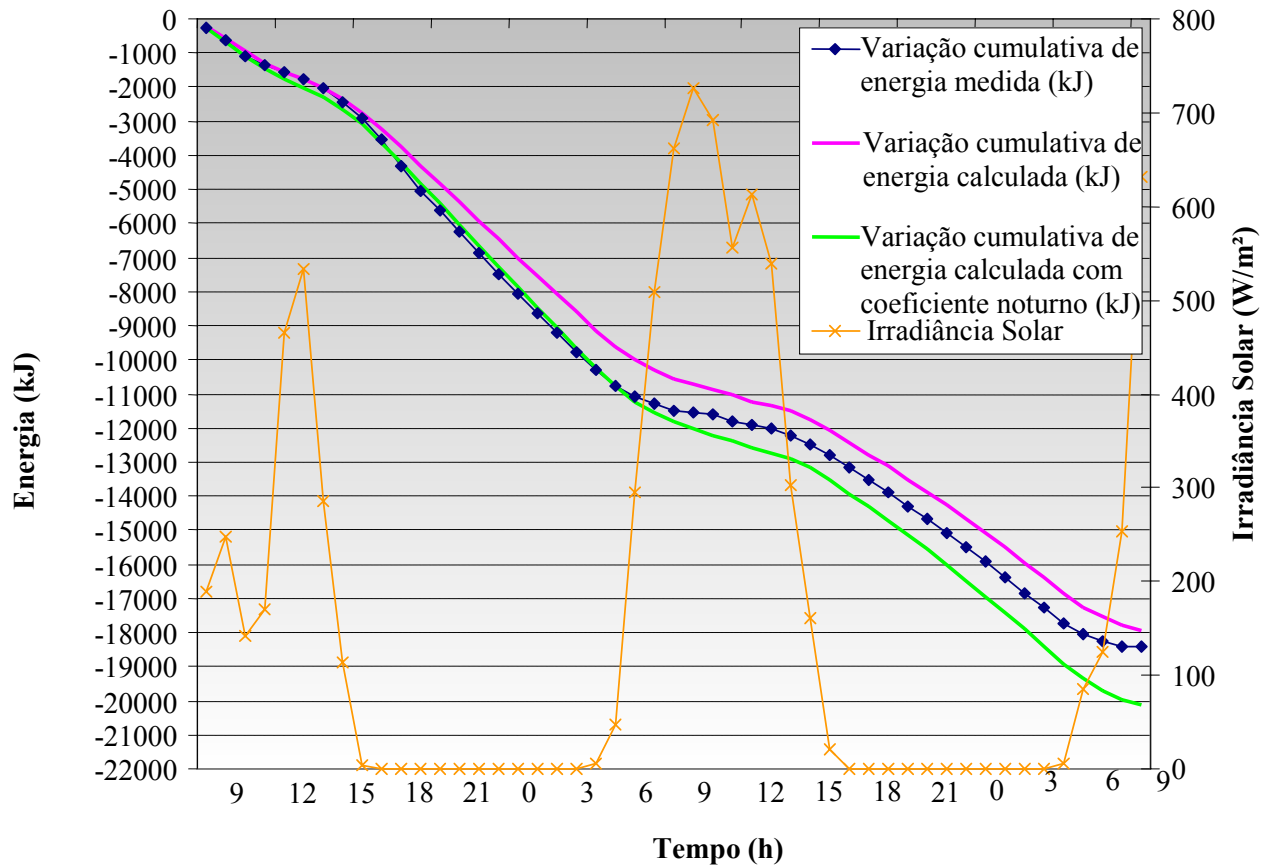


Figura 4.6 – Comparação da variação de energia interna medida e calculada por dois métodos diferentes.

#### 4.1.1 Alteração do Isolamento do Reservatório Térmico Vertical

Considerando-se a elevada influência que as perdas térmicas exerciam sobre o perfil de temperaturas da água no interior dos reservatórios térmicos decidiu-se modificar o isolamento dos reservatórios verticais.

A Figura 4.7 mostra o revestimento de poliuretano adicional com 30 mm de espessura colocado nos reservatórios, com o objetivo de baixar o coeficiente global de perdas do reservatório e principalmente deixá-lo menos suscetível à variações em função da velocidade do vento. A Figura 4.8 mostra a etapa em que o reservatório foi revestido por uma lona. Este isolamento visava diminuir a ação do vento sobre os reservatórios.



Figura 4.7 – Isolamento adicional de poliuretano.      Figura 4.8 – Enlonamento para diminuir a ação do vento.

Além da proteção com a lona plástica foi considerado apropriado efetuar uma blindagem à radiação solar (revestindo o reservatório com papel alumínio), Figura 4.9, pois os reservatórios apresentavam ganho de energia durante o dia com um decaimento do coeficiente global de perdas, quando expostos ao sol. O resultado final desta modificação alterou o coeficiente global de perdas de 9,5 para 4,2 W/°C para o sistema paralelo e de 8,1 para 4,8W/°C para o sistema série.



Figura 4.9 – Blindagem de alumínio para radiação solar.



## 4.2 Caracterização dos Coletores Solares

Os coletores solares usados nesta experiência são de placas planas, com placas e tubos de cobre. Estes coletores apresentam cobertura simples e são isolados na parte posterior e lateral com lã de vidro. Suas dimensões externas são 0,59 m por 1,5 m com uma área total de 0,89 m<sup>2</sup>.

A norma ABNT NBR10184 (1988) especifica os procedimentos para a determinação da eficiência instantânea do coletor e sugere que os testes sejam executados ao ar livre, perto de condições reais de operação. Estes padrões estabelecem os procedimentos experimentais, requisitos de exatidão, condições meteorológicas, etc.

A eficiência térmica de um coletor solar plano é definida como sendo a razão entre a potência útil ganha pelo coletor e a radiação que chega no seu plano por unidade de tempo. Considerando  $\dot{m}$  a vazão mássica da água circulando no coletor,  $c_p$  o calor específico da água,  $T_s$  a temperatura de saída da água e  $T_e$  a temperatura de entrada da água no coletor, o calor útil transferido à água será  $\dot{m} c_p (T_s - T_e)$ . Por outro lado o fluxo radiante solar interceptado pelo coletor é dado por  $A_c G_T$  onde  $A_c$  é a área total do coletor e  $G_T$  é a radiação solar incidente sobre o plano inclinado alinhado com o coletor, dado em W/m<sup>2</sup>. Assim:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c G_T} = \frac{\dot{m} c_p (T_s - T_e)}{A_c G_T} \quad (4.5)$$

O procedimento básico para determinar a eficiência térmica instantânea consiste em fazer circular o fluido de trabalho no coletor e medir a energia térmica retirada bem como a radiação solar incidente quando o coletor estiver operando em regime permanente. A quantidade de calor útil retirada é determinada multiplicando o fluxo medido do fluido pelo calor específico e pela diferença de temperatura entre a saída e a entrada do coletor,  $(T_s - T_e)$ . Esses valores são obtidos medindo-se a temperatura nas seções de entrada e de saída do coletor. A radiação solar é medida diretamente com um piranômetro.

Por outro lado, a teoria dos coletores solares planos indica que se poderia calcular o calor útil de um coletor pela diferença entre a energia absorvida e as perdas térmicas:

$$\dot{Q}_u = A_c [G_T (\tau\alpha)_e - U_L (T_p - T_a)] \quad (4.6)$$

onde  $T_p$  é a temperatura média da placa absorvedora do coletor solar.

Dado que  $T_p$  varia ponto a ponto sobre a placa absorvedora, é difícil sua determinação experimental. Assim é conveniente expressar a energia útil retirada por meio da temperatura de entrada do fluido, a qual pode ser facilmente determinada. Neste caso é necessário fazer uma transformação introduzindo o fator  $F_R$ , o qual é definido como a relação entre o calor útil verdadeiro com o calor útil que seria obtido se toda a placa absorvedora estivesse na temperatura do fluido na entrada do coletor.

Assim o calor útil fica definido como:

$$\dot{Q}_u = A_c F_R [G_T (\tau\alpha)_e - U_L (T_e - T_a)] \quad (4.7)$$

e a eficiência é dada por:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c G_T} = F_R \left[ (\tau\alpha)_e - U_L \frac{(T_e - T_a)}{G_T} \right] \quad (4.8)$$

Os métodos de determinação da curva de eficiência de coletores solares sugerem que os testes do coletor sejam feitos integralmente ao ar livre em condições reais de operação. Estes procedimentos adotam uma série de regras quanto à precisão do equipamento a ser utilizado, condições meteorológicas, modo de operação etc. O procedimento destes métodos é o seguinte:

- São obtidos os pontos de eficiência térmica instantânea.
- Cada ponto é obtido fixando-se a temperatura do fluido na seção de entrada.
- No mínimo 16 pontos devem ser obtidos.
- Para cada temperatura de entrada são obtidos dois pontos antes e após o meio dia solar, de maneira simétrica.
- Os pontos de eficiência são obtidos pela razão entre a energia útil e a radiação solar incidente.

Os resultados são apresentados em gráficos de  $\eta$  em função de  $(T_e - T_a)/G_T$ .

Os métodos tentam caracterizar o coletor através de uma curva (na prática uma reta) de eficiência térmica instantânea, obtida diretamente dos dados experimentais, como função de três variáveis: temperatura do fluido (ou temperatura de entrada), temperatura ambiente e potência da radiação incidente no plano do coletor. Variáveis como velocidade de vento são apenas registradas, devendo estar entre 0 m/s e 5 m/s (segundo norma ABNT NBR10184). Recomenda-se que a vazão do fluido seja ajustada para 0,02 kg/s por metro quadrado de área de

coletor. Os pontos experimentais assim obtidos, em geral, não se situam exatamente sobre uma curva, existindo uma pequena dispersão atribuída a variação de parâmetros atmosféricos e também às incertezas de medida. É feita uma regressão linear dos pontos medidos e encontrados os parâmetros  $F_R(\tau\alpha)_e$  e  $F_R U_L$  que definem a reta e a qualidade do coletor.

A bancada Aquatherm WS 83, instalada no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, é um conjunto de equipamentos que permitem manter a temperatura de entrada e a vazão constantes durante o período requerido para o ensaio de determinação da curva de eficiência instantânea. Essa bancada permite o ensaio de até dois coletores simultaneamente. A fixação dos coletores é garantida por uma estrutura metálica que os mantém a um ângulo de inclinação de 30° em relação à horizontal.

A estrutura está montada sobre rodas, as quais permitem uma mudança do ângulo azimutal pela movimentação do conjunto. Essa possibilidade aumenta o período de incidência da radiação direta com ângulo menor que 30° em relação à perpendicular ao plano dos coletores.

A Figura 4.10 mostra a bancada Aquatherm WS 83, da qual pode-se ver a estrutura metálica que serve de suporte aos coletores, ao fundo a unidade de aquecimento e circulação de água e, à esquerda, a unidade de refrigeração. O sistema de aquisição de dados está instalado a cerca de 15 metros, no prédio anexo ao Laboratório de Energia Solar. A temperatura de entrada de água nos dois coletores pode ser ajustada individualmente desde 20 até quase 100 °C, com variação ao longo do tempo menor que 0,1 °C. Para conseguir este resultado, apesar de circular a mesma água através dos dois coletores conectados em série, o sistema conduz a água que acabou de circular pelo primeiro coletor para dentro de um trocador de calor, promovendo uma refrigeração que esfria esta água até uma temperatura abaixo daquela desejada, sendo então reaquecida com resistências elétricas que dissipam trens de pulso de potência, com frequência regulada eletronicamente a partir da realimentação dos sensores de temperatura no segundo coletor. A vazão de água através dos coletores pode ser variada desde 70 até 200 l/h, medido por um fluxímetro volumétrico com saída elétrica. A estabilidade da vazão para um valor constante é garantida por um acumulador pneumático (0,2 MPa) que se encontra no circuito hidráulico do sistema. A medição da radiação é feita através de um piranômetro Eppley de precisão modelo PSP instalado no plano do coletor. A velocidade do vento é medida por um anemômetro de conchas de alta sensibilidade e boa precisão (2 %), que permite a medição da velocidade de vento desde 0,2 m/s até 9 m/s. As temperaturas são medidas através de termoresistores PT100, conectados a quatro fios.



Figura 4.10- Coletores sob teste na bancada Aquatherm. O gabinete da esquerda é o sistema de refrigeração e o do fundo abriga os sistemas de aquecimento e circulação de água.

Na Figura 4.11 pode ser observado o diagrama esquemático do circuito hidráulico do sistema Aquatherm WS 83.

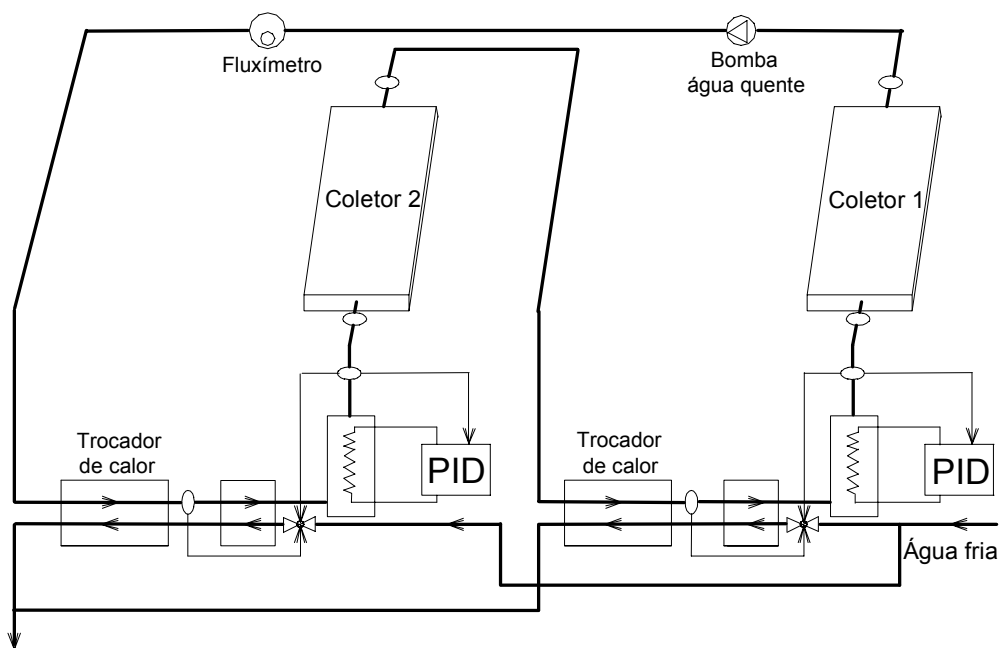


Figura 4.11 - Diagrama esquemático do circuito hidráulico de medição Aquatherm WS 83.

Um sistema de aquisição de dados constituído por *hardware*, *software* e pelos sensores (temperatura, vazão, velocidade do vento e irradiação), construído no próprio Laboratório de Energia Solar é utilizado para medir as grandezas presentes no ensaio. A parte de *hardware* é composta basicamente por um multiplexador, uma fonte de corrente de precisão e um multímetro controlado por um computador. A fonte de corrente fornece uma corrente constante de 1 mA, a qual circula por um laço formado por cinco sensores de bulbo de platina ( $T_{1in}$ ,  $T_{1out}$ ,  $T_{2in}$ ,  $T_{2out}$  e  $T_{amb}$ ) e uma resistência de referência de alta estabilidade térmica. As quedas de tensão sobre esses sensores são lidas pelo multímetro HP34401A depois de selecionadas através de um multiplexador a relés do tipo *reed-switch*, o qual também recebe os sinais de tensão proveniente dos sensores de radiação, vazão e velocidade de vento. Um *software* especialmente desenvolvido para esse sistema controla simultaneamente o multiplexador, através da porta paralela do microcomputador, e o multímetro através de uma interface GPIB. Os sinais dos sensores são convertidos pelo software através de coeficientes de calibração previamente determinados. As medidas são apresentadas em tempo real em forma gráfica e de tabela, ao mesmo tempo em que são enviados ao disco rígido do microcomputador.

A Figura 4.12 apresenta os sensores de radiação solar e de velocidade do vento instalados na bancada Aquatherm, Figura 4.13, no momento de uma medição.

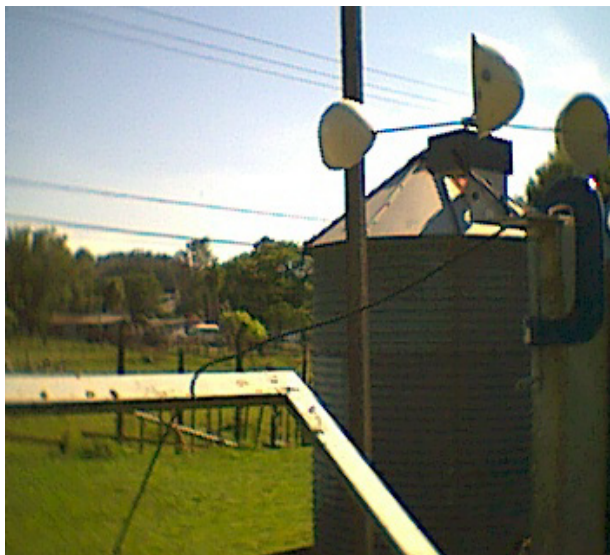


Figura 4.12 (a) Anemômetro utilizado para medir a velocidade do vento.



(b) Piranômetro Eppley PSP utilizado para medir a radiação solar.



Figura 4.13 - Controle de vazão e caixa de conexões para os sensores de temperatura, radiação solar e velocidade do vento.

A Figura 4.14 mostra o esquema do sistema de aquisição de dados. A Figura 4.15 apresenta a tela principal do programa Aquatherm de aquisição de dados em operação, com os registro das temperaturas de entrada e saída dos coletores, a vazão e radiação ao longo do tempo. Também por cada varredura pode-se ler na tela o valor numérico dos referidos parâmetros e da velocidade do vento e temperatura ambiente.

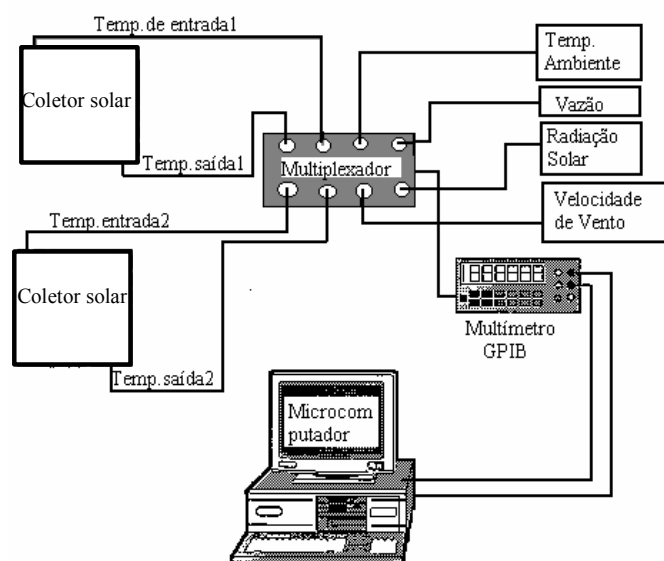


Figura 4.14 - Esquema do sistema de aquisição de dados.

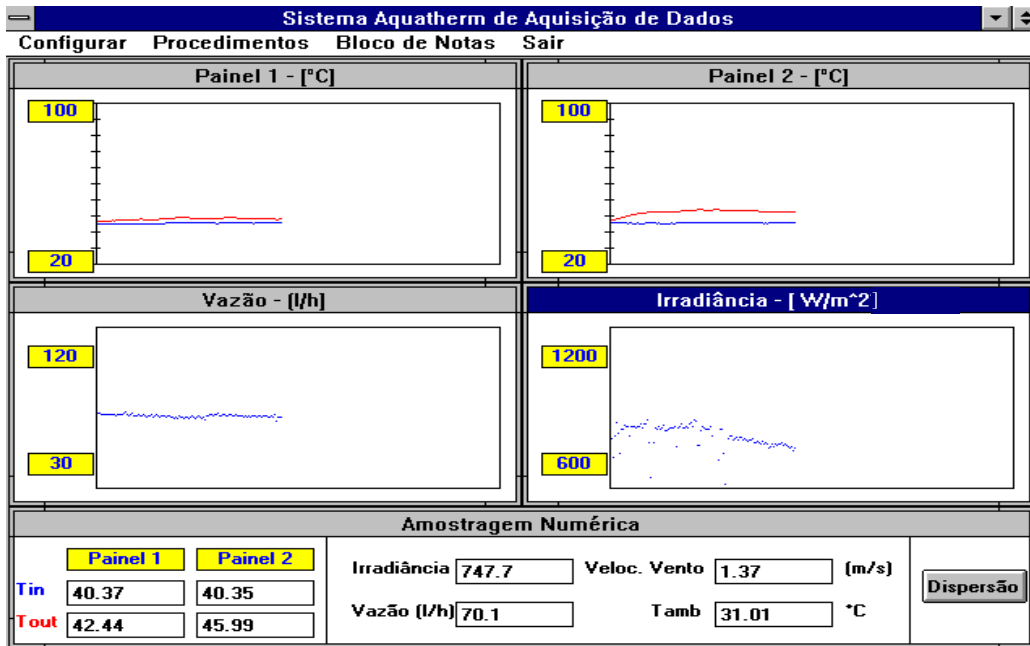


Figura 4.15 - Tela principal do programa Aquatherm de aquisição de dados.

#### 4.2.1 Calibração do Fluxímetro

Um dos problemas enfrentados durante a execução desta Tese foi a necessidade de substituir o fluxímetro do sistema Aquatherm. O sistema dispunha de um medidor de vazão com saída em sinal eletrônico que funcionava de forma volumétrica, dosificando a água que circulava por ele. Este fluxímetro já operava há cerca de 15 anos e vinha sofrendo manutenção seguidamente devido ao desgaste de suas peças internas, até chegar ao ponto de tornar-se não confiável. A solução foi utilizar um medidor de vazão a turbina que o Laboratório de Energia Solar dispunha. Entretanto este fluxímetro, o qual produz um sinal de onda quadrada com frequência proporcional ao valor da vazão, não estava calibrado. Apenas se conhecia o valor em frequência correspondente a uma determinada vazão, através das informações de catálogo, o que era insuficiente.

A calibração foi realizada através de repetidas medidas de vazão mantendo um fluxo uniforme durante alguns minutos e recolhendo a água que circulou durante cada ensaio. A medida da massa de água foi realizada através da pesagem da água acumulada em cada teste, com uma balança digital. A água esteve sempre com temperatura muito próxima aos 20 °C durante o ensaio. A Figura 4.16 apresenta dados obtidos durante este procedimento de calibração. Cada ponto representa a média de cinco medidas realizadas com a mesma vazão.



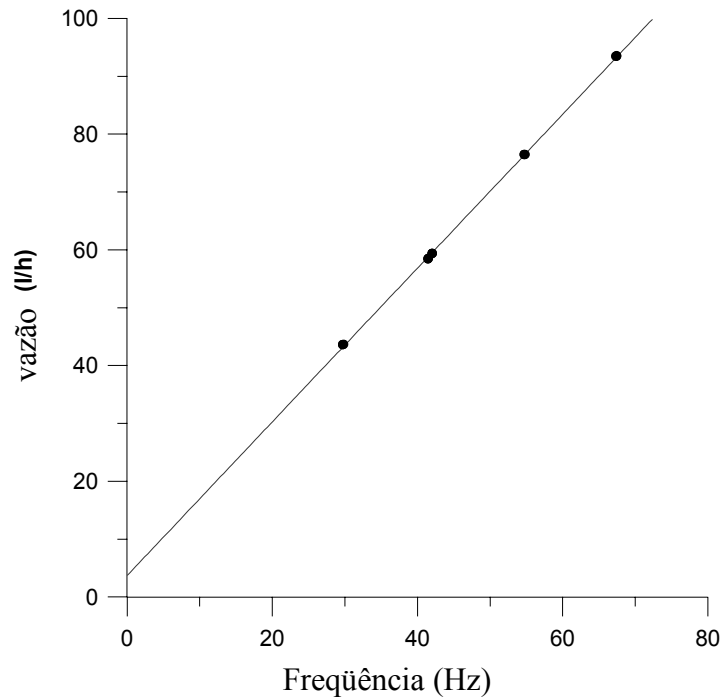


Figura 4.16 - Curva de calibração do fluxímetro utilizado nos ensaios.

Uma segunda tarefa decorrente da mudança do sensor foi a alteração necessária no programa de aquisição de dados, tendo em vista que o novo sensor apresenta uma faixa de sinal diferente da anterior e com outros parâmetros para calibração.

#### 4.2.2 Medidas de Eficiência de Coletores Solares

Conforme foi descrito anteriormente, os coletores foram montados na bancada e adequadamente posicionados para receber a radiação solar. Cada ponto da curva necessita pelo menos quinze minutos de estabilidade térmica, admitindo-se pequenas variações na radiação solar ( $< 50\text{W/m}^2$ ) e quase nenhuma nas temperaturas envolvidas no processo ( $< 1^\circ\text{C}$  para a temperatura do ar ambiente e  $0,3^\circ\text{C}$  para a temperatura do fluido na entrada e saída do coletor). O resultado é que cada ponto leva mais de uma hora para ser obtido, às vezes duas ou três horas de ensaio. Como é condição necessária para o ensaio que o céu esteja limpo, para a obtenção da curva completa são necessários muitos dias.

As medidas foram realizadas de acordo com os procedimentos descritos anteriormente e os resultados obtidos estão exibidos no gráfico apresentado na Figura 4.18.



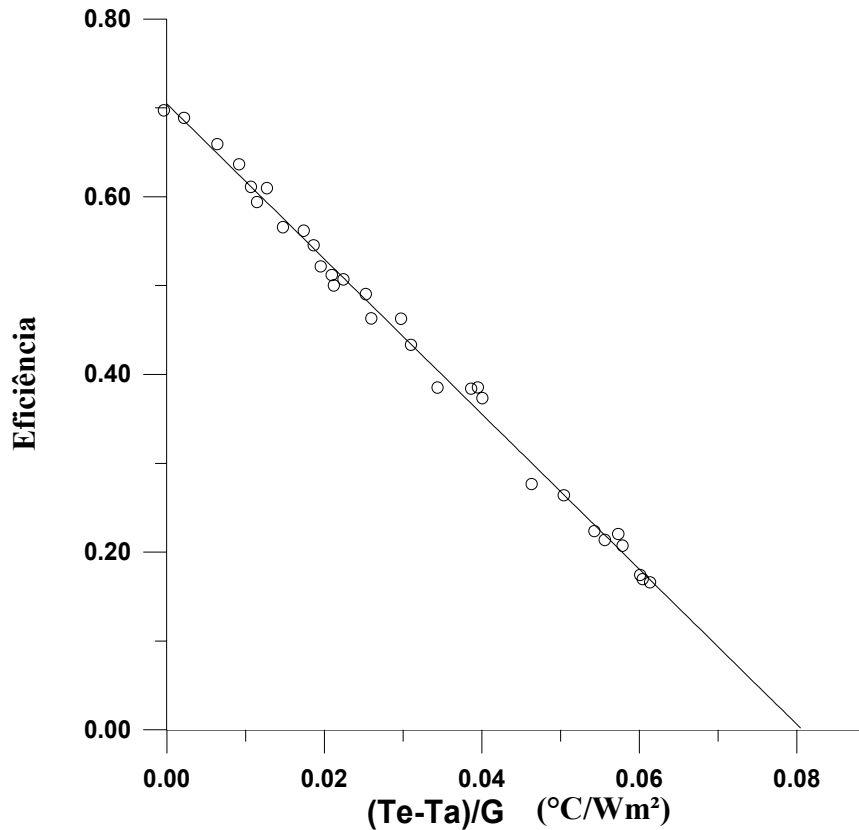


Figura 4.17 - Curva de eficiência instantânea medida dos coletores utilizados.

Como sugere a equação 4.8, as curvas de eficiência são apresentadas utilizando  $\eta$  e  $(T_e - T_a)/G_T$  como respectivamente eixos das ordenadas e das abcissas. A reta resultante intercepta o eixo das ordenadas no ponto  $F_R(\tau\alpha)_e$  e sua inclinação será  $F_R U_L$ .

A curva de eficiência instantânea dos coletores utilizados, experimentalmente determinada, é apresentada na equação 4.9.

$$\eta_c = 0,71 - 8,75 \cdot (T_e - T_a) / G_T \quad (4.9)$$

onde  $T_e$  é a temperatura de entrada no coletor ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_a$  é a temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $G_T$  é a radiação solar incidente no plano dos coletores ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

O programa de computador que visa verificar os valores dos parâmetros ao longo dos ensaios efetuou o cálculo da energia útil fornecida pelo coletor instalado no sistema experimental através da equação 4.10:

$$Q_{uc} = \sum \eta_c G_T \Delta t A_c \quad (4.10)$$

onde  $\eta_c$  é a eficiência instantânea dos coletores,  $G_T$  é a irradiância solar incidente no plano do coletor ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $\Delta t$  é o intervalo de tempo correspondente ao tempo de varredura de cada medição (s) e  $A_c$  é a área dos coletores ( $\text{m}^2$ ).

A variação da energia medida considera a variação da temperatura média dos reservatórios, segundo a equação 4.3, enquanto que a curva da variação da energia calculada é determinada pelas perdas térmicas, com base no coeficiente global de perdas, e a energia solar segundo a equação 4.11.

$$\Delta E_i = m c_p (T_m - T_0) - Q_p + Q_{uc} \quad (4.11)$$

onde  $m$  é a massa de água contida no reservatório (600 kg),  $c_p$  é o calor específico da água ( $\text{kJ}/\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}$ ),  $T_m$  é a temperatura média do reservatório ( $^\circ\text{C}$ ) e  $T_0$  é a temperatura considerada a  $0^\circ\text{C}$ .

Com o objetivo de verificar a validade das equações 4.9 e 4.10 foi efetuada uma comparação com os resultados experimentais do sistema paralelo. A Figura 4.19 indica ser válida a utilização das equações mencionadas. As duas curvas de energia desta figura demonstram o mesmo fenômeno, porém uma é medida e outra é calculada utilizando-se as equações 4.9, 4.10 e 4.11, mostrando a variação de energia interna dos reservatórios dos sistemas, num período de dois dias em que ocorrem perdas térmicas e incidência de radiação solar sobre os coletores.

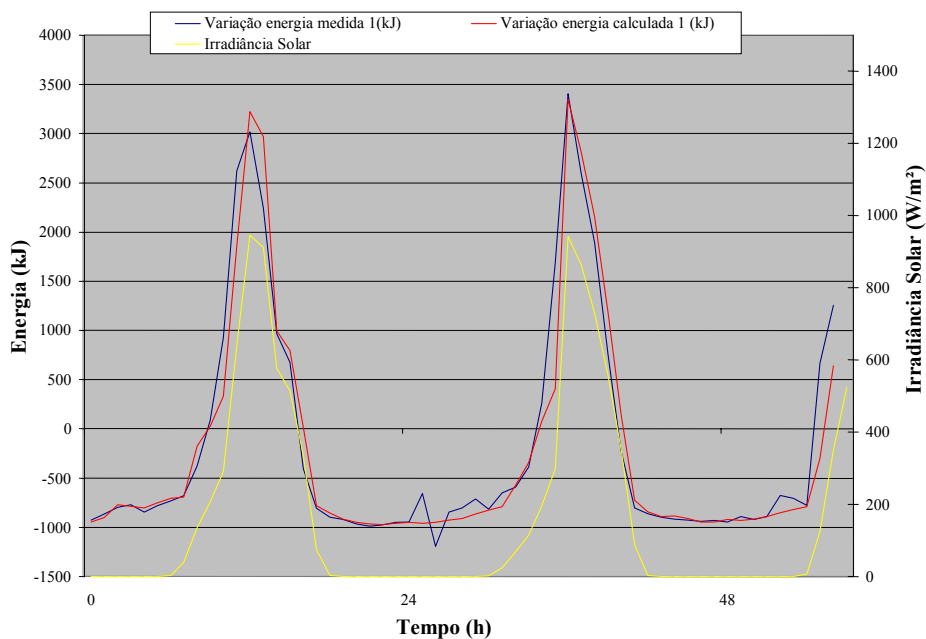


Figura 4.18 – Comparação entre a variação de energia medida e calculada do sistema paralelo.

### 4.3 Sistema de Aquecimento a Gás

Após uma análise sobre qual tipo de aquecedor de passagem seria utilizado como fonte auxiliar de aquecimento, optou-se por um modelo comercial de baixa vazão e acendimento automático, por este apresentar as características necessárias para o bom desempenho do projeto associado ao baixo custo. Efetuou-se então a compra de dois aquecedores de passagem a gás da marca Komeco modelo KO 550S com vazão de 7,5 litros/minuto com acendimento automático e rendimento de 81 % segundo informação do fabricante.

Foi realizada a montagem da rede e dos aquecedores de passagem, apresentados na Figura 4.19, assim como a determinação experimental da potência da motobomba por meio de um teste hidráulico. Este teste consistiu em verificar a menor potência necessária, menor custo, para vencer a perda de carga causada pela serpentina do aquecedor de passagem e proporcionar a pressão de acionamento do queimador. Finalmente optou-se por uma motobomba utilizada na máquina de lavar louça da marca Enxuta, com uma potência de 180 W e custo de R\$ 80,00 (preço em outubro de 2004).



Figura 4.19 – Aquecedores e botijões de 45 kg com válvula de redução de pressão.

### 4.3.1 Determinação do Rendimento do Aquecedor a Gás de Passagem

A norma 8130 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) especifica as características mínimas exigíveis, prescreve as condições de ensaio e a metodologia utilizada para aquecedores de água tipo instantâneo, nos quais são utilizados combustíveis gasosos.

O aquecedor a gás recebe a água de alimentação de um reservatório isolado termicamente, a fim de manter a temperatura entre 20 °C e 25 °C. A água é bombeada por uma motobomba com um dispositivo de variação de vazão. Efetuam-se as medidas da pressão, do volume e da temperatura da água na entrada do aquecedor, medindo-se também a temperatura na saída do aquecedor. No circuito do gás foram utilizados dois botijões de 45 kg conectados a uma válvula de distribuição e redução de pressão (280 mm H<sub>2</sub>O), medindo-se a pressão, temperatura e volume do gás na entrada do aquecedor. Com o valor do volume de gás consumido e o período em que houve consumo, obtém-se a vazão de gás. Também foi registrada a temperatura ambiente, umidade relativa do ar e pressão barométrica.

Com o experimento montado conforme as condições e a metodologia de ensaio prescritas pela norma citada, efetuou-se a aquisição de dados.

#### 4.3.1.1 Condições de Ensaio

Segundo a norma NBR 8130, para a realização do ensaio devem ser tomadas as providências e observados os detalhes a seguir:

- 1) Na realização do ensaio, deve-se evitar que o bocal de escoamento de água fique submerso na água quente escoada.
- 2) A temperatura ambiente do compartimento-padrão deve estar entre 20 °C e 25 °C.
- 3) O rendimento é determinado pelo valor médio de três medições. O aquecedor deve ser ajustado para elevações de temperatura entre 20 °C e 22 °C e a água fria que alimenta o aquecedor deve estar a uma temperatura entre 20 °C e 25 °C.
- 4) Após ter sido alcançada a estabilização das temperaturas de entrada e saída da água, iniciar a medição do consumo de gás e água, e logo em seguida, devem ser registradas as temperaturas da água fria e da água quente.
- 5) Calcular o rendimento pela expressão:

$$\eta = 100 \frac{m_a c_p (T_2 - T_1)}{V_o PCS} \quad (4.12)$$

onde

$\eta$  é o rendimento em %;

$m_a$  é a massa de água obtida durante o período de medição, em quilogramas;

$c_p$  é o calor específico da água, em  $\frac{kJ}{kg^\circ C}$ ;

$T_1$  é a temperatura da água na entrada, em  $^\circ C$ ;

$T_2$  é a temperatura da água na saída, em  $^\circ C$ ;

$V_0$  é o consumo de gás durante o período de medição, em  $m^3$ , nas condições-padrão do PCS (normal metro cúbico)

PCS é o poder calorífico superior, em  $kJ/m^3$ .

A correção do volume de gás para as condições do poder calorífico superior ( $0^\circ C$ , 101,3 kPa (760 mm Hg), seco) é dada pela seguinte equação:

$$V_0 = V_{med} \left( \frac{P_a + P - W}{101,3} \right) \frac{273}{279 + T_g} \quad (4.13)$$

onde:

$V_0$  é o volume do gás, em  $m^3$ , normalizado a  $0^\circ C$  e 101,3 kPa;

$V_{med}$  é o volume do gás medido, em  $m^3$ , nas condições de ensaio;

$P_a$  é a pressão barométrica, em kPa;

$P$  é a pressão de alimentação do gás, em kPa;

$W$  é a pressão de vapor da água, relacionada a  $T_g$ , se for utilizado um medidor úmido de consumo de gás;

$T_g$  é a temperatura do gás em  $^\circ C$ , obtida junto ao medidor de consumo de gás.

Na Figura 4.20 estão indicadas as posições em que os diversos equipamentos e sensores ocuparam no decorrer do ensaio de rendimento do aquecedor a gás de passagem. A posição dos sensores e equipamentos adotou as recomendações apresentadas na norma 8130 da ABNT.

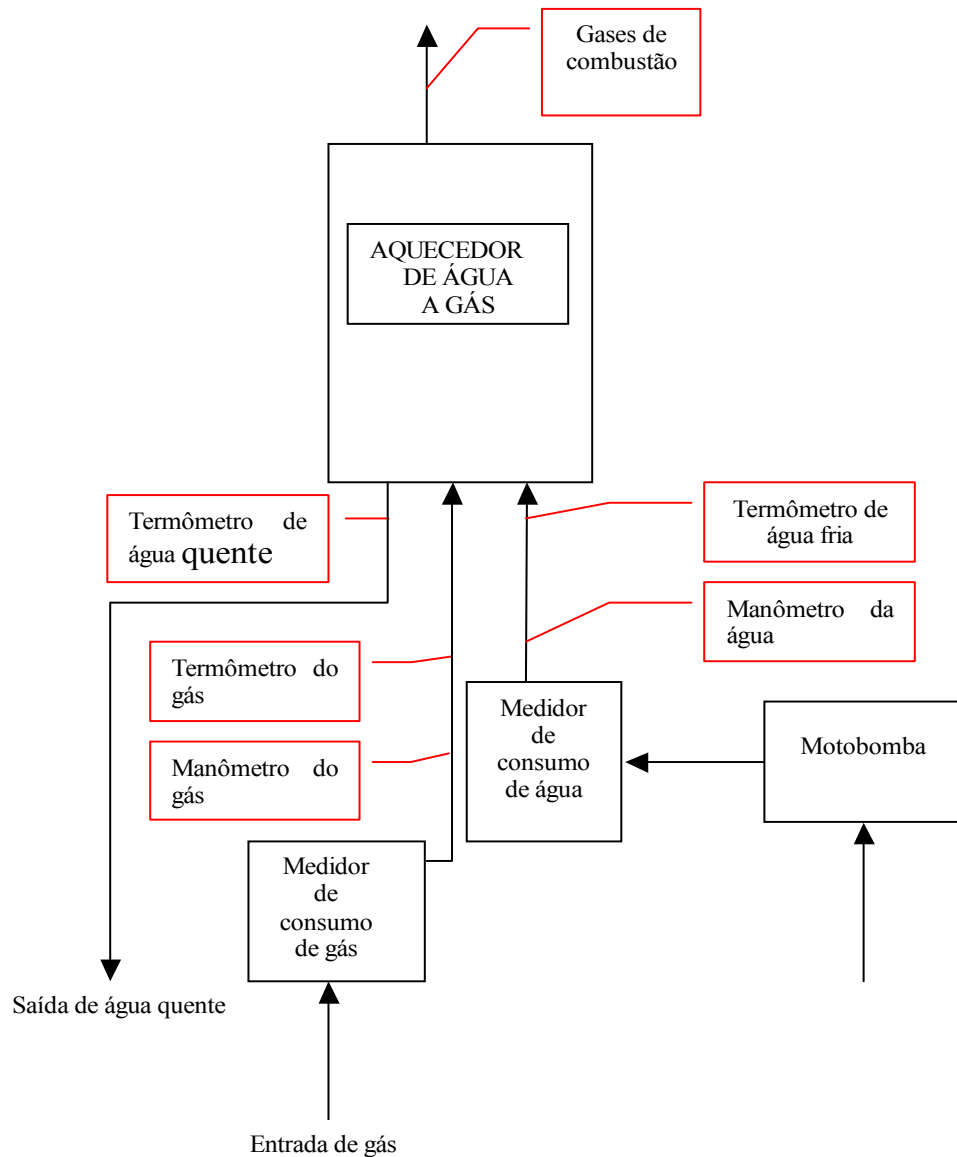


Figura 4.20 - Esquema do ensaio com o posicionamento dos equipamentos.

#### 4.3.1.2 Rendimento e Potência do Aquecedor a Gás

Utilizando-se a metodologia descrita anteriormente, foi calculado um rendimento médio de 81 % para o aquecedor utilizado, o qual concordou com o valor apresentado pelo fabricante. O método e os instrumentos de medição utilizados para a determinação do rendimento do aquecedor de água a gás mostraram-se eficazes.

Nas Figuras 4.21 e 4.22 pode-se verificar que a diferença da temperatura entre a entrada e saída do aquecedor (elevação de temperatura) mantém-se constante quando o mesmo está atuando, assumindo um valor de 30 °C para o sistema paralelo (1) e 24 °C para o sistema série (2). Considerando que estes valores permanecem constantes ao longo de vários dias, é

possível afirmar que a vazão de gás assim como a vazão de água que passa pelo aquecedor também se mantém constantes. Com estas condições, a equação 4.12, pode fornecer o valor da vazão de gás.

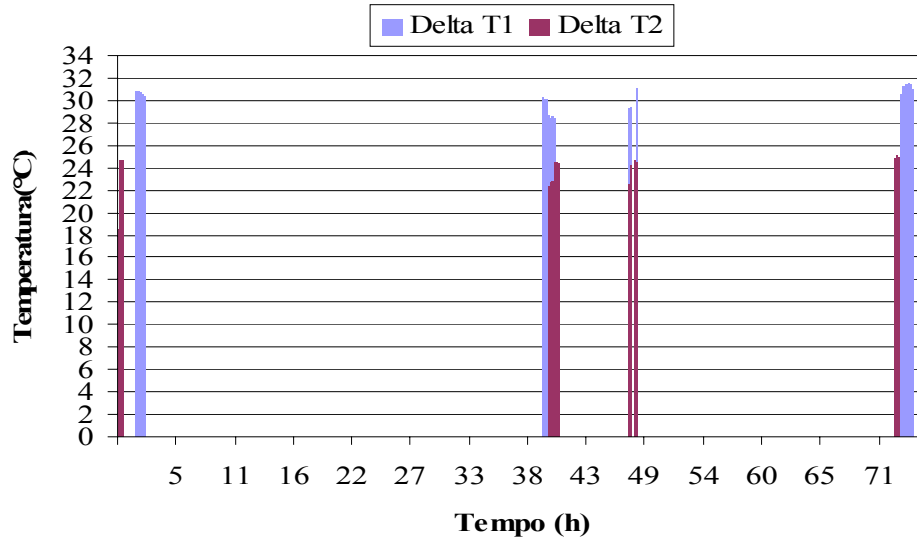


Figura 4.21 – Variação de temperatura entre a entrada e saída dos aquecedores do sistema 1 e 2 (com início em 22/01/04).

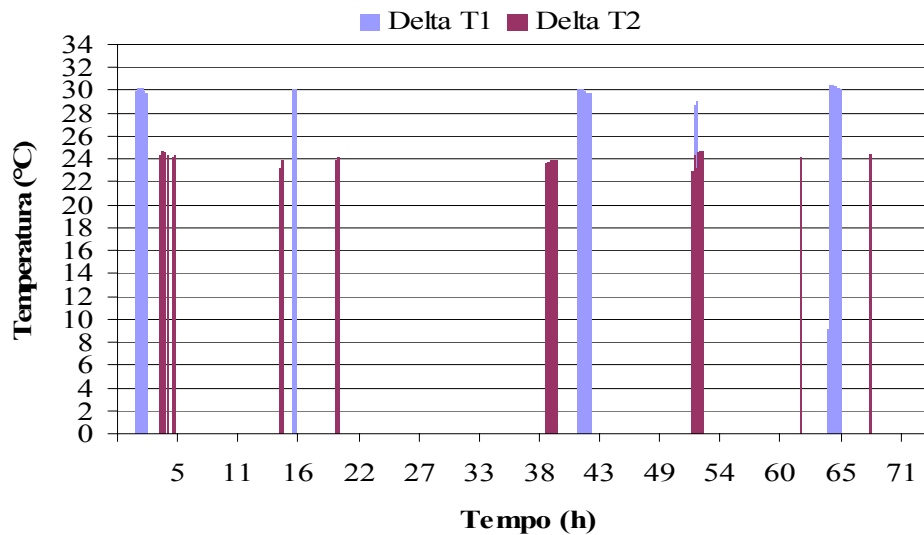


Figura 4.22 – Variação de temperatura entre a entrada e saída dos aquecedores do sistema 1 e 2 (com início em 19/01/04).

A Tabela 4.1 apresenta os valores de algumas constantes associadas aos aquecedores utilizados no sistema de aquecimento de água. A potência do aquecedor pode ser regulada utilizando-se o registro de regulação de vazão de gás, podendo variar entre 8000 W (vazão mínima) e 13000 W (vazão máxima) sem alterar a eficiência.

Tabela 4.1 – Parâmetros do sistema de aquecimento a gás, determinados experimentalmente.

	Vazão de gás (m <sup>3</sup> /h)	Vazão de água (ℓ/min)	Elevação de temperatura (°C)
Sistema Paralelo	0,2275	2,69	32,0
Sistema Série	0,1997	2,95	25,6
Sistema Horizontal	0,2275	2,98	30,1

A Figura 4.23 apresenta uma comparação entre a variação da energia calculada e medida para ambos os sistemas. Neste ensaio foram fechados os registros do circuito de aquecimento dos coletores solares e não ocorre consumo de água quente. Então há somente aporte de energia ao sistema por parte do aquecedor a gás e as perdas térmicas. Os momentos em que os aquecedores a gás estiveram em operação estão indicados por faixas semi-transparentes da cor do sistema correspondente (azul para o sistema 1 e vermelho para o sistema 2). Quando os aquecedores param de operar ocorre uma queda linear de energia associada ao coeficiente global de perdas do sistema.

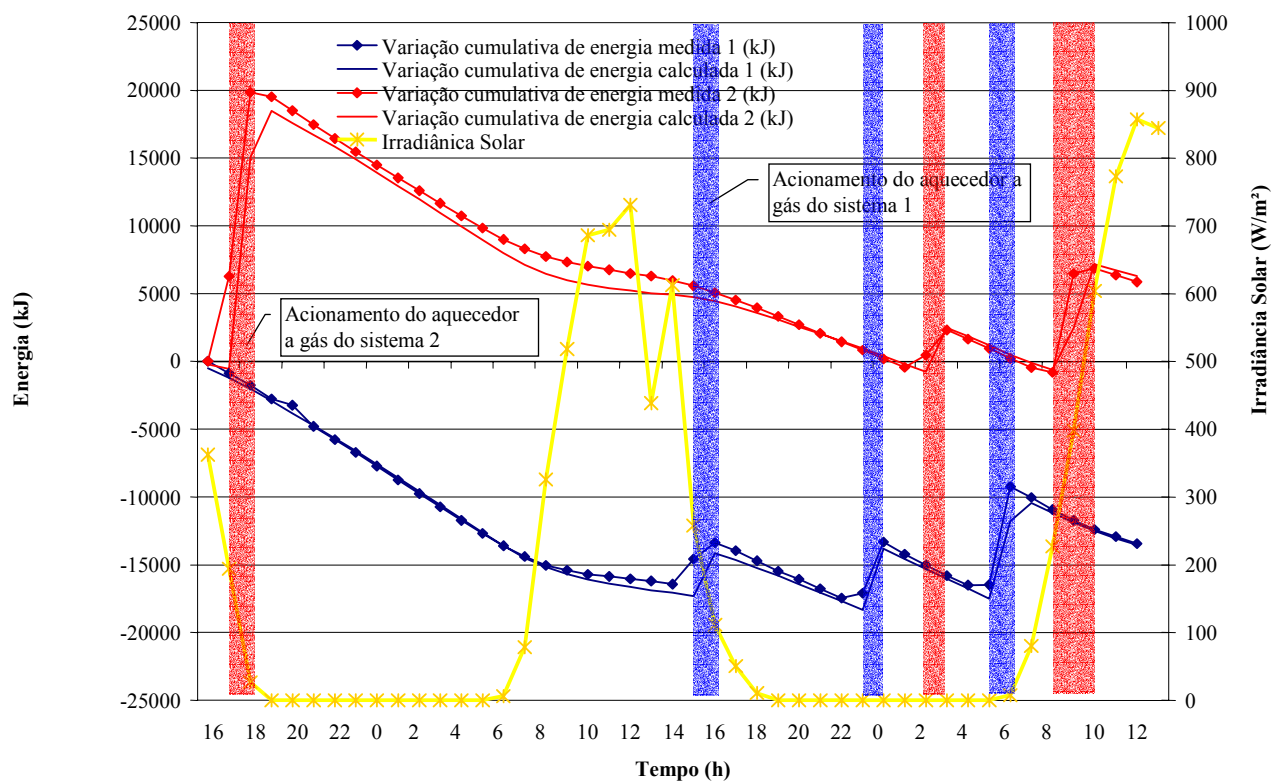


Figura 4.23 – Comparação da variação da energia interna medida e calculada, quando é acionado o aquecedor a gás.



#### 4.3.2 Dispositivo Contra Falhas no Acendimento do Gás no Aquecedor de Passagem

Foi desenvolvido um circuito eletrônico com a função de religar o aquecedor a gás caso este fosse desligado pelo seu tempo limite (20 minutos) ou por algum outro motivo. O princípio utilizado para religar o aquecedor foi cortar a circulação de água por um determinado tempo e após restabelecer a circulação, desligando e religando a bomba elétrica de fornecimento de água.

O circuito é acionado por um sinal de tensão proveniente do aquecedor. Esta tensão tem o valor de 3 V com o aquecedor ligado e 0 V com o mesmo desligado. Este sinal é gerado pelo circuito interno do aquecedor para controle da válvula de passagem do gás. O circuito percebe, através de um sensor, quando não há chama e automaticamente corta a tensão na válvula, impedindo o vazamento de gás. O sinal de controle da válvula é, indiretamente, um sinal de indicação de chama ou de indicação de aquecedor ligado.

O circuito é centrado em dois temporizadores, ambos contidos em um único circuito integrado CD4538. Estes temporizadores são conhecidos como circuitos monoestáveis, ou seja, têm somente um estado estável no qual podem permanecer indefinidamente. O princípio de funcionamento é o seguinte: quando a tensão na entrada passa de 0 para 5 V a saída também passa de 0 para 5 V, permanecendo neste valor por um tempo definido pela relação entre um resistor e um capacitor externos (estado transitório). A passagem da entrada do nível alto para o baixo não muda o estado do circuito. A entrada também não afeta a saída enquanto o temporizador estiver no estado transitório.

No circuito da Figura 4.24, um dos temporizadores é utilizado para controlar o tempo durante o qual a bomba fica desligada (T1). Após a bomba ser religada, o segundo temporizador (T2) impede que T1 volte ao estado transitório, ou seja, que a bomba seja novamente desligada, dando tempo para que o aquecedor seja efetivamente ligado e o sinal de saída deste fique estável em 3 V. O temporizador T2, então volta ao seu estado permanente e tanto a bomba como o aquecedor permanecem ligados. Se quando T2 voltar ao estado permanente o aquecedor não estiver ligado, T1 é novamente acionado e a bomba desligada.

A seção lógica composta por gates NAND (CD4011) recebe o sinal de entrada e, a partir deste, controla ambos os temporizadores. Também faz parte do circuito um optoacoplador (TIL111), que ajusta o sinal de 3 V do aquecedor para 5 V (nível lógico 1 para o restante do circuito) e desacopla eletricamente o aquecedor do circuito, além do conjunto de acionamento da

bomba constituído por um relé e um transistor que fornece a corrente necessária para o seu acionamento.

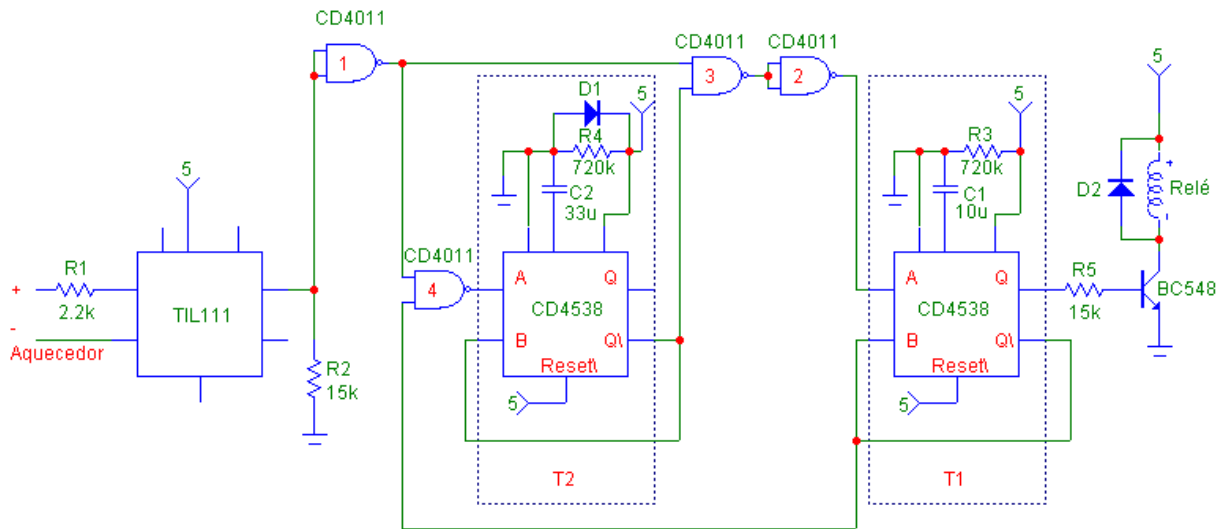


Figura 4.24 – Diagrama esquemático do controlador de religamento do gás.

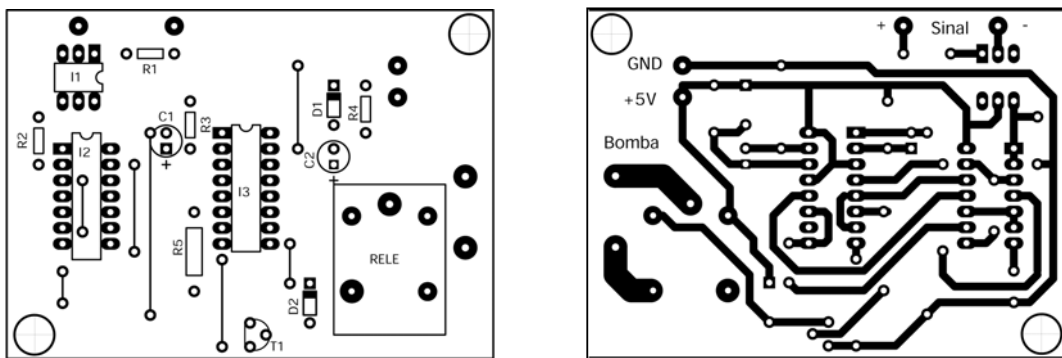


Figura 4.25 - Placa de circuito impresso – vista superior (esq.) e inferior (dir.).

É importante destacar que a bomba é primeiramente acionada por um termostato ajustado para a temperatura desejada. Este termostato é uma chave que corta a alimentação da bomba quando uma temperatura pré-determinada é atingida. O relé controlado pelo circuito fica em série com a chave do termostato, de modo a também poder cortar a alimentação da bomba quando necessário.

A partir do diagrama esquemático do circuito pode-se observar como T2 impede que T1 seja novamente acionado. Quando T2 está no estado transitório não há um caminho do sinal

do aquecedor para T1, pois neste estado a saída Q\ de T2 vale “0”, forçando a saída de NAND1 para “1” independentemente do sinal do aquecedor. A entrada de T1 vale então “0” e quando T2 sair do estado transitório, se o aquecedor não estiver ligado, sobe para “1”, desligando novamente a bomba. Ambos os temporizadores são acionados ao mesmo tempo quando acontece o desligamento do aquecedor e seu sinal cai de 3 para 0 V. Assim, para T2 desempenhar sua função, o tempo do estado transitório dele é ajustado para ser maior do que tempo de T1.

#### 4.4 Válvula de Controle de Consumo (Solenóide)

O consumo de água quente é comandado pelo programa de aquisição de dados e controle, utilizando uma porta paralela do microcomputador que envia um sinal para abrir ou fechar a válvula solenóide. Ao abrir esta válvula inicia-se o escoamento da água quente de consumo numa vazão constante. A determinação da vazão consiste em pesar a água de consumo dividindo este valor pelo tempo em que ocorreu consumo. Os valores das vazões de ambos os sistemas são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Vazão mássica de consumo de água quente dos sistemas, determinadas experimentalmente.

	Sistema paralelo	Sistema série	Sistema horizontal
Vazão mássica de consumo de água quente (kg/min)	5,36	5,41	4,01

A Figura 4.26 apresenta a variação da energia interna do reservatório assim como a diferença entre esta energia interna inicial e a energia associada ao consumo de água quente. Pode-se observar que ao término do consumo a energia interna continua decaindo enquanto que a outra curva (energia interna-energia consumo) estabiliza-se imediatamente. Isto se deve ao fato de que após ocorrer o consumo continua havendo reposição de água, pois a vazão de consumo é superior a vazão de reposição de água. O sensor de consumo indica quando há consumo com o valor 1 e quando não há com 0.

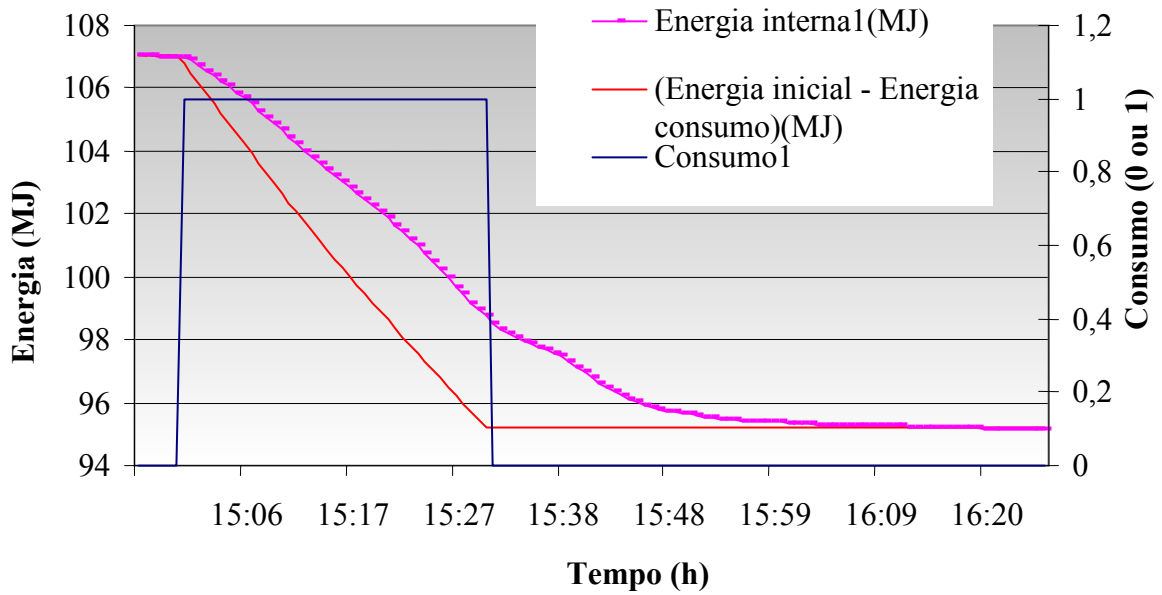


Figura 4.26 – Variação da energia interna devido ao consumo.

A energia associada ao consumo é calculada segundo a equação 4.13.

$$Q_{cons} = \dot{m}_{cons} c_p (T_{cons} - T_{rede}) \Delta t \quad (4.13)$$

onde  $\dot{m}_{cons}$  é a vazão mássica de consumo de água quente (kg/min),  $c_p$  é o calor específico da água (kJ/kg °C),  $T_{cons}$  é a temperatura da água de consumo (°C),  $T_{rede}$  é a temperatura de reposição de água da rede (°C) e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo em que ocorre consumo (min).

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISE DAS INCERTEZAS

Este capítulo apresenta as incertezas das variáveis monitoradas no experimento e a propagação destas incertezas no cálculo do balanço de energia dos sistemas. As variáveis monitoradas foram: temperatura, massa, radiação solar, volume (gás e água) e tempo. As grandezas envolvidas no balanço de energia são: Energia proveniente do gás, Energia associada ao consumo de água quente, Energia fornecida pelos coletores e Energia associada às perdas térmicas. Assumiu-se que as incertezas das variáveis em estudo apresentam um comportamento gaussiano permitindo assim que se utilizasse o método de Kleine e McClintock para efetuar seu cálculo (Holman, 1971).

O planejamento dos experimentos assim como a escolha dos instrumentos utilizados levou em consideração o valor das incertezas das variáveis no dimensionamento e ajustes de parâmetros da experiência.

#### 5.1 Incerteza na Medida dos Sensores de Temperatura

As incertezas das medidas dos sensores de temperatura são obtidas através da combinação de incertezas do sistema de aquisição de dados, incerteza devido à estabilidade dos sensores e incerteza devido à calibração. A equação 5.1 apresenta o cálculo da incerteza da medida da temperatura.

$$W_T = \sqrt{(W_C)^2 + (W_S)^2 + (W_E)^2} \quad (5.1)$$

onde  $W_T$  é a incerteza da medida da temperatura  $W_C$  é a incerteza da calibração,  $W_S$  é a incerteza do sistema de aquisição de dados e  $W_E$  é a incerteza devido a estabilidade dos sensores.

Para os sensores Pt100 considerar-se-ão as seguintes incertezas para uma situação genérica:

- $W_C = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $W_S = 0,006 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $W_E = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$

Usando a equação 5.1 pode-se calcular o efeito global dessas incertezas:

$$W_T = \sqrt{((0,20)^2 + (0,006)^2 + (0,01)^2)} = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para os sensores C.I.s considerar-se-ão as seguintes incertezas para uma situação genérica:

- $W_C = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $W_S = 0,006 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $W_E = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C}$

logo, a incerteza global na medida de temperatura para os CI é:

$$W_T = \sqrt{(0,2)^2 + (0,4)^2 + (0,006)^2} = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## 5.2 Energia Proveniente do Gás

A energia proveniente do gás é calculada segundo a equação 5.2:

$$Q_{\text{gás}} = \dot{Q} t PCS \eta_{aq} \quad (5.2)$$

onde  $\dot{Q}$  é a vazão volumétrica de gás em ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $t$  é o tempo em (s),  $PCS$  é o poder calorífico superior em ( $\text{kJ}/\text{m}^3$ ) e  $\eta_{aq}$  é o rendimento do aquecedor a gás de passagem.

O valor da incerteza da energia proveniente do gás é obtido através da equação 5.3:

$$W_{Q_{\text{gás}}} = \sqrt{\left(\frac{dQ_{\text{gás}}}{d\dot{Q}} W_{\dot{Q}}\right)^2 + \left(\frac{dQ_{\text{gás}}}{dt} W_t\right)^2 + \left(\frac{dQ_{\text{gás}}}{dPCS} W_{PCS}\right)^2 + \left(\frac{dQ_{\text{gás}}}{d\eta_{aq}} W_{\eta_{aq}}\right)^2} \quad (5.3)$$

A vazão volumétrica de gás do aquecedor de passagem é calculada medindo-se o volume do gás e o tempo de operação, segundo a equação 5.4:

$$\dot{Q} = \frac{v}{t} \quad (5.4)$$

onde  $v$  é o volume de gás medido em ( $\text{m}^3$ ) e  $t$  é o tempo em (s).

O equipamento que mede o volume de gás é um medidor de consumo de gás com resolução de  $0,0002 \text{ m}^3$  e o volume de consumo é obtido através da equação 5.5:

$$v = v_f - v_i \quad (5.5)$$

onde o  $v_f$  é a leitura da medida do volume final e  $v_i$  é a leitura da medida do volume inicial.

O valor da incerteza do volume de consumo de gás é calculado pela expressão 5.6. O valor adotado para a incerteza de medição de consumo de gás ( $W_f$  e  $W_i$ ) é a resolução do medidor de consumo de gás.

$$W_v = \sqrt{\left(\frac{dv}{dv_{fim}} W_f\right)^2 + \left(\frac{dv}{dv_{inicio}} W_i\right)^2} \quad (5.6)$$

$$W_v = \sqrt{(1 \cdot 0,0002)^2 + (1 \cdot 0,0002)^2} = \sqrt{2} \cdot 0,0002 = 0,000282 \cong \pm 0,3 \ell$$

O valor da incerteza de tempo medido foi considerado igual a resolução do cronômetro utilizado nas experiências. A resolução do cronômetro é  $0,01 \text{ s}$ , portanto  $W_t$  é igual a  $0,01 \text{ s}$ . O valor da incerteza da vazão pode ser obtido através da equação 5.7. Utilizando-se o tempo de 20 minutos (período médio em que o aquecedor permanece acionado) e o consumo de gás correspondente a este período ( $0,07 \text{ m}^3$ ).

$$W_{\dot{Q}} = \sqrt{\left(\frac{d\dot{Q}}{dv} W_v\right)^2 + \left(\frac{d\dot{Q}}{dt} W_t\right)^2} \quad (5.7)$$

$$W_{\dot{Q}} = \sqrt{\left(\frac{1}{1200} \cdot 0,0003\right)^2 + \left(-4,86 \cdot 10^{-8} \cdot 0,01\right)^2} = \sqrt{6,25 \cdot 10^{-14} + 2,36 \cdot 10^{-19}} = 2,5 \cdot 10^{-7} \frac{m^3}{s}$$

O valor de PCS (Poder Calorífico Superior) do GLP (Gás liquefeito de petróleo) utilizado neste trabalho foi obtido diretamente da distribuidora de gás que abasteceu a experiência (Liquigás), no valor de 104105.8 kJ/m<sup>3</sup>, sem o valor de sua incerteza. Como se sabe que deve haver uma variação neste valor ao longo da produção do GLP, resolveu-se estimar um valor de incerteza para associar ao valor de PCS. A tabela 2.4 apresenta intervalo de valores de PCS que o GLP pode ter no país, equivalente a uma dispersão de  $\pm 16700$  kJ/m<sup>3</sup> em relação a média. A partir desta observação resolveu-se atribuir ao valor fornecido pela distribuidora uma incerteza de  $\pm 8000$  kJ/m<sup>3</sup>( $W_{PCS}$ ).

O valor do rendimento do aquecedor a gás de passagem é de 81%, segundo o fabricante, porém o mesmo não fornece a incerteza do rendimento. Para sua determinação foi realizado o ensaio descrito na seção 4.3.1.1. e aplicado às equações de Kleine e McClintock.

O valor do rendimento do aquecedor é calculado pela equação 5.8:

$$\eta_{aq} = 100 \frac{m_a \times c (T_2 - T_1)}{V_0 \cdot PCS} \quad (5.8)$$

onde  $\eta_{aq}$  é o rendimento,  $m_a$  é a massa de água obtida durante o período de medição (kg),  $c$  é o calor específico da água (kJ/(kg°C)),  $T_1$  é a temperatura da água na entrada (°C),  $T_2$  é a temperatura da água na saída (°C),  $V_0$  é o consumo de gás durante o período da medição do ensaio (m<sup>3</sup>), nas condições-padrão do PCS (normal metro cúbico).

O valor da incerteza ( $W_{\eta}$ ) do rendimento do aquecedor é calculado pela equação 5.9:

$$W_{\eta} = \sqrt{\left(\frac{d\eta_{aq}}{dm} W_m\right)^2 + \left(\frac{d\eta_{aq}}{d\Delta T} W_{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{d\eta_{aq}}{dV_0} W_{V_0}\right)^2 + \left(\frac{d\eta_{aq}}{dPCS} W_{PCS}\right)^2}; \quad (5.9)$$

onde  $W_m$  é a incerteza do valor de massa de água consumida,  $W_{\Delta T}$  é a incerteza do valor de diferença de temperaturas da água na saída e da água na entrada do aquecedor,  $W_{V_0}$  é a incerteza do valor de volume normalizado do gás,  $W_{PCS}$  é a incerteza do valor do PCS do gás.



O valor do volume normalizado do gás é calculado pela seguinte equação 5.10:

$$V_0 = V_{med} \cdot \left( \frac{P_a + P - W}{101,3} \right) \cdot \frac{273}{273 + T_g} \quad (5.10)$$

onde  $V_0$  é o volume do gás, em  $m^3$ , normalizado a  $0^\circ C$  e  $101,3$  kPa;  $V_{med}$  é o volume do gás medido, em  $m^3$ , nas condições de ensaio;  $P_a$  é a pressão barométrica, em kPa;  $P$  é a pressão de alimentação do gás, em kPa;  $W$  é a pressão de vapor da água, relacionada à  $T_g$ , se for utilizado um medidor úmido de consumo de gás;  $T_g$  é a temperatura do gás em  $^\circ C$ , obtida junto ao medidor de consumo de gás.

Considerou-se o valor de  $W$  (pressão de vapor d'água) sendo igual a zero. Devido a  $P_a$  ser dada em mm de coluna de Hg,  $P$  ser dada em mm de coluna de  $H_2O$  e de ter desprezado o  $W$ , a equação 5.10 passa a ser escrita na forma da equação 5.11:

$$V_0 = V_{med} \cdot \left( \frac{0,13332 \cdot P_a + 0,0098 \cdot P}{101,3} \right) \cdot \frac{273}{273 + T_g} \quad (5.11)$$

O valor de incerteza  $W_V$  do volume normalizado do gás  $V_0$  é calculado pela equação 5.12:

$$W_V = \sqrt{\left( \frac{dV_0}{V_{med}} W_{V,med} \right)^2 + \left( \frac{dV_0}{dP_a} W_{P_a} \right)^2 + \left( \frac{dV_0}{dP} W_P \right)^2 + \left( \frac{dV_0}{dT_g} W_{T_g} \right)^2} \quad (5.12)$$

onde  $W_{V,med}$  é a incerteza de volume do gás medido e consumido,  $W_{P_a}$  é a incerteza de pressão barométrica,  $W_P$  é a incerteza da pressão de alimentação do gás e  $W_{T_g}$  é a incerteza da temperatura do gás.

Os valores das incertezas da equação 5.12 são apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores das incertezas utilizados no cálculo da incerteza do volume de gás.

$W_{V,med} (m^3)$	$W_{P_a} (mm \text{ coluna de Hg})$	$W_P (mm \text{ de coluna de } H_2O)$	$W_{T_g} (^\circ C)$
$\pm 0,0003$	$\pm 0,1$	$\pm 3,5$	$\pm 0,2$

As derivadas da equação 5.12 também são apresentadas a seguir:

$$\frac{dV_0}{dV_{med}} = \frac{0,13332 P_a + 0,00980 P}{101,3} \cdot \frac{273}{279 + T_g};$$

$$\frac{dV_0}{dP_a} = V_{med} \cdot \frac{0,13332 + 0,00980 P}{101,3} \cdot \frac{273}{279 + T_g};$$

$$\frac{dV_0}{dP} = V_{med} \cdot \frac{0,13332 \cdot P_a + 0,00980 P}{101,3} \cdot \frac{273}{279 + T_g};$$

$$\frac{dV_0}{dT_g} = -V_{med} \cdot \frac{0,13332 P_a + 0,00980 P}{101,3} \cdot \frac{273}{(273 + T_g)^2};$$

O resultado dos cálculos da incerteza do volume normalizado é  $W_V = \pm 0,0003 m^3$ .

Os valores das incertezas da equação 5.9 foram calculados e são apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Valores das incertezas utilizados no cálculo da incerteza da eficiência do aquecedor.

$W_{PCS} (kJ/m^3)$	$W_{V0} (m^3)$	$W_m (kg)$	$W_{\Delta T} (^\circ C)$
$\pm 8000$	$\pm 0,0003$	$\pm 0,07$	$\pm 0,2$

As derivadas utilizadas na equação 5.9 são apresentadas a seguir:

$$\frac{d\eta}{dm_a} = \frac{C \cdot (\Delta T)}{10 \cdot V_0 \cdot PCS} = \frac{4,186 \cdot (\Delta T)}{10 \cdot 104,1058 \cdot V_0} = 0,0040209 \cdot \frac{(\Delta T)}{V_0};$$

$$\frac{d\eta}{d(\Delta T)} = \frac{m_a \cdot C}{10 \cdot V_0 \cdot PCS} = \frac{m_a \cdot 4,186}{10 \cdot 104,1058 \cdot V_0} = 0,0040209 \cdot \frac{m_a}{V_0};$$

$$\frac{d\eta}{dV_0} = -\frac{m_a \cdot C \cdot (\Delta T)}{10 \cdot V_0^2 \cdot PCS} = \frac{4,186 \cdot m_a \cdot (\Delta T)}{10 \cdot 104,1058 \cdot V_0^2} = -0,0040209 \cdot \frac{m_a \cdot (\Delta T)}{V_0^2},$$

$$\frac{d\eta}{d(PCS)} = -\frac{m_a \cdot C \cdot (\Delta T)}{10 \cdot V_0 \cdot (PCS)^2} = -\frac{4,186 \cdot m_a \cdot (\Delta T)}{10 \cdot 104,1058^2 \cdot V_0} = -0,000038623 \frac{m_a \cdot (\Delta T)}{V_0},$$

Utilizando-se os valores das incertezas das grandezas envolvidas no cálculo da eficiência do aquecedor e o intervalo de ensaio de vinte minutos, obtém-se uma incerteza para a eficiência do aquecedor no valor de 1,3% ( $W_\eta = \pm 1,3 \%$ ).

Após ter determinado o valor de todas as incertezas e ter calculado as derivadas da equação 5.3, obtém-se o valor de 7% para a incerteza da energia do gás. Cabe ressaltar que este valor elevado deve-se ao valor da incerteza do PCS do GLP, pois se considerando esta incerteza igual a zero o valor da incerteza da energia do gás seria de apenas 1,6% devido as incertezas das medidas experimentais.

A incerteza elevada no valor do PCS do GLP está associada ao próprio processo de fabricação do GLP. Por ser um subproduto do refino do petróleo e por não ter um valor comercial elevado, o controle de qualidade das quantidades de seus constituintes não é rigoroso. Cada constituinte tem um Poder Calorífico Superior diferente. Variando o percentual de concentração dos constituintes altera-se o valor do PCS da mistura.

O valor do PCS da mistura também se altera em função das condições de utilização. A temperatura ambiente elevada volatiliza uma quantidade maior dos constituintes mais leves (propanos), com poder calorífico superior maior que os constituintes mais pesados. O percentual de constituintes no interior do botijão não é o mesmo que o extraído devido, além da temperatura ambiente, a vazão de consumo que quanto maior, maior será a variação de pressão e conseqüentemente a variação de temperatura que acarreta no favorecimento na vaporização de um constituinte em detrimento de outro.

### 5.3 Energia Associada ao Coletor Solar

A energia proveniente dos coletores solares é calculada segundo a equação 5.13:

$$Q_{solar} = \eta_{col} G_T A_c \Delta t \quad (5.13)$$

onde  $\eta_{col}$  é a eficiência instantânea dos coletores solares em (%),  $G_T$  é a radiação solar no plano dos coletores em ( $W/m^2$ ),  $A_c$  é a área dos coletores em ( $m^2$ ) e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo considerado em (s).

O valor da incerteza da energia proveniente dos coletores é obtido através da equação 5.14:

$$W_{Q_{solar}} = \sqrt{\left(\frac{dQ_{solar}}{d\eta_{col}} \cdot W_{\eta_{col}}\right)^2 + \left(\frac{dQ_{solar}}{dA_c} \cdot W_{A_c}\right)^2 + \left(\frac{dQ_{solar}}{dG_T} \cdot W_{G_T}\right)^2 + \left(\frac{dQ_{solar}}{d\Delta t} \cdot W_{\Delta t}\right)^2} \quad (5.14)$$

A equação da eficiência instantânea do coletor solar, equação 5.15 e sua incerteza pode ser calculada segundo a equação 5.16:

$$\eta_{col} = A - B \frac{(T_e - T_a)}{G_T} \quad (5.15)$$

Onde  $A = F_R (\tau\alpha)_e$  medido como  $0,71 \pm 0,02$

$$B = F_R U_L \text{ medido como } 8,75 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \pm 0,22$$

$$W_{E\eta_{col}} = \sqrt{\left(\frac{d\eta_{col}}{dT_e} \cdot W_{T_e}\right)^2 + \left(\frac{d\eta_{col}}{dT_a} \cdot W_{T_a}\right)^2 + \left(\frac{d\eta_{col}}{dG_T} \cdot W_{G_T}\right)^2 + \left(\frac{d\eta_{col}}{dA} \cdot W_A\right)^2 + \left(\frac{d\eta_{col}}{dB} \cdot W_B\right)^2} \quad (5.16)$$

As incertezas das temperaturas e da radiação solar incidente no plano dos coletores são apresentadas na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Valores das incertezas utilizados no cálculo da incerteza da eficiência do coletor.

$W_{T_e} (^{\circ}C)$	$W_{T_a} (^{\circ}C)$	$W_{G_T} (\%)$	$W_{\Delta t} (s)$
$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 2,4$	$\pm 0,1$

Tabela 5.4- Valores médios para cálculo da incerteza da energia associada aos coletores solares.

$T_a$ (°C)	$T_e$ (°C)	$G_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$\Delta t$ (s)	$\eta_{col}$ (%)
24	38	600	43200 (12horas)	50

Utilizando dados médios de temperatura de entrada da água no coletor, temperatura ambiente, radiação solar e eficiência instantânea do coletor indicados na tabela 5.4, obtém-se o valor de 4,0 % para a incerteza da energia associada aos coletores solares.

#### 5.4 Energia Associada ao Consumo

A energia associada ao consumo é calculada pela equação 5.17:

$$Q_{cons} = \dot{m}_{cons} c_p (T_{cons} - T_{rede}) \Delta t \quad (5.17)$$

onde  $\dot{m}_{cons}$  é a vazão mássica de consumo de água quente do reservatório em (kg/s),  $T_{cons}$  é a temperatura de consumo de água quente em (°C),  $T_{rede}$  é a temperatura de reposição de água fria proveniente da rede de abastecimento em (°C) e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo em que ocorre consumo em (s).

A incerteza da energia associada ao consumo pode ser determinada com a equação 5.18:

$$W_{Q_{cons}} = \sqrt{\left( \frac{dQ_{cons}}{d\dot{m}_{cons}} W_{\dot{m}_{cons}} \right)^2 + \left( \frac{dQ_{cons}}{dT_{cons}} W_{T_{cons}} \right)^2 + \left( \frac{dQ_{cons}}{dT_{rede}} W_{T_{rede}} \right)^2 + \left( \frac{dQ_{cons}}{d\Delta t} W_{\Delta t} \right)^2} \quad (5.18)$$

A vazão mássica é calculada medindo-se o peso de água obtido ao longo de um período de ensaio, utilizando-se uma balança com resolução de 1 g e um cronômetro com resolução de 1 centésimo de segundo. No procedimento considerou-se um erro de 0,1 s na operação manual de conexão da saída do consumo com o vasilhame de medição. A incerteza da vazão mássica foi estimada em  $10^{-5}$  kg/s. As incertezas das temperaturas de consumo e da água da rede são de 0,2 °C e a incerteza do intervalo de tempo é de 0,1 s.

Utilizando-se dados médios de temperatura de consumo, temperatura da água da rede, tempo de consumo e a vazão mássica de consumo, apresentados na tabela 5.5, obtém-se um valor de 0,81% para a incerteza da energia associada ao consumo de água quente.

Tabela 5.5- Valores médios para cálculos da incerteza da energia associada ao consumo.

$T_{cons} (°C)$	$T_{rede} (°C)$	$\dot{m} (kg/s)$	$\Delta t(s)$
55	20	0,0833	1800

### 5.5 Energia Associada às Perdas Térmicas

A energia associada às perdas térmicas é calculada segundo a equação 5.19:

$$Q_{perdas} = \bar{U}_{Global} (T_{med} - T_a) \Delta t \quad (5.19)$$

onde  $U_{Global}$  é o coeficiente global de perdas térmicas médio do sistema em (W/°C),  $T_{med}$  e  $T_a$  são a temperatura média do reservatório e a temperatura ambiente em (°C) e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo considerado em (s).

A incerteza da energia associada às perdas térmicas pode ser determinada com a equação 5.20:

$$W_{Q_{perdas}} = \sqrt{\left(\frac{dQ_{perdas}}{d\bar{U}_{Global}} W_{U_{Global}}\right)^2 + \left(\frac{dQ_{perdas}}{dT_{med}} W_{T_{med}}\right)^2 + \left(\frac{dQ_{perdas}}{dT_a} W_{T_a}\right)^2 + \left(\frac{dQ_{perdas}}{d\Delta t} W_{\Delta t}\right)^2} \quad (5.20)$$

A incerteza do coeficiente global de perdas térmicas médio do sistema é calculada segundo a equação 5.21:

$$\bar{U}_{Global} = \frac{\Delta Q_{Res}}{(T_{med} - T_a) \Delta t} \quad (5.21)$$

onde  $\Delta Q_{Res}$  é a variação da energia interna do reservatório em (J),  $T_{med}$  e  $T_a$  são a temperatura média do reservatório e a temperatura ambiente em ( $^{\circ}C$ ) e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo considerado em (s).

A incerteza do coeficiente global de perdas térmicas médio pode ser obtida através da equação 5.22.

$$W_{\bar{U}_{Global}} = \sqrt{\left(\frac{d\bar{U}_{Global}}{d\Delta Q_{Res}} W_{\Delta Q_{Res}}\right)^2 + \left(\frac{d\bar{U}_{Global}}{dT_{med}} W_{T_{med}}\right)^2 + \left(\frac{d\bar{U}_{Global}}{dT_a} W_{T_a}\right)^2 + \left(\frac{d\bar{U}_{Global}}{d\Delta t} W_{\Delta t}\right)^2} \quad (5.22)$$

A variação da energia interna é obtida através da equação 5.23:

$$\Delta Q_{Res} = m c_p (T_{mf} - T_{mi}) \quad (5.23)$$

onde  $m$  é a massa de água no interior do reservatório em (kg),  $T_{mf}$  é a temperatura média final em ( $^{\circ}C$ ),  $T_{mi}$  é a temperatura média inicial em ( $^{\circ}C$ ).

A incerteza da variação da energia interna do reservatório é obtida através da equação 5.24:

$$W_{\Delta Q_{Res}} = \sqrt{\left(\frac{d\Delta Q_{res}}{dm} W_m\right)^2 + \left(\frac{d\Delta Q_{res}}{dT_{mf}} W_{T_{mf}}\right)^2 + \left(\frac{d\Delta Q_{res}}{dT_{mi}} W_{T_{mi}}\right)^2} \quad (5.24)$$

A massa de água foi medida com um medidor de vazão com resolução de  $0,05 \text{ dm}^3$ . Adotou-se a resolução do equipamento como sendo a incerteza da massa de água medida. As incertezas utilizadas no cálculo da incerteza da energia associada às perdas térmicas estão indicadas na tabela 5.6 e os valores das variáveis utilizadas na determinação da incerteza são apresentados na tabela 5.7.

Tabela 5.6- Incertezas das variáveis da energia associada às perdas térmicas

$W_{UG} (W/^{\circ}C)$	$W_{T_{med}} (^{\circ}C)$	$W_{T_a} (^{\circ}C)$	$W_{\Delta Q_{Res}} (\%)$	$W_m (kg)$	$W_{T_{mf}} (^{\circ}C)$	$W_{T_{mi}} (^{\circ}C)$
0.06	0.2	0.2	2	0.05	0.2	0.2

Tabela 5.7 – Valores das variáveis utilizadas no cálculo da incerteza da energia associada as perdas térmicas.

$U_G (W/^\circ C)$	$T_{med} (^\circ C)$	$T_a (^\circ C)$	$\Delta_{QRes} (kJ)$	$m (kg)$	$T_{mf} (^\circ C)$	$T_{mi} (^\circ C)$
4	40	25	12558	600	37	42

O valor da incerteza da energia associada às perdas térmicas é de 1,85%.



## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de verificar os parâmetros determinados experimentalmente na caracterização dos componentes, compararam-se os resultados calculados com os resultados medidos experimentalmente realizando um balanço de energia envolvendo as perdas térmicas do sistema e o ganho da conversão da energia solar. O resultado deste equacionamento representa a variação da energia interna do reservatório (calculada) em ambas configurações. A Figura 6.1 apresenta a variação da energia interna medida e calculada. As incertezas das medidas experimentais não foram introduzidas nos gráficos dos resultados experimentais por serem muito pequenas na escala utilizada.

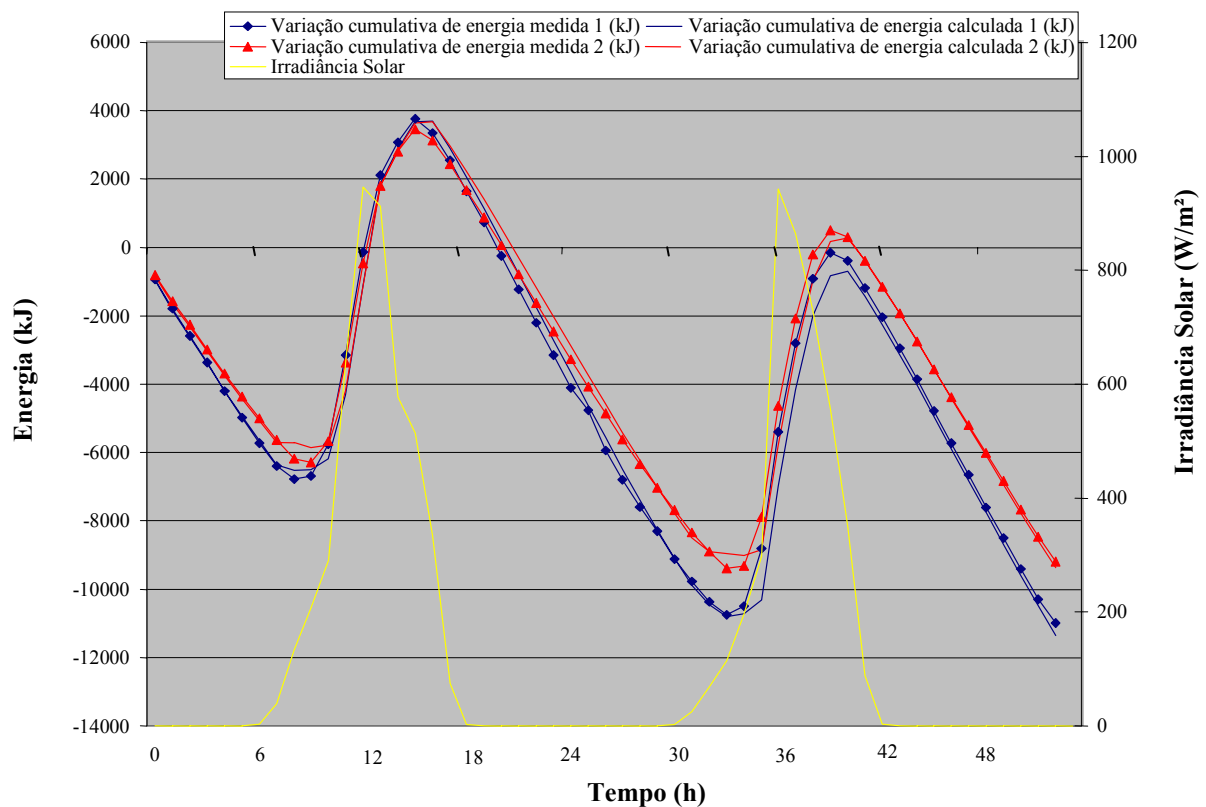


Figura 6.1 – Variação da energia interna dos reservatórios quando os sistemas operaram apenas com energia solar, utilizando coeficiente global de perdas do sistema igual a 10 W/°C para o sistema 1 (paralelo) e 8,5 W/°C para o sistema 2 (série).

Uma variação de 5% no valor dos coeficientes globais de perdas acarreta grandes diferenças no valor das perdas térmicas, desequilibrando o balanço de energia em períodos longos de ensaio. As Figuras 6.1 e 6.2 indicam esta variação ao longo de dois dias de ensaio (iniciando em 13 de setembro de 2003), considerando apenas a influência da radiação solar e das perdas térmicas.

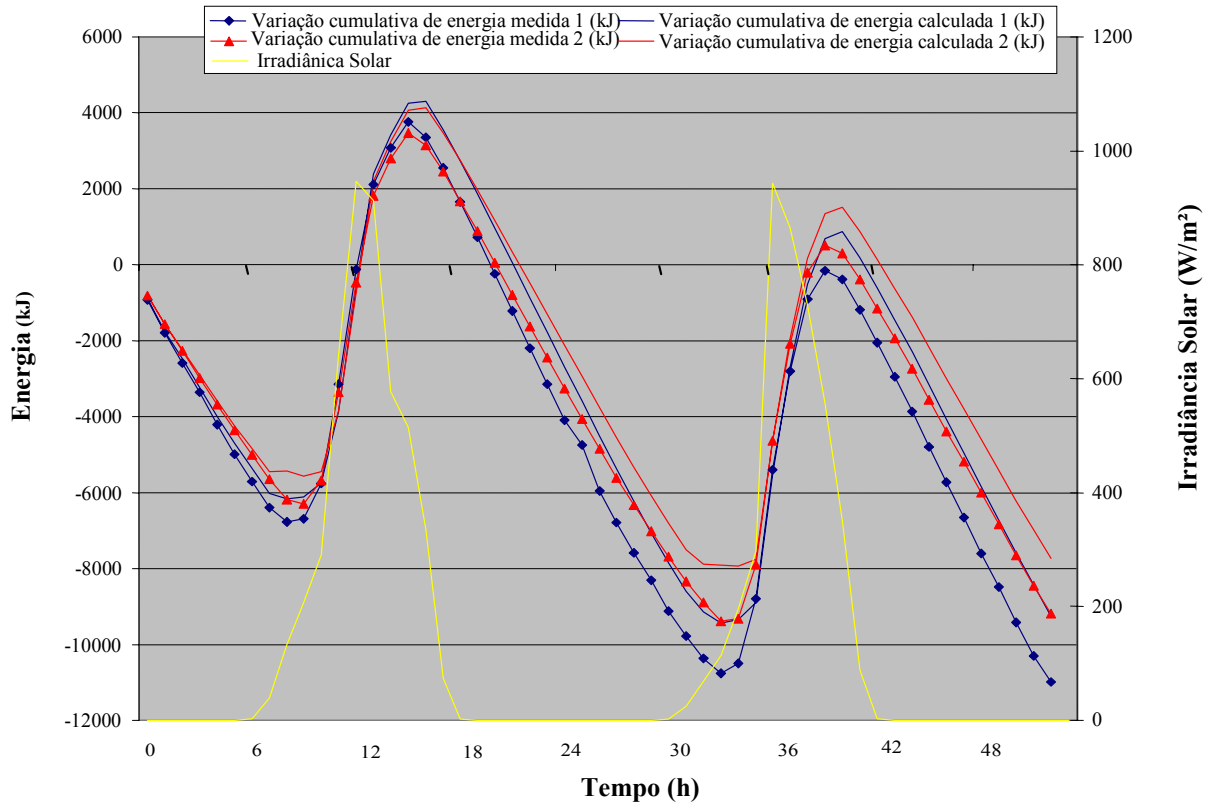


Figura 6.2 – Variação da energia interna dos sistemas de aquecimento apenas com energia solar, utilizando coeficiente global de perdas de  $9,5 \text{ W}/^\circ\text{C}$  para o sistema 1 e  $8,1 \text{ W}/^\circ\text{C}$  para o sistema 2.

A Figura 6.3 apresenta a variação do valor da relação entre potência térmica transferida e diferença média de temperatura do reservatório para o ambiente dos sistemas em uma sequência de dias maior. Esta variação é da ordem de 5% para esta sequência e o valor médio obtido para os coeficientes globais de perdas térmicas são de  $9,77 \text{ W}/^\circ\text{C}$  para o sistema paralelo e  $8,24 \text{ W}/^\circ\text{C}$  para o sistema série. Estes valores diferem dos apresentados para a sequência de três dias em 2,5% (figura 6.1).

Utiliza-se o artifício de cálculo de zerar a relação entre a potência transferida e a diferença média de temperatura quando a irradiância solar é diferente de zero.

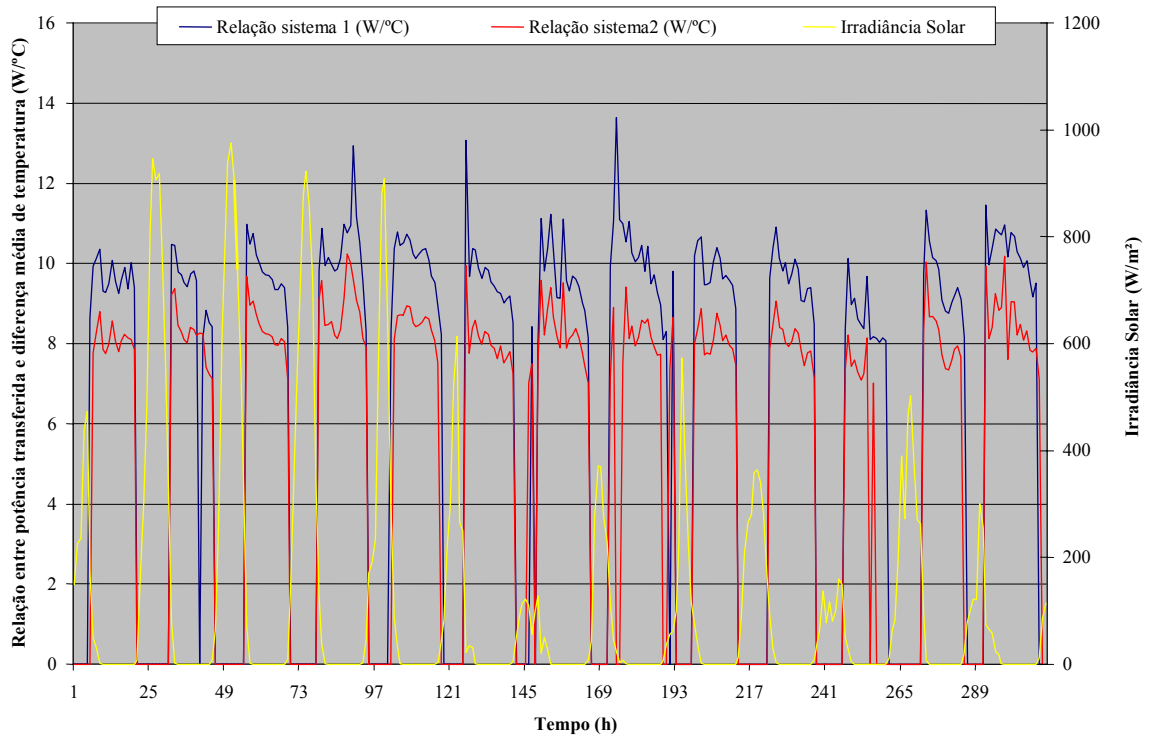


Figura 6.3- Variação da relação entre potência transferida e diferença média de temperatura entre o interior do reservatório e o ambiente do sistema paralelo e série.

A Figura 6.4 mostra a variação de energia interna dos reservatórios dos sistemas, utilizando-se os novos coeficientes globais de perdas numa seqüência de 13 dias, iniciando em 16 de setembro de 2003.

A Figura 6.5 apresenta a mesma seqüência de dias da Figura 6.4, porém utilizando os valores dos coeficientes obtidos na seqüência de três dias (figura 6.1). Percebe-se um distanciamento dos valores da variação da energia calculada com os valores obtidos experimentalmente. A diferença entre as Figuras 6.4 e 6.5 é atribuída a diferença de incidência de ventos que influenciam o coeficiente global de perdas térmicas, visto que os reservatórios encontram-se expostos ao tempo (a céu aberto). Cabe salientar que a incerteza no cálculo da energia interna dos reservatórios é da ordem de 500 kJ.

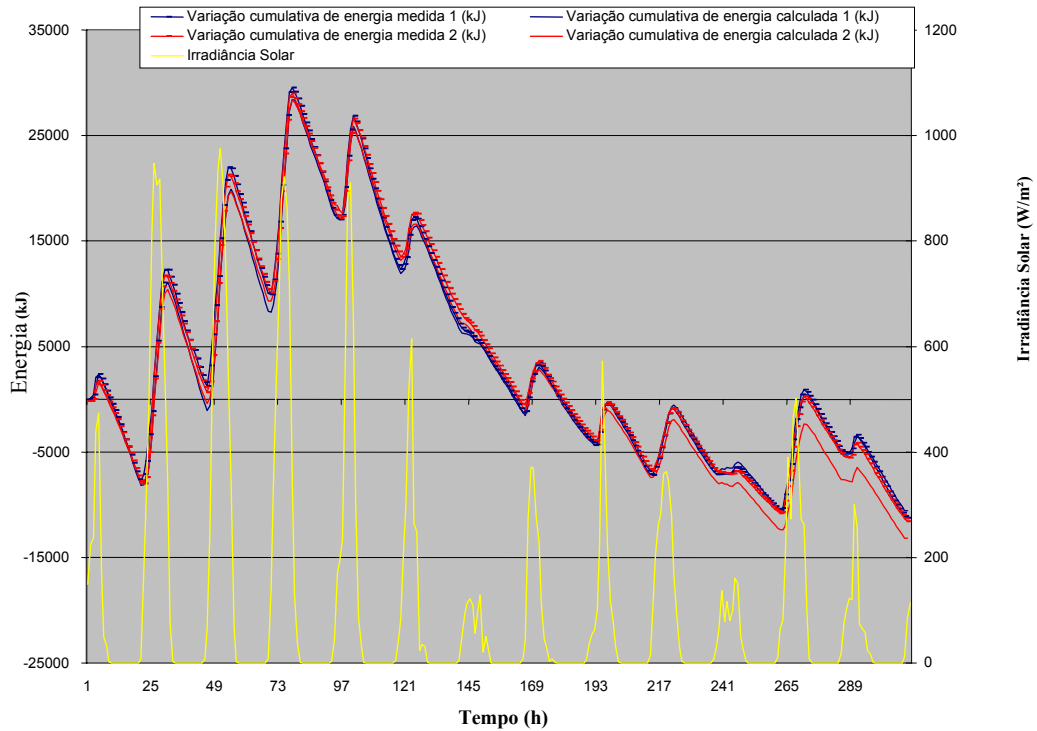


Figura 6.4 – Variação da energia interna dos reservatórios dos sistemas, considerando as perdas térmicas e a energia solar, utilizando coeficiente global de perdas de  $9,77 \text{ W/}^\circ\text{C}$  para o sistema 1 e  $8,24 \text{ W/}^\circ\text{C}$  para o sistema 2.

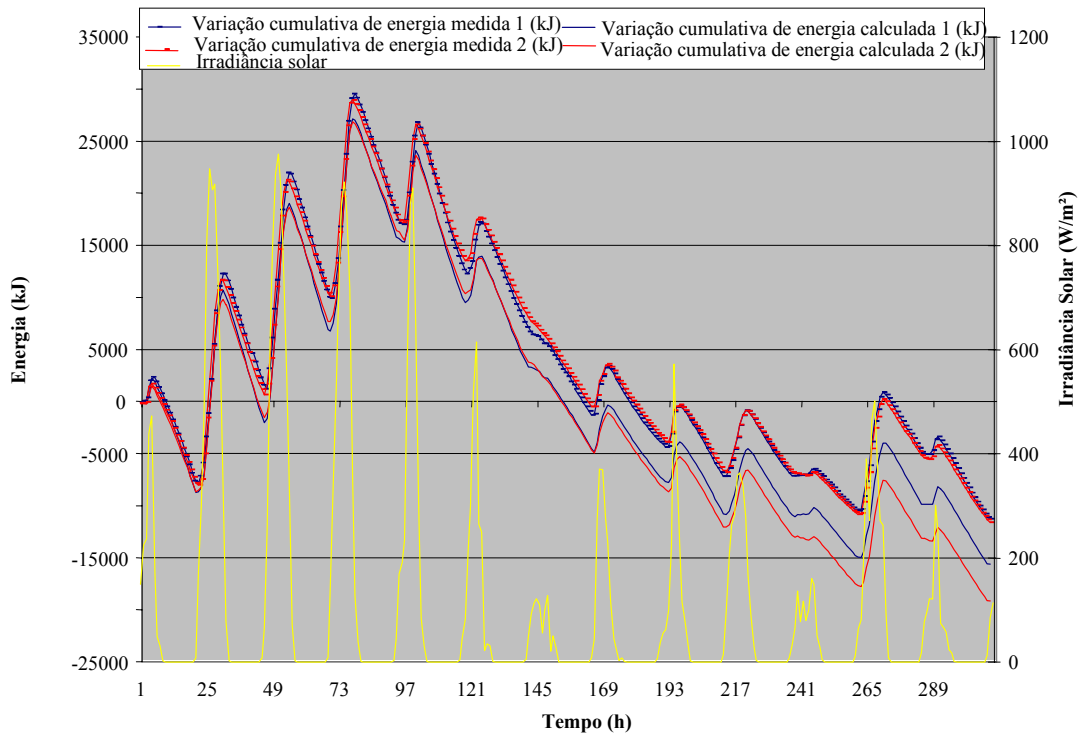


Figura 6.5 - Variação da energia interna dos reservatórios dos sistemas, considerando as perdas térmicas e a energia solar, utilizando coeficiente global de perdas de  $9,5 \text{ W/}^\circ\text{C}$  para o sistema 1 e  $8,1 \text{ W/}^\circ\text{C}$  para o sistema 2.

## 6.1 Comportamento dos Sistemas

A água no interior de ambos os reservatórios foi aquecida até a temperatura de 45 °C de forma homogênea (sem estratificação) iniciando-se então a aquisição de dados. A Figura 6.6 apresenta o perfil de temperaturas médias em cada reservatório, assim como as perdas térmicas e a temperatura do ar ambiente. Pode-se observar que as temperaturas médias de ambos os reservatórios são idênticas no resfriamento do primeiro dia (até as 3 horas). Quando o termostato aciona o aquecedor a gás em ambos os sistemas, devido à diferença entre as configurações, o sistema paralelo apresenta um incremento maior da temperatura média resultando em perdas térmicas também maiores.

Os coletores solares fornecem energia para o reservatório durante o dia provocando um suave e contínuo aumento da temperatura em ambos os sistemas. Durante este período a temperatura ambiente é normalmente mais elevada e as perdas térmicas diminuem. O inverso ocorre à noite, quando a temperatura ambiente decai rapidamente aumentando as perdas térmicas. Pode-se observar que durante o dia a temperatura média do sistema série é maior do que a do sistema paralelo, indicando um ganho de energia solar superior na configuração série.

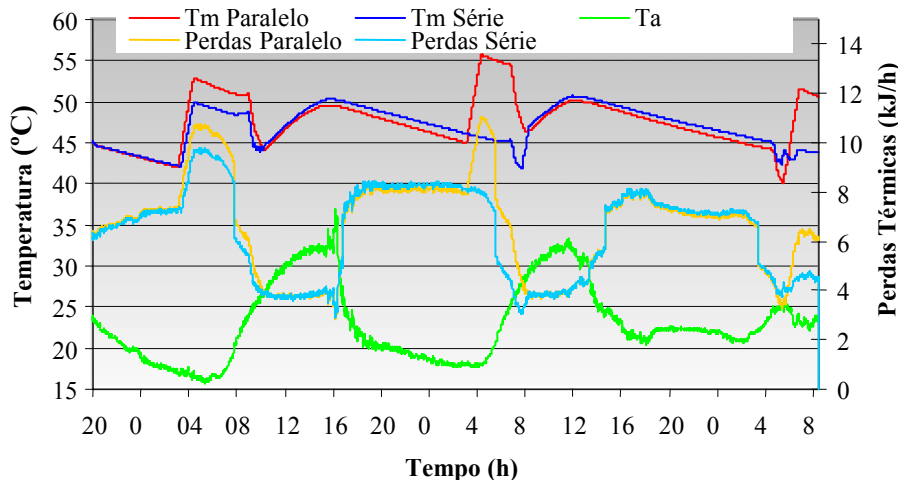


Figura 6.6 - Temperatura média da água no interior dos reservatórios, temperatura ambiente e perdas térmicas ao longo de um período de três dias.

## 6.2 Influência do Aquecedor a Gás nos Perfis de Temperaturas

A temperatura de ajuste assim como a posição do termostato que controla o acionamento do gás são os mesmos para os sistemas, respectivamente 46 °C e 66 cm do fundo do reservatório (correspondendo à camada 5).

As Figuras 6.7 e 6.8 representam um dos períodos em que o aquecedor a gás entra em funcionamento e os efeitos no perfil de temperaturas para cada configuração.

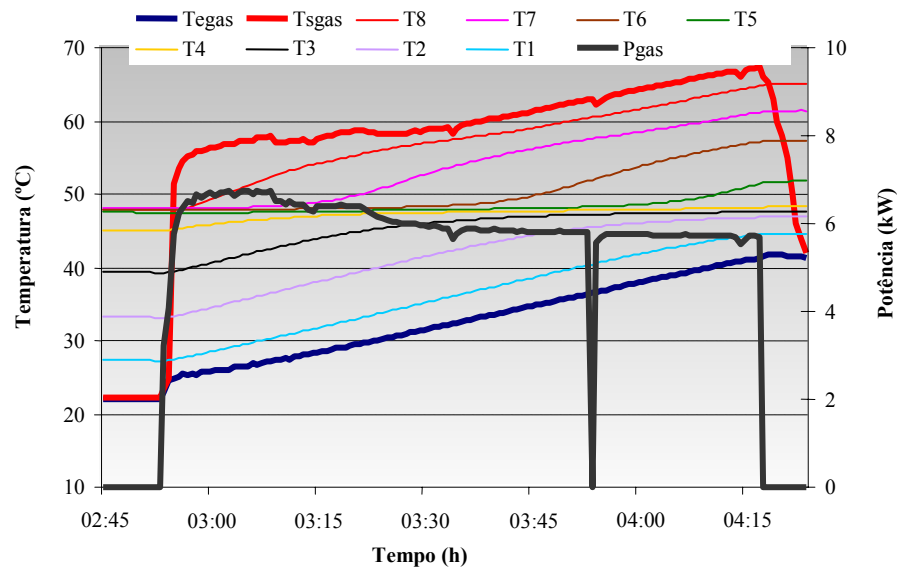


Figura 6.7 - Perfis de temperatura da água do reservatório do sistema paralelo quando o aquecedor é acionado. Utiliza-se Tegas para a temperatura da água na entrada do aquecedor a gás, Tsgas para a temperatura da água na saída do aquecedor a gás, Pgas para a potência fornecida pelo aquecedor a gás e T1 a T8 para a temperatura da água nas camadas de 1 a 8.

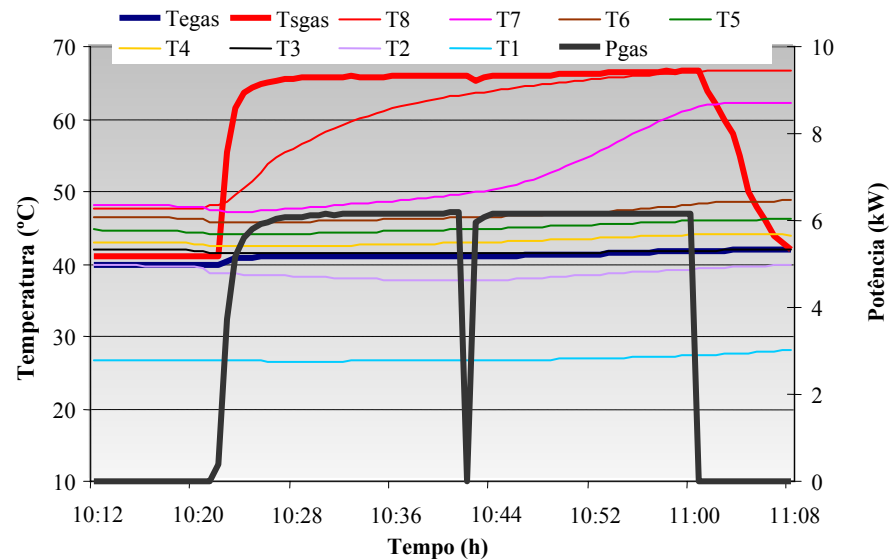


Figura 6.8 - Perfis de temperaturas da água do reservatório do sistema série quando o aquecedor é acionado. Utiliza-se Tegas para a temperatura da água na entrada do aquecedor a gás, Tsgas para a temperatura da água na saída do aquecedor a gás, Pgas para a potência fornecida pelo aquecedor a gás e T1 a T8 para a temperatura da água nas camadas de 1 a 8.

Na Figura 6.7 pode-se observar um incremento na temperatura no interior do reservatório, mantendo uma diferença de temperatura constante entre as camadas do sistema paralelo, enquanto que a Figura 6.8 mostra que apenas as temperaturas das camadas 7 e 8 da configuração série apresentam um incremento significativo. Neste caso a estratificação de temperaturas foi atingida, com uma diferença de temperaturas mais pronunciada entre as camadas superiores e inferiores.

A potência dos aquecedores a gás em ambas as figuras mantêm-se na faixa de 6 kW ao longo dos ensaios realizados. A queda brusca que ocorre na curva da potência dos aquecedores é devida ao sistema de proteção que interrompe o fluxo de gás a cada 20 minutos de operação dos mesmos.

Nas Figuras 6.9 e 6.10 são representados os perfis de temperaturas da água no interior dos reservatórios ao longo do período ensaiado (três dias), quando ocorre consumo, aquecimento com gás e com os coletores solares. Ambos os sistemas partem com condições iniciais muito próximas e ajustes de termostato e horário de consumo idêntico

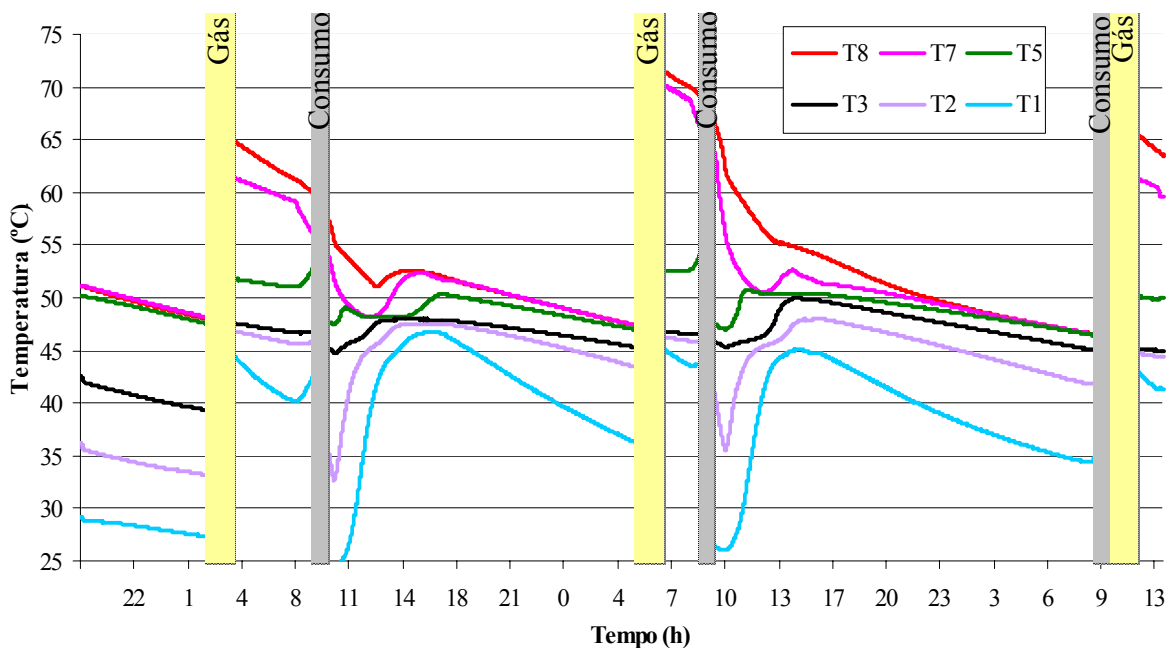


Figura 6.9 – Perfis de temperaturas do sistema Paralelo ao longo de três dias de ensaio, com todos os componentes atuando de forma integrada.

A estratificação de temperaturas atingida no interior do reservatório do sistema série é maior que no sistema paralelo. Esta distribuição de temperaturas é desejável, estando a água mais quente para consumo, localizada nas camadas superiores e a água mais fria que vai para os coletores solares, localizada no fundo. Quando ocorre consumo de água quente pode-se perceber em ambos os sistemas uma queda brusca da temperatura da água correspondente a camada T1 afetando em menor proporção às camadas T2 e T3. Isto se deve a entrada da água de reposição vinda da rede em temperatura próxima à do ar ambiente.

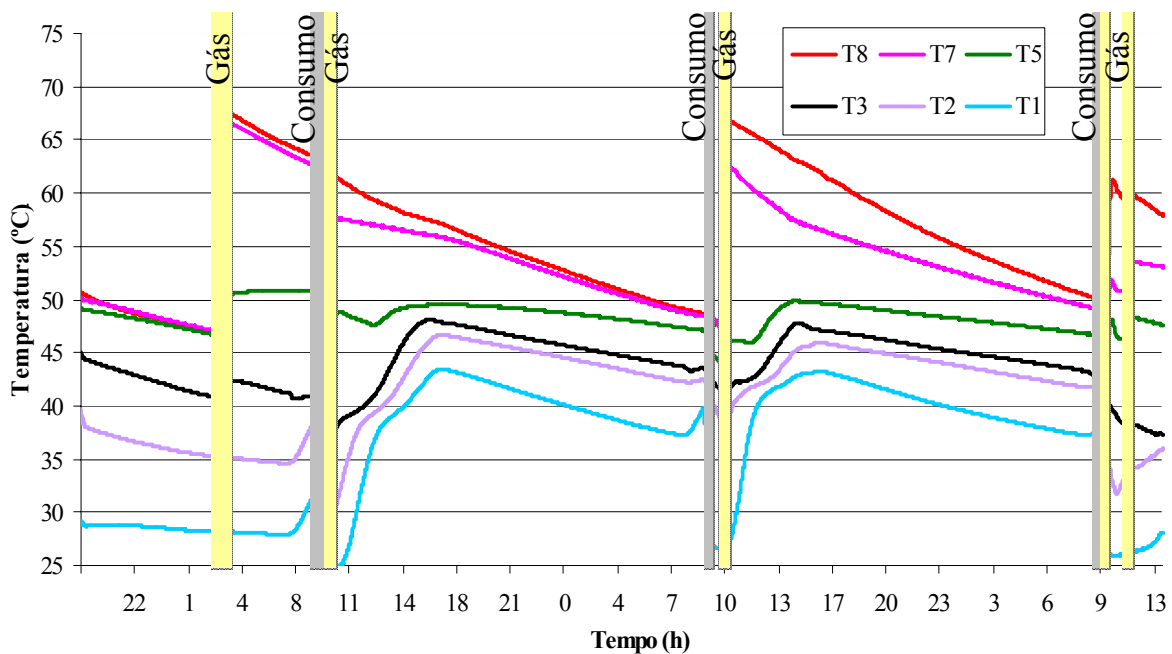


Figura 6.10 – Perfis de temperaturas do sistema Série ao longo de três dias de ensaio, com todos os componentes atuando de forma integrada.

### 6.3 Influência da Configuração Sobre a Temperatura de Operação dos Coletores

Para ambos os sistemas a temperatura de entrada da água nos coletores provém do fundo dos reservatórios, onde as temperaturas são inferiores. Na Figura 6.11 pode-se observar a variação da temperatura de entrada dos coletores para cada sistema.

Visto que a temperatura de entrada do coletor do sistema série é inferior a do sistema paralelo e as demais variáveis da equação 4.9 são as mesmas para ambos os sistemas, confirma-se um ganho superior de energia proveniente dos coletores solares no sistema série.



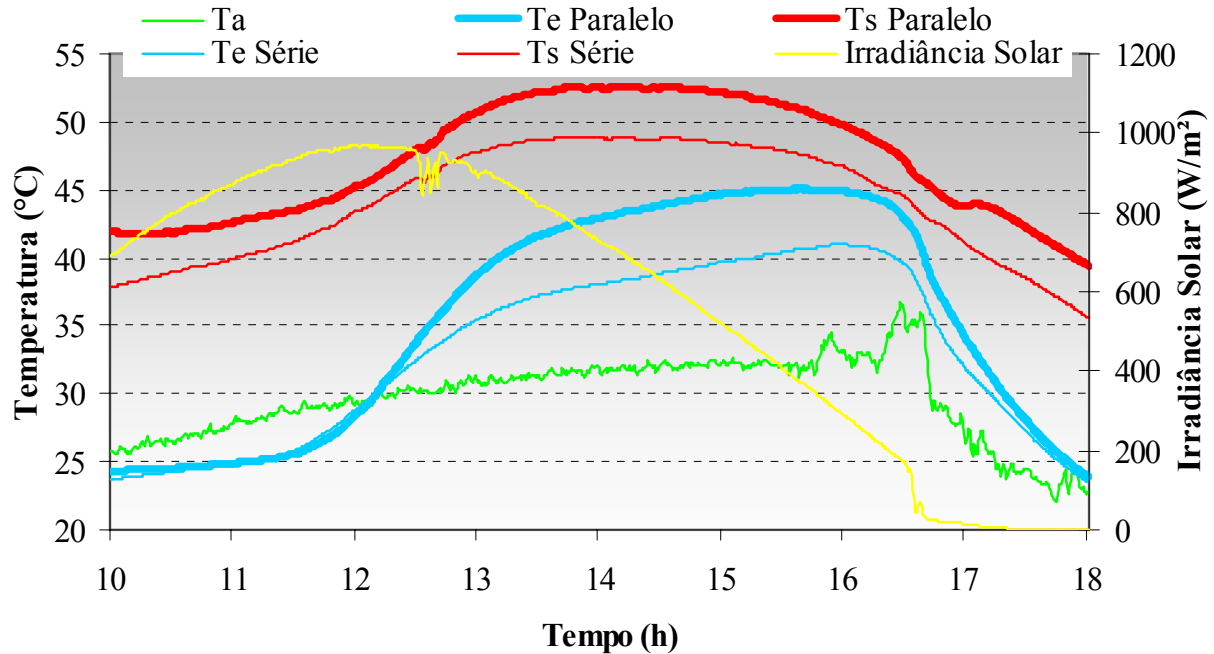


Figura 6.11 - Temperaturas da água na entrada e saída dos coletores solares de ambos os sistemas.

#### 6.4 Influência do Consumo no Perfil de Temperaturas

As Figuras 6.12 e 6.13 mostram a influência que o consumo de água quente e a reposição de água fria ocasionam no perfil de temperaturas no interior do reservatório de cada sistema, quando estes operam com gás e coletores solares. Neste ensaio o consumo de água quente inicia-se às 9h20 minutos e tem uma duração de 30 minutos nos dois sistemas. A base de tempo igual para os sistemas acarreta uma diferença de 14% na energia associada ao consumo entre os sistemas, como indicado na Tabela 6.1.

Pode-se observar na Figura 6.12 que a temperatura de consumo do sistema paralelo mantém-se constante ao longo do período de consumo. O mesmo já não ocorre para o sistema série, como indica a Figura 6.13, devido ao elevado gradiente de temperaturas existente entre as camadas deste sistema.

A temperatura da água da rede é medida com um sensor posicionado na tubulação próximo ao reservatório. Na temperatura medida por este sensor tende a estabilizar com a temperatura da base do reservatório nos períodos em que não ocorre consumo de água quente e portanto não ocorre reposição de água da rede. A medida desta temperatura só é utilizada quando há consumo de água quente, sendo neste mesmo momento que ocorre a reposição da água da

rede. Isto explica porque ocorre uma grande variação na temperatura  $T_{rede}$  no momento que antecedem o período de consumo.

A energia fornecida pelo aquecedor a gás foi significativamente maior no sistema paralelo do que no sistema série. A energia associada ao consumo de água quente do sistema paralelo também foi superior, mas não na mesma razão do consumo de gás.

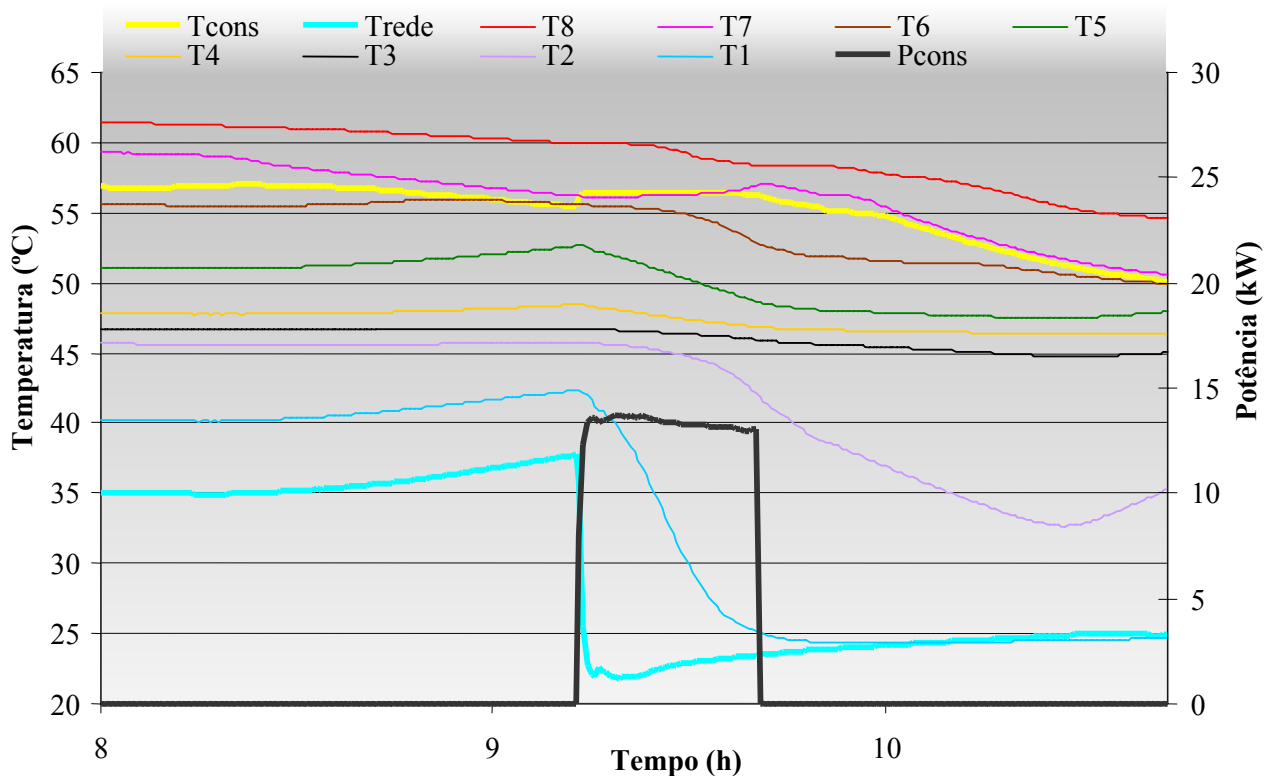


Figura 6.12 – Influência do consumo no perfil de temperaturas do sistema paralelo. São utilizados  $T_{cons}$  para a temperatura de consumo,  $T_{rede}$  para a temperatura do sensor da água da rede (água de reposição) e  $P_{cons}$  para a potência associada ao consumo de água quente.

Na Figura 6.13 pode-se observar uma oscilação na temperatura correspondente a quinta camada ( $T_5$ ), esta oscilação é ocasionada pelos acionamentos sucessivos do aquecedor a gás neste período, como indicado pelos intervalos em que a bomba2, referente ao sistema série, foi acionada na Figura 6.14.

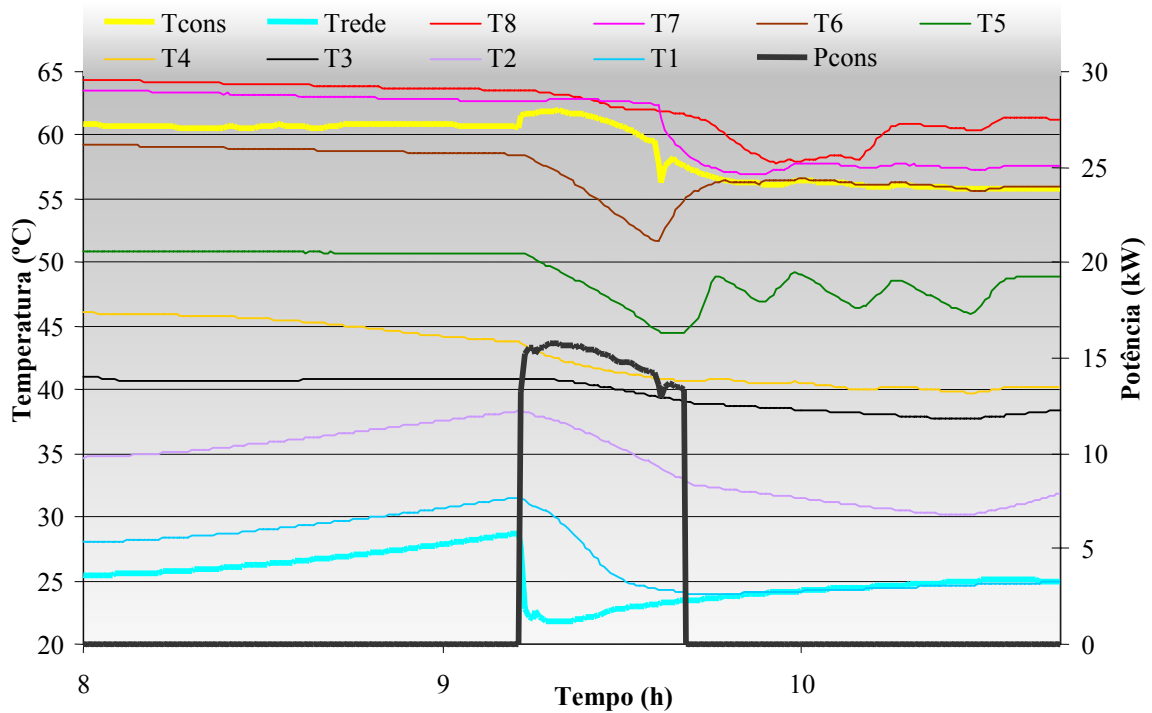


Figura 6.13 – Influência do consumo no perfil de temperaturas do sistema série. São utilizados Tcons para a temperatura de consumo, Trede para a temperatura do sensor da água da rede (água de reposição) e Pcons para a potência associada ao consumo de água quente.

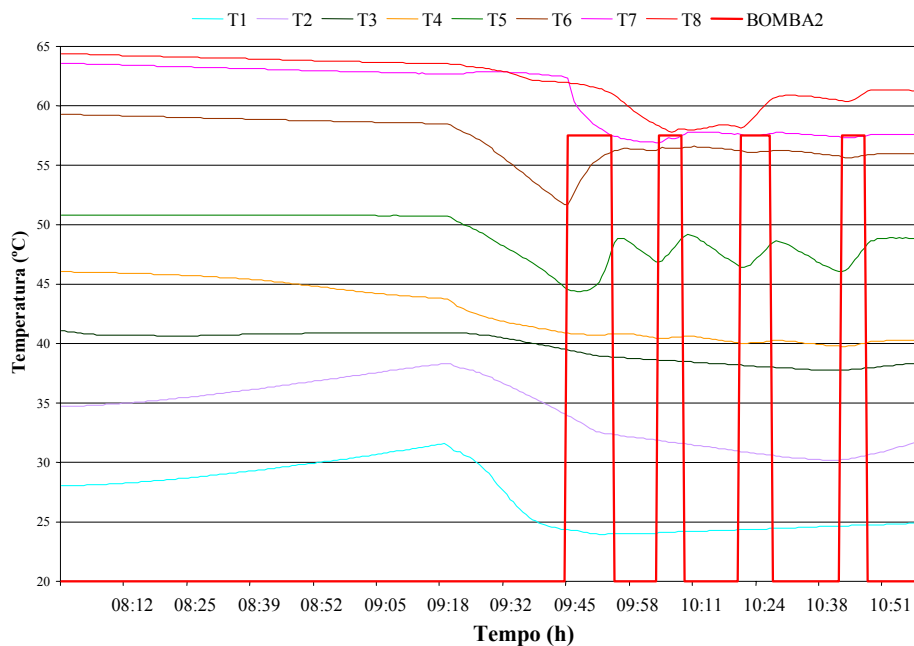


Figura 6.14 – Acionamento do aquecedor a gás causando oscilação na temperatura da camada T5.

A tabela 6.1 apresenta uma comparação entre os resultados de ambos os sistemas, incluindo a eficiência dos coletores solares, as perdas térmicas, a energia associada ao consumo de gás, a variação de energia interna dos reservatórios (entre o início e o final do ensaio) e a energia associada ao consumo de água quente. Todos os componentes do balanço de energia são apresentados com suas incertezas.

Tabela 6.1 - Balanço de energia de ambos os sistemas.

	Sistema Paralelo	Sistema Série
Eficiência dos coletores solares (%)	56	60
Ganho de energia devido aos coletores solares (MJ)	45.9 ± 1.6	48.5 ± 1.7
Energia associada ao consumo de água quente (MJ)	68.8 ± 0.6	60.5 ± 0.5
Ganho de energia associada ao gás (MJ)	95.0 ± 6.7	56.2 ± 3.9
Perdas térmicas dos sistemas (MJ)	57.9 ± 1.1	40.8 ± 0.8
Variação de energia interna dos reservatórios (MJ)	14.2 ± 0.3	-3.4 ± 0.1

## 6.5 Influência do Horário de Consumo na Eficiência dos Sistemas

Efetuuou-se o consumo de água quente em ambos os sistemas nos seguintes horários de consumo: 9 horas, 15 horas e 19 horas, ao longo de três dias para cada horário.

Devido à variação da temperatura de consumo entre uma configuração e outra, o controle da energia associada ao consumo não pode mais ser realizada considerando-se tempos iguais para ambos os sistemas para garantir uma retirada de energia equivalente entre os sistemas. Nos dois sistemas o consumo inicia-se ao mesmo tempo e termina quando a quantidade de energia retirada for de aproximadamente 9000 kJ. A equação 6.1 é utilizada para calcular o tempo de consumo (tempo de abertura da válvula solenóide) necessário para consumir esta quantidade de energia.

$$Q_c = \dot{m} t c_p (T_{consumo} - T_{\acute{a}gua\grave{f}ria}) \quad (6.1)$$

onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica de consumo (kg/s),  $t$  é o tempo em que a válvula permanece aberta(s),  $c_p$  é o calor específico da água,  $T_{consumo}$  é a temperatura de consumo da água (°C) e  $T_{\acute{a}gua\grave{f}ria}$  é a temperatura da água de reposição em (°C).

Devido ao tempo de varredura do programa de aquisição e controle ser de aproximadamente 40 segundos pode haver uma diferença entre a quantidade de energia retirada dos sistemas.

A vazão mássica é considerada constante, porém a temperatura de consumo sofre variações durante o período de consumo. Considerando-se esta variação, a temperatura utilizada na equação 6.1 é a média da temperatura de consumo neste período.

Um programa em Visual Basic trata os dados adquiridos e efetua o balanço de energia de cada sistema levando em consideração a quantidade de energia solar incidente, quantidade de energia associada ao gás consumido, quantidade de energia associada à água quente consumida, quantidade de energia associada à água de reposição e variação de energia interna do reservatório entre o início e o fim do período considerado (três dias).

O comportamento dos sistemas pode ser analisado pela variação das temperaturas médias ao longo do período de ensaio nas diversas condições de funcionamento, considerando os efeitos dos coletores solares, funcionamento do aquecedor a gás e consumo de água quente em diversos horários.

As Figuras 6.15 e 6.16 apresentam os intervalos e potências dos acionamentos do aquecedor a gás, funcionamento dos coletores solares, consumo de água quente e das perdas térmicas dos sistemas assim como a influência destes sobre a temperatura média, ao longo de três dias de ensaio com o consumo de água quente ocorrendo as 19 horas para cada configuração (paralela e série respectivamente). O mesmo é apresentado nas Figuras 6.17 e 6.18, porém com o horário de consumo as 15 horas e nas Figuras 6.19 e 6.20 com o consumo ocorrendo as 9 horas.

A radiação solar é a mesma para as duas configurações ensaiadas para cada horário de consumo. Os ensaios, para cada horário, são realizados ao mesmo tempo em ambos os sistemas, entretanto a radiação assim como outras condições climáticas sofrem alterações em relação a cada horário de consumo ensaiado. Esta limitação pode ser superada com a utilização de um programa de simulação ou com seis experimentos montados e ensaiados ao mesmo tempo.

A energia de consumo e a energia associada ao gás é retirada ou fornecida aos sistemas de aquecimento com uma potência elevada, mas num curto intervalo de tempo (inferior a 1 hora). Devido a isto se adotou o termo potência média horária nas figuras 6.15 a 6.20 para representar a energia fornecida ou retirada dos sistemas em intervalos iguais aos das perdas térmicas e aos coletores solares.

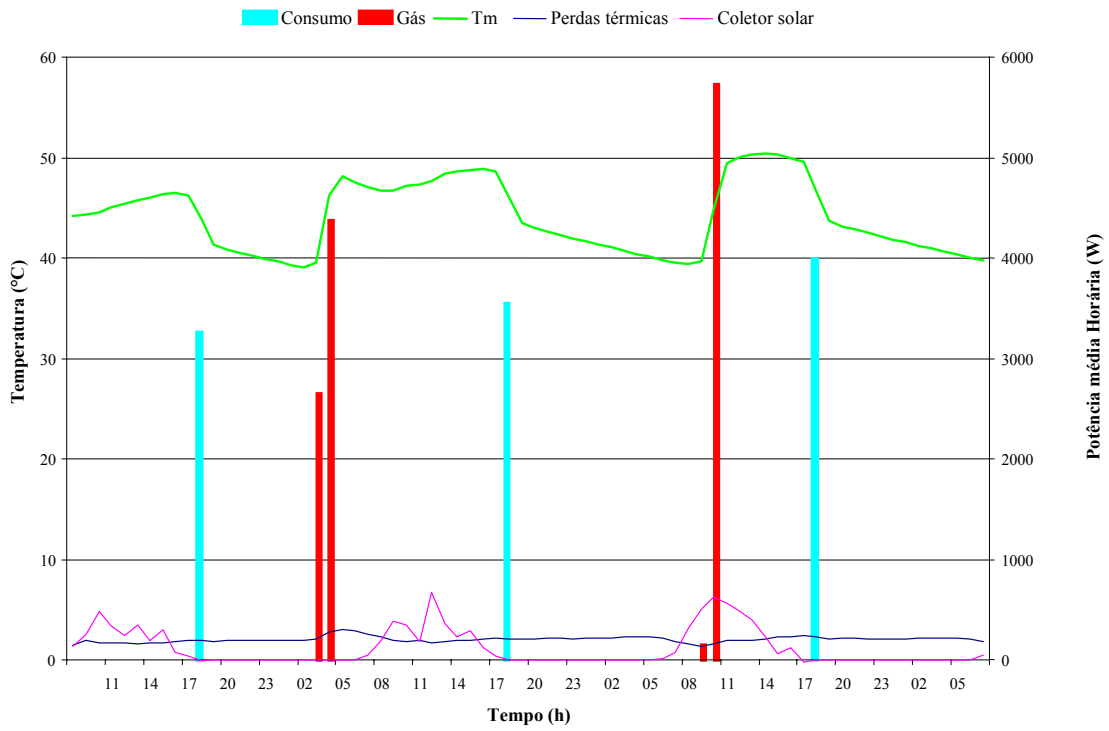


Figura 6.15 – Influência do consumo às 19 horas no sistema paralelo.

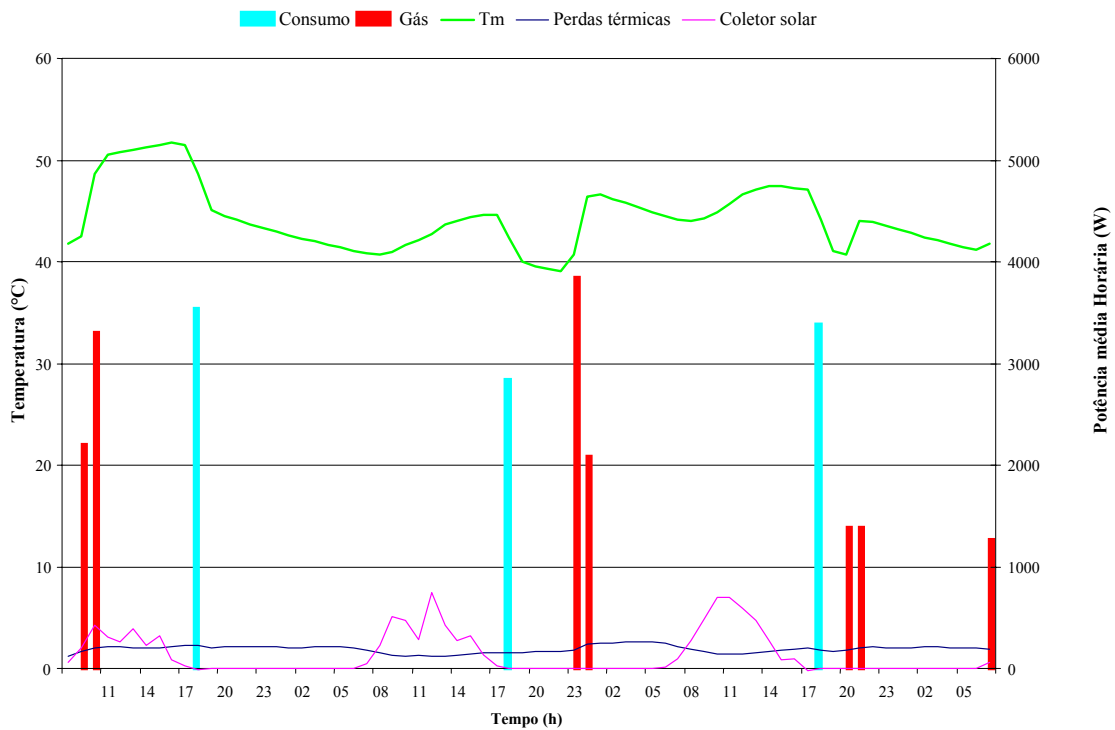


Figura 6.16 - Influência do consumo às 19 horas no sistema série.

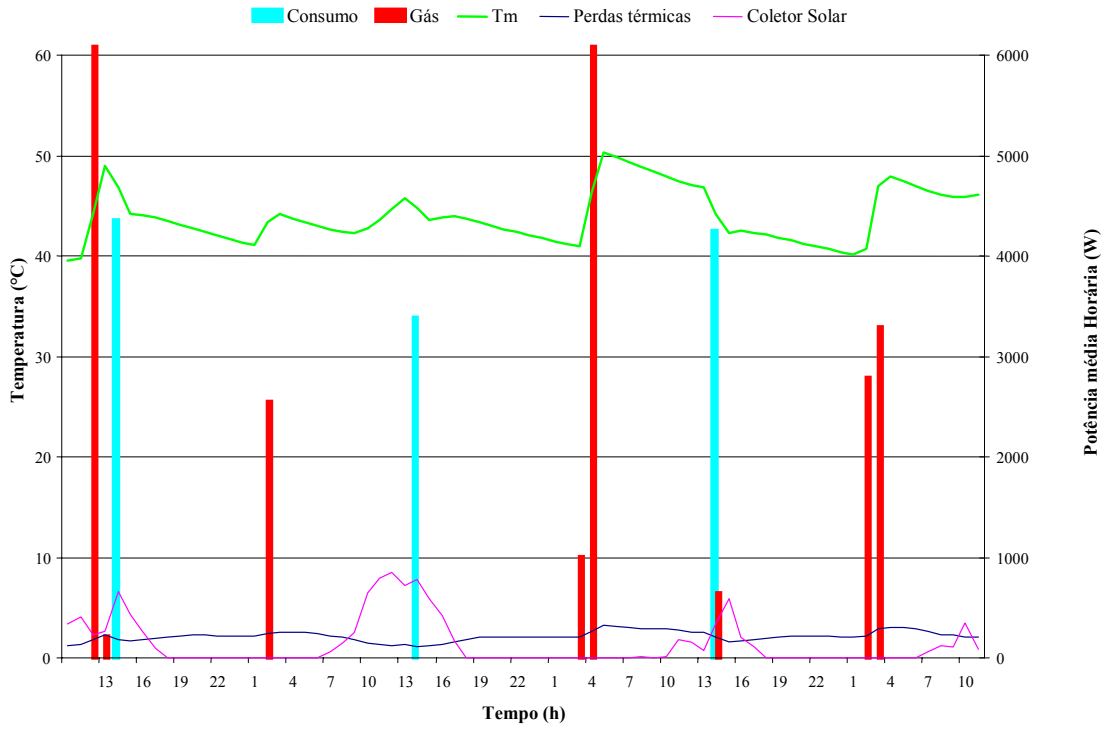


Figura 6.17 - Influência do consumo às 15 horas no sistema paralelo.

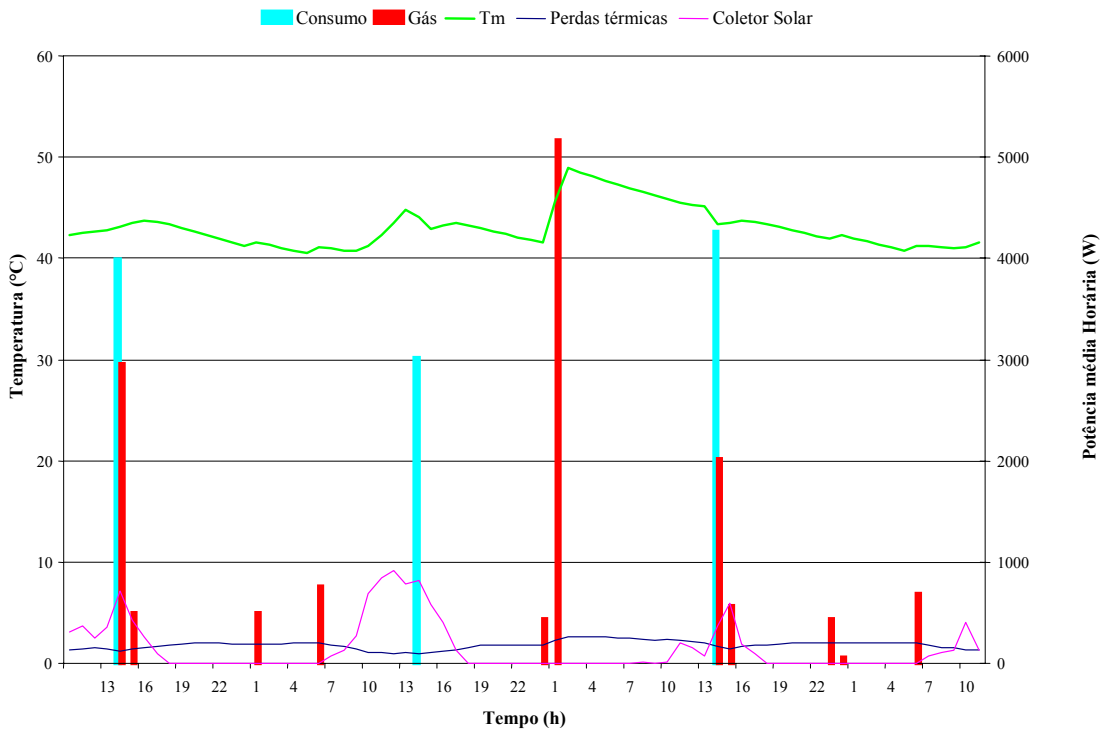


Figura 6.18 - Influência do consumo às 15 horas no sistema série.

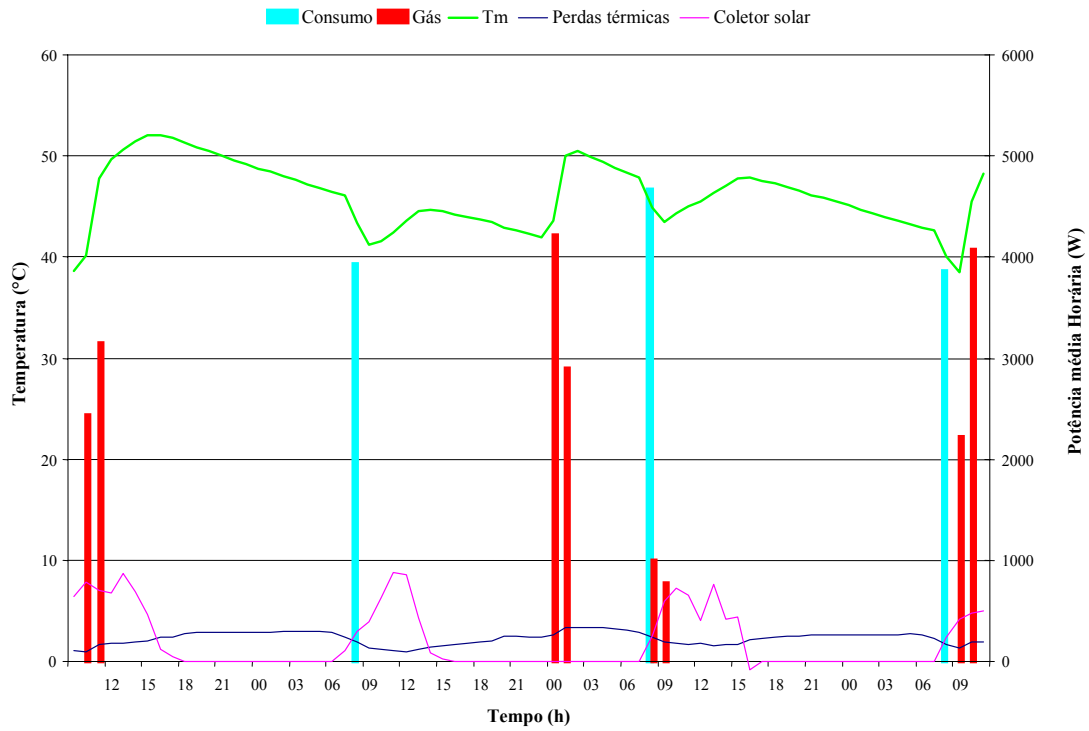


Figura 6.19 - Influência do consumo às 9 horas no sistema paralelo.

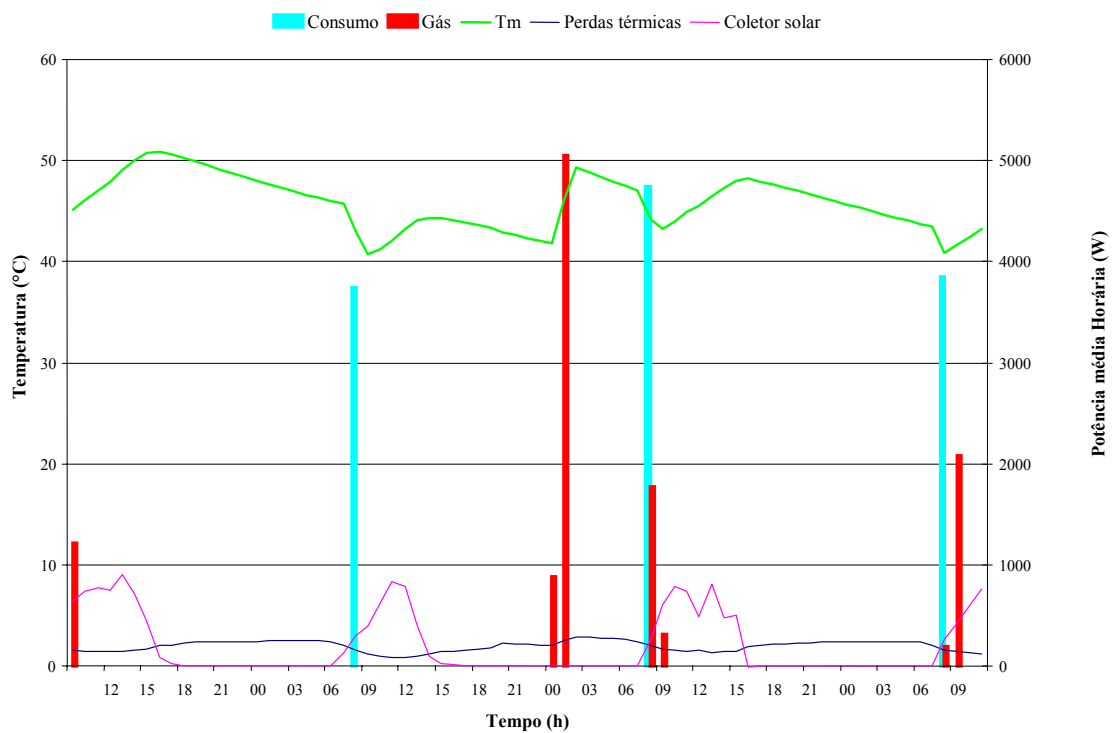


Figura 6.20 - Influência do consumo às 9 horas no sistema série.

A Figura 6.21 apresenta a variação de energia interna ocorrida ao longo de três dias de funcionamento do sistema paralelo (1) com consumo de água às 19 horas, assim como a



comparação com a mesma variação de energia calculada utilizando-se os coeficientes da tabela 6.2. Os resultados indicam que os parâmetros, assim como as equações utilizadas para calcular o comportamento do sistema, concordam com os resultados experimentais. As diferenças de amplitudes apresentadas entre a variação da energia medida e da calculada devem-se a base de tempo de 1 hora para o efetuar o cálculo enquanto que o experimental é monitorado a cada 40 segundos. Entretanto integrando-se as curvas obtém-se os valores equivalentes. Embora não sejam apresentados dados sobre o sistema série, estes também concordam.

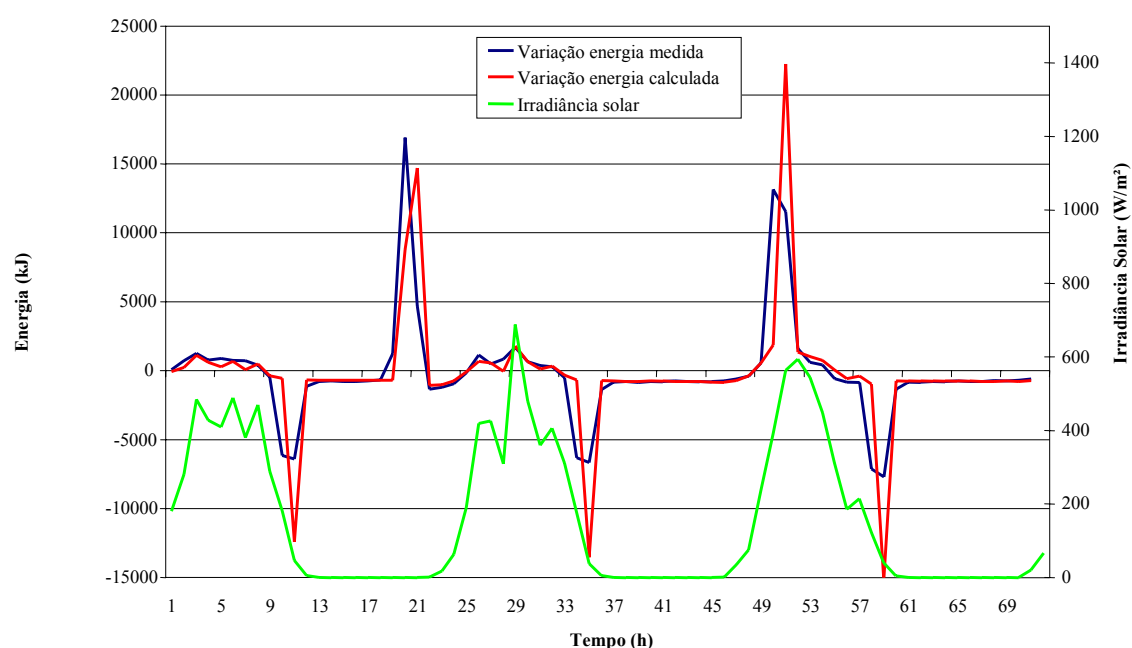


Figura 6.21 - Comparação da variação da energia interna do reservatório do sistema 1 (paralelo), medido e calculado.

Tabela 6.2 - Coeficientes utilizados nos cálculos do balanço de energia.

	Sistema paralelo	Sistema série
Coeficiente médio de perdas térmicas (W/°C)	10,0	9,5
Vazão de gás (m³/h)	0,252	0,222
Vazão mássica de consumo de água quente (kg/min)	5,36	5,41
Temperatura de consumo média (°C)	49,5	47,5

A tabela 6.3 apresenta os valores das parcelas e as incertezas que compõem o balanço energético dos sistemas de aquecimento para os diferentes horários de consumo (energia solar e do gás efetivamente absorvidas, variação da energia interna do reservatório, perdas

térmicas e energia associada à água quente de consumo). Verifica-se que o valor residual do balanço de energia, na coluna indicada como diferença, está dentro do intervalo da incerteza dos componentes do balanço de energia.

A eficiência dos sistemas é calculada pela equação 6.2.

$$\eta_s = \frac{Q_{cons} + \Delta E_i}{Q_{gás} + Q_{solar}} \quad (6.2)$$

onde  $Q_{cons}$  é a energia de consumo de água quente descontando a reposição de água fria no reservatório,  $\Delta E_i$  é a variação de energia interna do reservatório entre o início e o final do ensaio,  $Q_{gás}$  é a energia fornecida pelo aquecedor a gás e  $Q_{solar}$  é a energia incidente no plano dos coletores solares.

Tabela 6.3 - Balanço energético dos sistemas para os diferentes horários de consumo, ao longo de três dias.

	Energia Solar (kJ)	Energia Gás (kJ)	Variação Energia Interna (kJ)	Perdas térmicas (kJ)	Energia Consumo (kJ)	Diferença (kJ)
Sistema Paralelo consumo 19 h	<b>30931</b> ± 1082	<b>46368</b> ± 3265	<b>-11115</b> ± 222	<b>51915</b> ± 960	<b>38834</b> ± 315	<b>-2334</b>
Sistema Série consumo 19 h	<b>34291</b> ± 1200	<b>55694</b> ± 3899	<b>-53</b> ± 1	<b>48901</b> ± 905	<b>35150</b> ± 285	<b>5987</b>
Sistema Paralelo consumo 15 h	<b>37787</b> ± 1323	<b>81557</b> ± 5709	<b>16578</b> ± 332	<b>56661</b> ± 1048	<b>43164</b> ± 350	<b>2940</b>
Sistema Série consumo 15 h	<b>39456</b> ± 1381	<b>50840</b> ± 3559	<b>-1762</b> ± 35	<b>48071</b> ± 889	<b>40604</b> ± 329	<b>3384</b>
Sistema Paralelo consumo 9 h	<b>52133</b> ± 1825	<b>74817</b> ± 5237	<b>24187</b> ± 484	<b>61035 ±</b> <b>1129</b>	<b>44882</b> ± 364	<b>-3154</b>
Sistema Série consumo 9 h	<b>55235</b> ± 1933	<b>65435</b> ± 4580	<b>-4729</b> ± 95	<b>52838</b> ± 978	<b>44359</b> ± 359	<b>4127</b>

Na tabela 6.3 foram apresentados os valores da energia solar absorvida e transformada em calor útil, no cálculo da equação 6.2 foram utilizados os valores da radiação incidente no plano dos coletores multiplicado pela área dos mesmos (energia incidente).

A elevada variação da energia interna ao longo do período dos ensaios, mostrada na tabela 6.3 pode prejudicar a determinação da eficiência dos sistemas pela equação 6.2. Para minimizar esta influência seria conveniente trabalhar com mais dias de ensaios, de forma que a variação de energia tenha peso menor quando comparada às outras parcelas do cálculo da eficiência dos sistemas, apresentadas na tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Estimativa das eficiências do sistema paralelo e série.

	Consumo 9 horas	Consumo 15 horas	Consumo 19 horas
Eficiência do coletor solar no sistema paralelo (%)	61	52	43
Eficiência do coletor solar no sistema série (%)	65	55	48
Eficiência do sistema paralelo (%)	37	36	32
Eficiência do sistema série (%)	28	31	30

## CAPÍTULO 7

### PROGRAMA DE SIMULAÇÃO

A construção dos sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás permitiu estudar o comportamento deste tipo de sistema. Uma quantidade muito grande de combinações dos parâmetros de projeto, tais como temperatura de operação, altura de acionamento do termostato, horário de consumo, vazão de consumo, número de coletores, potência do aquecedor a gás, vazão de água do aquecedor a gás e variações climáticas, dificultam a análise destes sistemas experimentalmente.

Devido à dificuldade apresentada optou-se por construir três sistemas de aquecimento diferentes, dois com reservatórios verticais e um com reservatório horizontal. Tomou-se o cuidado de caracterizar cada componente isoladamente e globalmente, com o intuito de obter parâmetros confiáveis dos sistemas. Paralelamente à construção e à caracterização dos sistemas de aquecimento foi desenvolvido, pela equipe do Laboratório de Energia Solar da UFRGS, um programa de simulação que permite simular este tipo de sistema de aquecimento.

Existem diversos programas de simulação de sistemas de aquecimento de água, porém nenhum com todas as características do programa desenvolvido pela equipe do Laboratório de Energia Solar. A seguir são citadas algumas destas características:

- Interface amigável
- Simula sistemas com diferentes níveis de complexidade
- Necessita de poucas entradas de dados, porém permite variar grande quantidade de parâmetros
- Permite a introdução de fonte de energia auxiliar de qualquer natureza
- Permite variar as alturas de conexões de todos os componentes
- Será distribuído gratuitamente.

O programa de simulação de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás (AQUESOLGAS), validado através deste trabalho, tem como objetivo principal servir de ferramenta de simulação por computador e de dimensionamento de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás. Foi desenvolvido em Visual Basic 5.0 com financiamento da PETROBRÁS e FINEP. Apresenta a característica de ser capaz de simular individualmente cada componente do sistema e guardar o resultado individual para formar o resultado global do sistema. No caso de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás os componentes

do sistema são: coletores solares, reservatório térmico, aquecedor a gás, tubulação e geometria do sistema. Da mesma forma que considera os componentes físicos da instalação, o programa de simulação deve considerar também componentes lógicos como: ativação do termostato, ativação da bomba, deslocamento de camadas de água no interior do reservatório em função de suas temperaturas e alguns componentes meteorológicos como: temperatura ambiente, radiação solar e velocidade do vento.

O programa é dividido em cinco módulos principais: coletores solares, reservatório térmico, perfil de consumo, tubulações hidráulicas e geometria.

A modelagem matemática utilizada para cada componente tem origens em diferentes autores. Para os coletores solares foi utilizada a clássica aproximação de Hottel-Bliss-Whillier, apresentada por Duffie and Beckman (1991). Os processos de transferência de calor no reservatório térmico podem ser simulados utilizando modelos bidimensionais, Oliveski et al (2003), porém o cálculo multi-nodal unidimensional utilizado é suficiente. Para o cálculo da distribuição de temperaturas no reservatório foi utilizado um modelo proposto por Hussein (2002) adaptado conforme trabalho sobre modelo modificado, Krenzinger, Siqueira e Oliveski (2003), para permitir um número maior de conexões ao reservatório e adaptado para utilizar um aquecedor a gás de passagem externo.

O aquecedor a gás opera com vazão de gás e água constantes e através de sua eficiência é possível calcular o consumo de gás durante a operação. A temperatura em cada parte do circuito é calculada resultando na temperatura da água na entrada do reservatório. O programa permite várias possibilidades de alturas de conexão do aquecedor a gás tanto quanto do coletor em relação ao reservatório, conforme indicado na Figura 7.1.

O modelo experimental foi montado com o objetivo de obter parâmetros confiáveis dos sistemas, os quais são imprescindíveis para efetuar com êxito a simulação do sistema em estudo e gerar dados experimentais para serem comparados com os resultados das simulações. Os parâmetros são principalmente a curva de eficiência instantânea dos coletores solares, rendimento do aquecedor a gás, vazão de gás, vazão de água no aquecedor a gás, vazão de consumo de água quente, coeficiente global de perdas térmicas do reservatório e dimensões do sistema.

Os dados de geometria do sistema são fornecidos para o programa através do formulário apresentado na Figura 7.1 e a Tabela 7.1 apresenta os parâmetros obtidos experimentalmente para cada sistema. Os dados de dimensão e a curva de eficiência do coletor solar são inseridos no formulário do programa de simulação, apresentado na Figura 7.2.

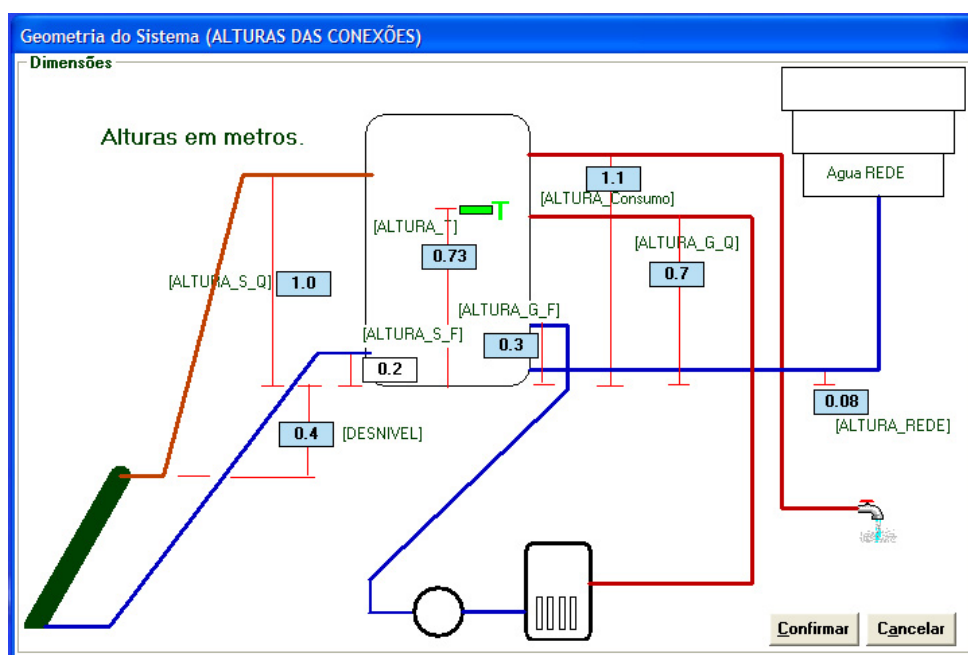


Figura 7.1 – Formulário de entrada de valores da geometria do sistema a ser simulado.

**Coletor solar**

**Dimensões do Coletor em mm**

Espessura do Absorvedor	0.3	Esp. Isolamento Lateral	50
Comprimento do Absorvedor	1500	Esp. Isolamento do Fundo	50
Largura do Absorvedor	590	Diâmetro Int. tubo cabeçote	28
Espessura da Cobertura	3	Diâmetro Ext. tubo cabeçote	29
Separação Cobertura/Abs	60	Diâmetro Int. tubo elevador	8
Espessura da Caixa	100	Diâmetro Ext. tubo elevador	9
Comprimento da Caixa	1550	Comprimento cordão solda	950
Largura da Caixa	520	Comprimento tubo soldado	950
Largura do cordão de solda	1	Espessura da solda	0.1
Separação entre os tubos	50	<input type="checkbox"/> Coletor sem cobertura transparente	

**Opção de Dados**

Dados dimensionais  
 Curva Medida  
 Valor de FR\_TA: 0.71  
 Valor de FR\_UL: 8.75

**Posição dos Tubos**

**Propriedades dos Materiais**

Absortância Solar do Absorvedor	0.95
Emitância do Absorvedor	0.95
Transmitância Solar da Cobertura	0.79
Emitância da Cobertura	0.95
Condutividade Absorvedor (W/m² C)	386
Condutividade Isolamento (W/m² C)	0.04
Condutividade Solda (W/m² C)	64

**Equation:**  $\eta = 0.71 - 8.75 \times (T_e - T_a) / G$

Buttons: Salvar, Abrir, Confirmar, Cancela

Figura 7.2 – Formulário de dimensões e eficiência do coletor do programa de simulação (dados do coletor utilizado no trabalho).

Tabela 7.1- Parâmetros dos sistemas de aquecimento de água quente.

Parâmetros	Sistema Paralelo	Sistema Série	Sistema Horizontal
Curva de eficiência instantânea dos coletores solares	$\eta_c = 0,71 - 8,75 \cdot (T_e - T_a) / G_T$		
Rendimento do aquecedor a gás(%)	81	81	81
Vazão de gás (m <sup>3</sup> /h)	0,227	0,199	0,199
Vazão de água no aquecedor a gás (m <sup>3</sup> /h)	0,16	0,18	0,16
Vazão de consumo de água quente (m <sup>3</sup> /h)	0,322	0,325	0,24
Coefficiente médio global de perdas térmicas do reservatório (W/°C)	4,2	4,8	4,0

Algumas das características construtivas dos sistemas de aquecimentos são apresentados na Tabela 7.2. Nesta tabela encontram-se principalmente valores de alturas de conexões junto ao reservatório.

Tabela 7.2 – Alturas de conexão dos componentes do sistema paralelo, série e horizontal.

	Sistema paralelo	Sistema série	Sistema horizontal
Altura de saída da água do reservatório para o coletor (mm)	80	80	50
Altura de entrada da água do coletor para o reservatório (mm)	1100	540	600
Altura de saída da água do reservatório para o aquecedor a gás (mm)	80	440	600
Altura de entrada da água do aquecedor para o reservatório (mm)	1100	1100	780
Altura de entrada da água da rede para o reservatório (mm)	80	80	50
Altura de saída do reservatório da água de consumo (mm)	950	950	780
Altura do termostato (mm)	730	730	680
Desnível entre o topo do coletor e a base do reservatório (mm)	400	400	400

## 7.1 Metodologia de Validação do Programa de Simulação

Cada componente do sistema é simulado utilizando os mesmos dados meteorológicos utilizados no ensaio experimental. Os parâmetros dos sistemas experimentais assim como as condições iniciais são inseridas no programa de simulação.

Dois sistemas experimentais utilizando os mesmos componentes, porém conectados diferentemente entre si geram dados ao mesmo tempo, fato que garante as mesmas condições meteorológicas para ambos os sistemas e evidencia que toda diferença apresentada nos perfis de temperatura dos sistemas é decorrente da configuração de cada sistema. Um terceiro sistema foi montado posteriormente para validar o programa para reservatórios horizontais.

Inicia-se com a simulação do reservatório térmico vertical, fornecendo ao programa um arquivo de dados de radiação igual a zero por um certo período para simular o resfriamento dos modelos experimentais dos reservatórios desconectados dos coletores solares. Também se toma o cuidado de zerar o consumo de água quente e desligar o acionamento do aquecedor a gás visto que o ensaio experimental dos reservatórios foi influenciado apenas pelo coeficiente global de perdas térmicas.

Após ser realizada a validação do módulo do reservatório térmico, onde todos os componentes estão ligados, efetua-se a simulação do aquecedor a gás de passagem. São fornecidas as alturas de conexão indicadas na Tabela. 7.2, eficiência, vazão de gás e de água, poder calorífico do gás utilizado e a temperatura e posicionamento de acionamento do termostato para ambos os sistemas (43°C).

A validação do módulo dos coletores utiliza os dados do formulário do coletor, apresentado na Figura 7.2. Neste formulário podem-se fornecer as dimensões e as propriedades físicas dos materiais que constituem o coletor solar, mas também pode ser fornecida a curva de eficiência instantânea do coletor. Neste trabalho optou-se por fornecer a curva de eficiência instantânea, pois esta havia sido determinada experimentalmente. De qualquer forma com os dados construtivos obtém-se um resultado equivalente. Uma vez tendo atualizado este formulário informam-se as temperaturas iniciais da água das camadas do modelo experimental a ser simulado, assim como os dados meteorológicos correspondentes ao período ensaiado.

Uma vez validados os módulos do resfriamento do reservatório, coletores solares e aquecedores a gás de passagem, valida-se o sistema com os seus módulos integrados. Embora o programa simule o comportamento de diversas variáveis, optou-se por efetuar as comparações



com a temperatura da água das camadas no interior do reservatório correspondente às mesmas camadas do modelo experimental, por representarem o comportamento do sistema.

## 7.2 Validação dos Módulos do Programa de Simulação

O perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório é influenciado pela forma em que ocorre a transferência de calor entre a água, a parede do reservatório, o isolamento, o revestimento externo e a temperatura ambiente. Ocorre também convecção no interior do próprio reservatório e difusão de calor na água para contribuir na distribuição do perfil de temperaturas.

Calcula-se o coeficiente global de perdas do reservatório com dados experimentais de temperatura do sistema. A influência do vento não foi considerada no cálculo do coeficiente, pois não há anemômetro monitorando a velocidade do vento sobre o modelo experimental, porém o efeito do vento pode ser percebido na pequena variação que o coeficiente global de perdas apresenta. Esta variação é dependente do período ( $\Delta t$ ) considerado para o cálculo da equação 7.1.

$$U_T = \frac{\Delta E_i}{(T_a - T_m) \Delta t} \quad (7.1)$$

onde  $\Delta E_i$  é a variação de energia interna do reservatório no período considerado (kJ),  $T_a$  é a temperatura ambiente (°C),  $T_m$  é a temperatura média da água no interior do reservatório (°C) e  $\Delta t$  é o período de tempo considerado (t).

Foram ensaiadas e simuladas situações de resfriamento dos reservatórios verticais com diferentes condições iniciais de temperatura nos dias 23 de março de 2003 (com coeficientes globais de perdas térmicas de 10 e 8,5 W/°C, para o sistema paralelo e série respectivamente) e nos dias 01, 05 e 08 de abril de 2004. Em abril de 2004 os reservatórios já haviam passado pelas operações de isolamento, enlonação e revestimento com alumínio. Logo os coeficientes globais de perdas térmicas utilizados foram 4,2 e 4,8 W/°C, para os sistemas paralelo e série respectivamente.

As Figuras 7.3 e 7.4 apresentam os perfis de temperatura da água no interior dos reservatórios dos sistemas paralelo e série em um período que ainda não havia sido efetuado o novo isolamento. Os coeficientes globais de perdas térmicas utilizados são 10 e 8,5 W/°C.

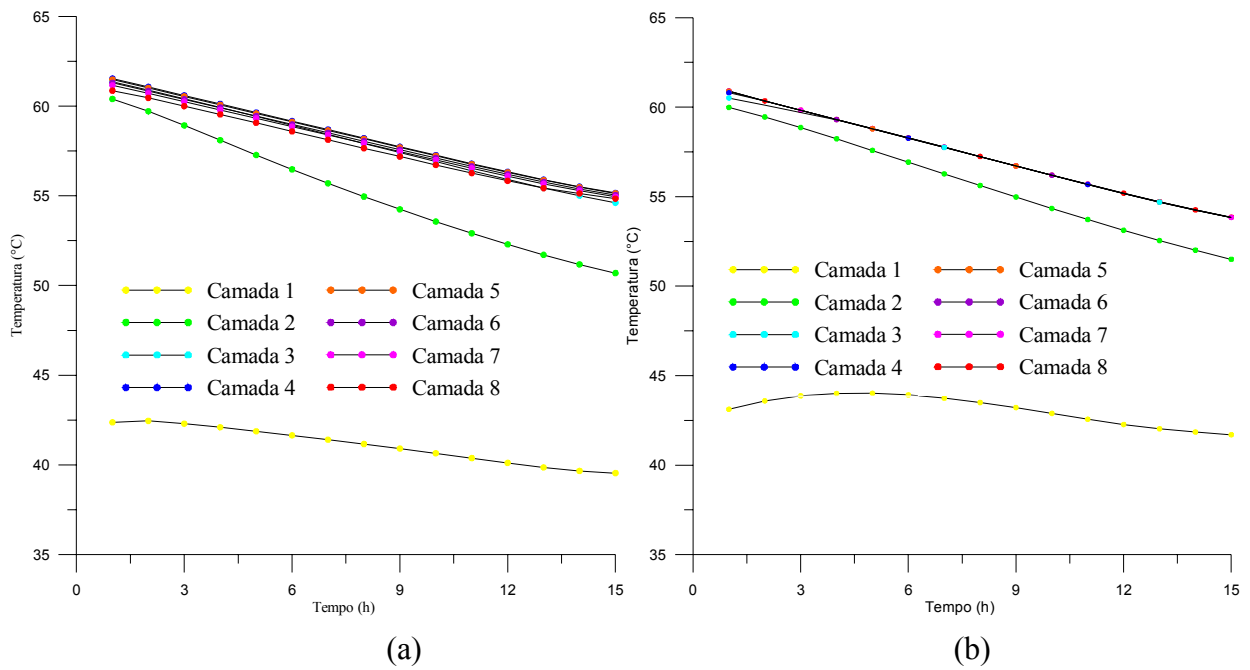


Figura 7.3 – Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema paralelo no dia 23/03/2003

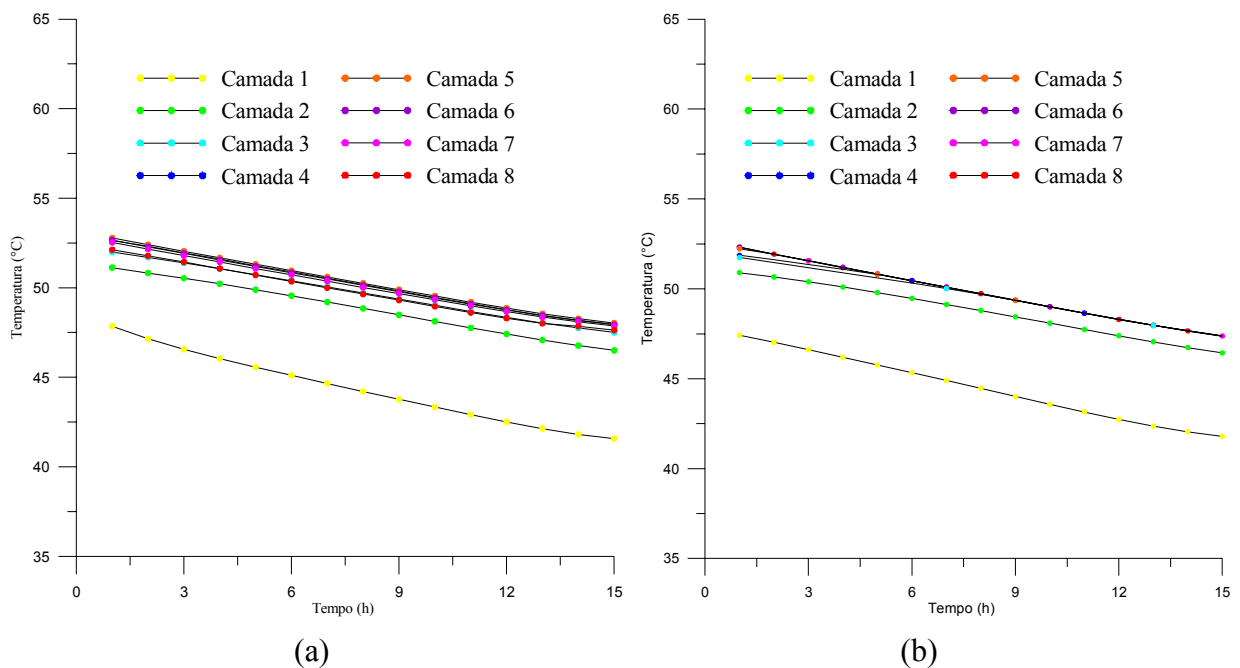


Figura 7.4 – Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema paralelo no dia 23/03/2003.

A Figura 7.5 apresenta os perfis de temperaturas da água no interior do reservatório do sistema paralelo num período de 22 horas (01/04), experimental e simulado. Neste período o coeficiente global de perdas térmicas, calculado pela equação 7.1, foi de 5,11 W/°C enquanto que o coeficiente médio é 4,2 W/°C (sem ação do vento), utilizado no modelo simulado. Como

era de se esperar a simulação utilizando o coeficiente global de perdas calculado apresentou resultados mais próximos dos resultados experimentais. Entretanto, como o programa apresenta uma interface amigável com seu usuário, optou-se por utilizar apenas os parâmetros apresentados na Tabela 7.1 (valores médios) nas simulações efetuadas nesta tese, pois parâmetros mais precisos (calculados) são difíceis de ser obtidos pela maioria dos usuários.

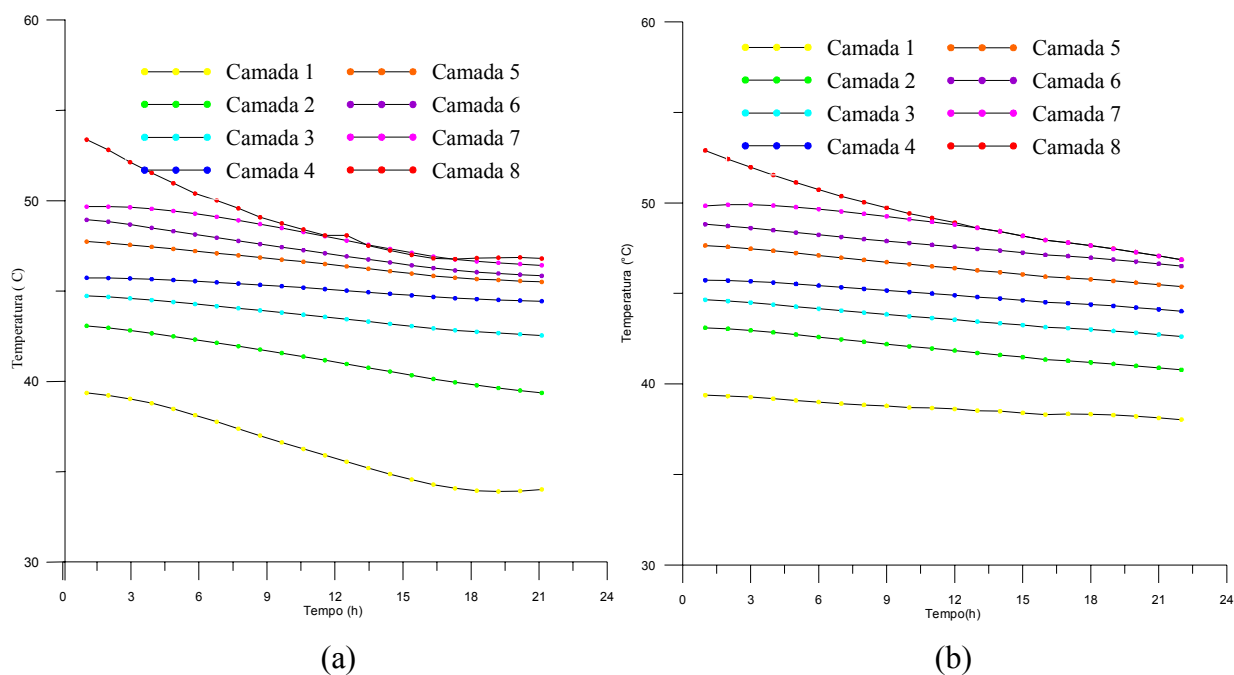


Figura 7.5 – Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema paralelo no dia 01/04/2004.

Com exceção da curva da camada 1 da Figura 7.5 as temperaturas das demais camadas são semelhantes, entre o experimental e o simulado. A diferença de comportamento desta camada pode ser explicada considerando que o programa efetua um desdobramento do coeficiente global de perdas térmicas em coeficientes de perdas térmicas dependentes da área lateral, topo e fundo do reservatório. O programa considera que o isolamento é igual em todas as áreas consideradas, porém os resultados experimentais sugerem que isto não ocorre para o reservatório utilizado.

A Figura 7.6 apresenta os perfis de temperaturas da água no interior do reservatório do sistema paralelo num período de 64 horas (05/04), partindo com condições iniciais diferentes do ensaio apresentado na Figura 7.5. Com uma seqüência de horas maior, os resultados da simulação também concordaram com os resultados experimentais. A Figura 7.7 apresenta o mesmo ensaio, porém com condições iniciais de temperatura muito mais estratificadas e num

período mais longo que os dois ensaios anteriores, indicando boa concordância entre o experimental e o simulado.

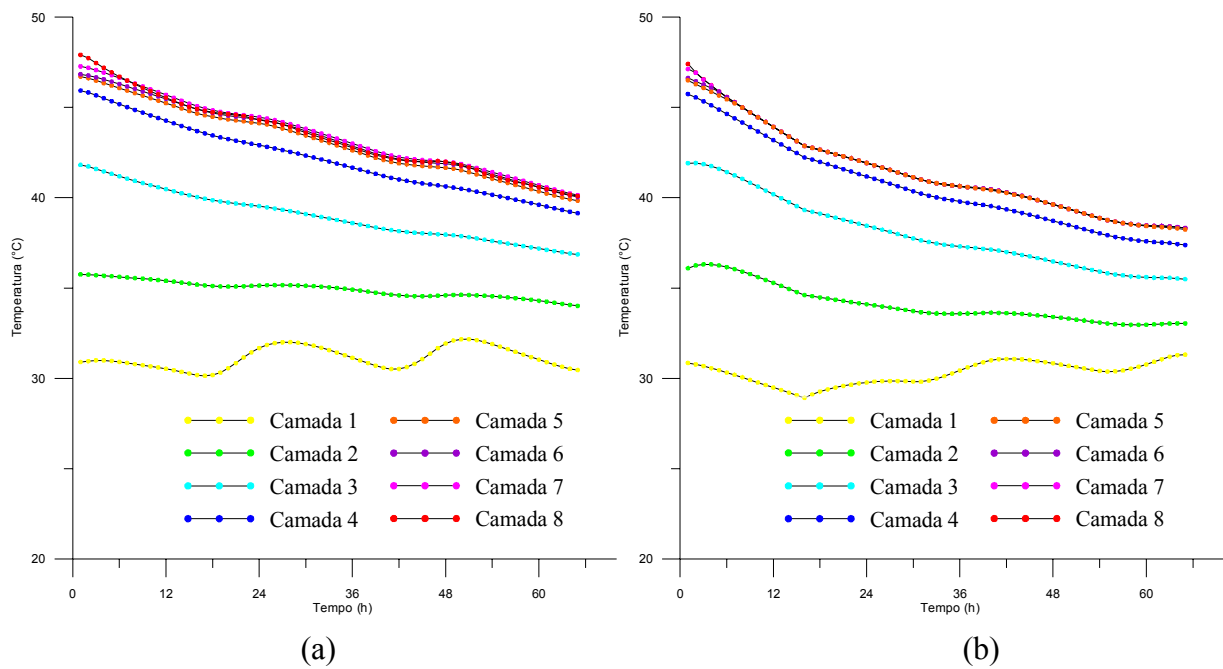


Figura 7.6 - Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema paralelo iniciando no dia 05/04/2004.

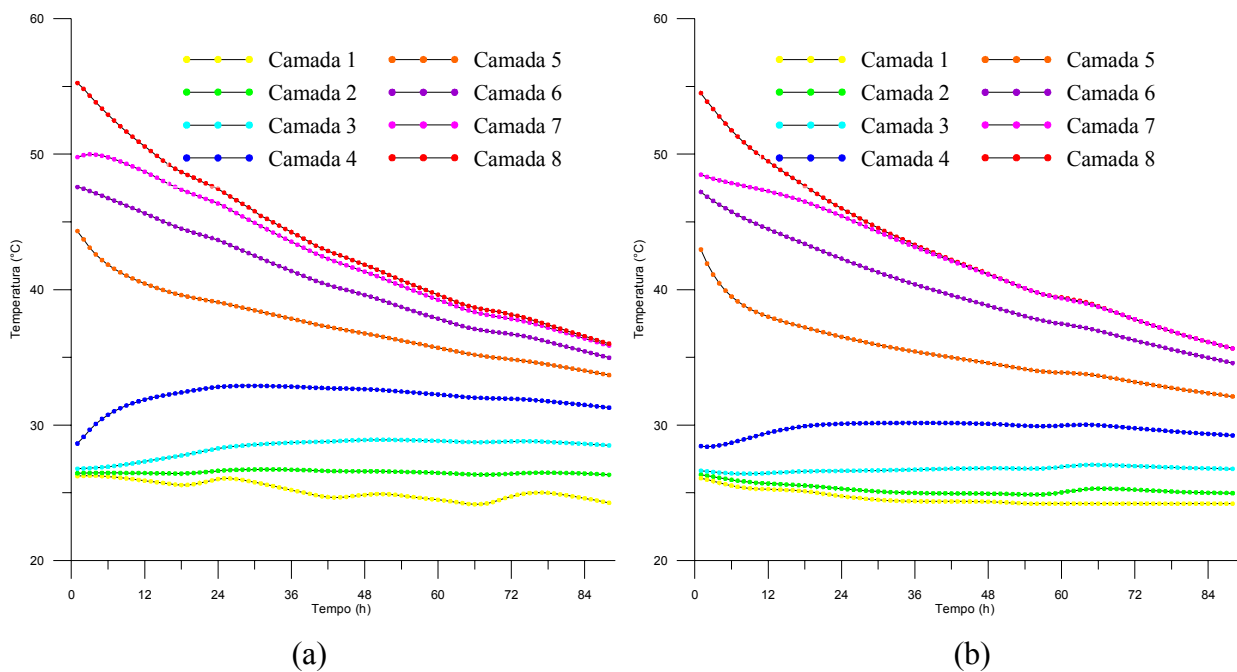


Figura 7.7 - Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema paralelo iniciando no dia 08/04/2004.

A Figura 7.8 apresenta os resultados, experimental e simulado, do resfriamento da água no interior do reservatório térmico horizontal realizado em fevereiro de 2005. No caso dos sistemas montados com reservatórios horizontais foram utilizados apenas seis sensores para medir a temperatura da água no interior do reservatório, por este ser mais baixo e para manter a mesma distância, entre sensores, utilizada para medir a temperatura nos reservatórios verticais (15 cm). A camada 1 do resultado experimental mostra dois períodos de aquecimento, nos tempos 15h e 40h, que foram atribuídos ao aquecimento da tubulação pelo sol, introduzindo uma energia não considerada na simulação.

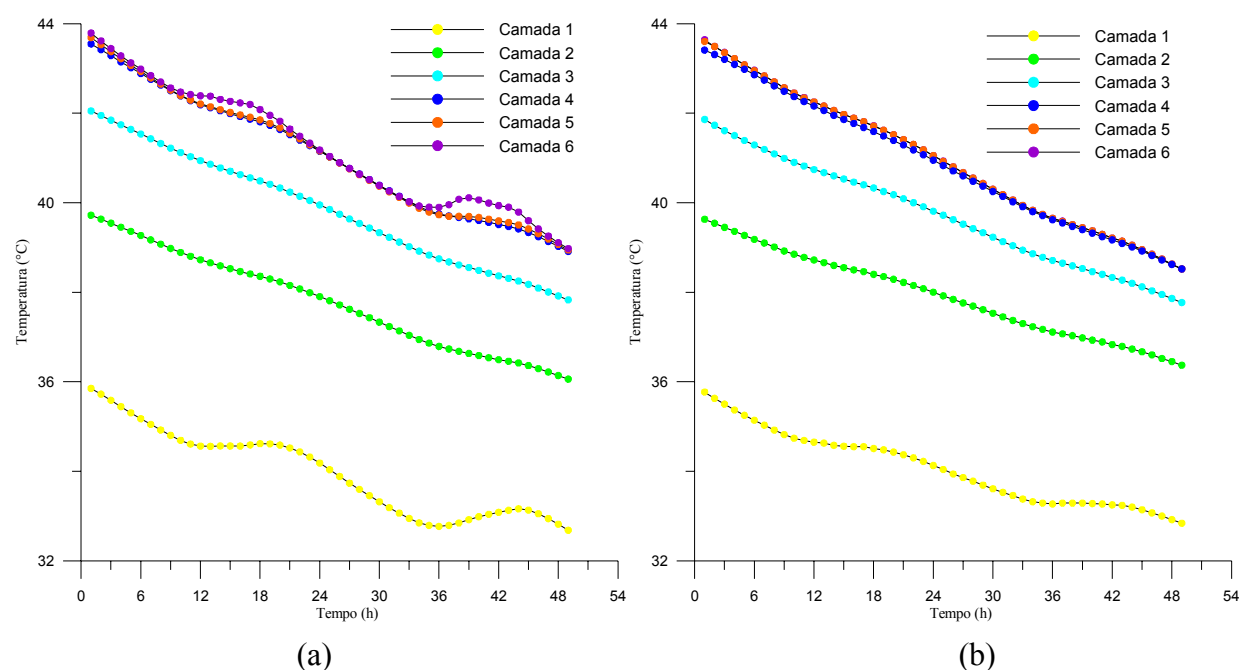


Figura 7.8 – Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório horizontal iniciando no dia 11/02/2005.

A Figura 7.9 apresenta comportamento das temperaturas da água nas camadas do reservatório do sistema paralelo experimental e do modelo simulado ao longo dos cinco dias de ensaio com acionamentos automáticos do aquecedor a gás, sem os coletores solares e sem consumo de água quente. O primeiro acionamento de gás ocorre aproximadamente ao mesmo tempo em ambas as figuras (próximo à hora 40). A temperatura da água na camada 8 do sistema experimental apresenta uma quantidade de picos inferior ao apresentado na Figura 7.9 (b), simulado. Embora ocorram menos picos eles ocorrem em uma intensidade maior, isto ocasiona uma temperatura média equivalente entre o experimental e o simulado, conforme apresentado na figura 7.10.

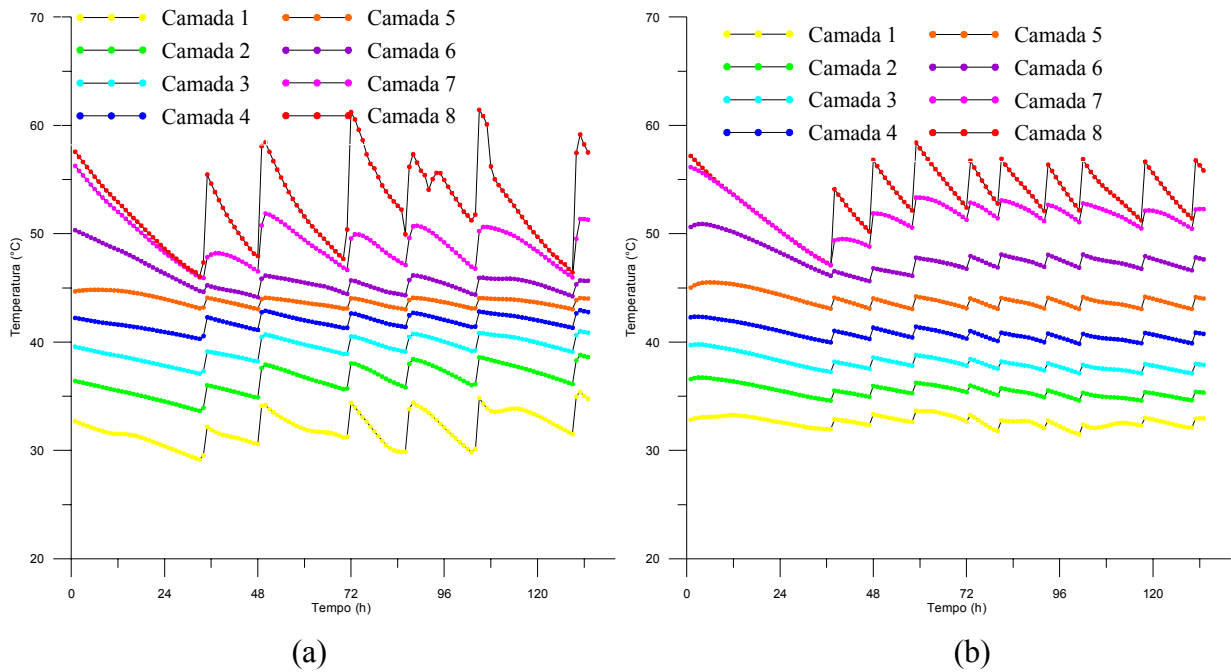


Figura 7.9 - Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema paralelo com acionamento automático do aquecedor a gás, iniciando no dia 17/04/2004.

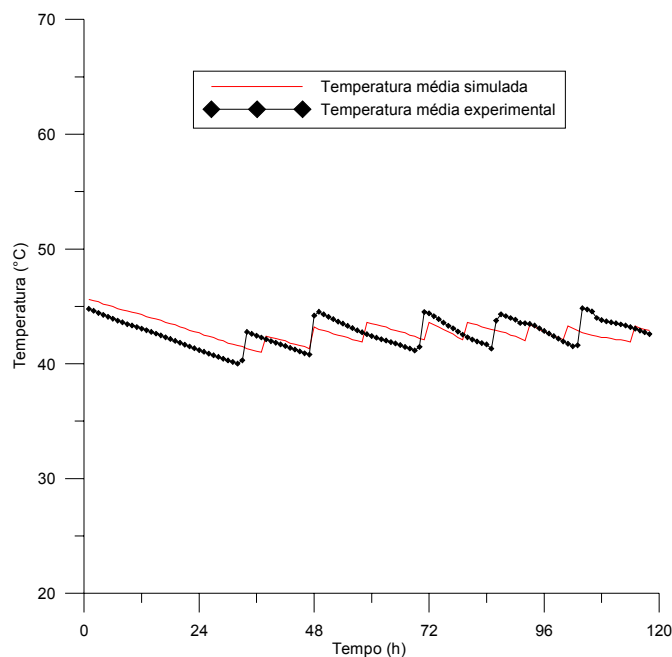


Figura 7.10 – Temperatura média simulada e experimental correspondente à figura 7.9.

As diferenças que ocorrem entre o simulado e o experimental na Figura 7.9 são atribuídas a inércia do sensor para atingir a temperatura da água da camada em que está envolto no ensaio experimental enquanto que no modelo simulado este valor é calculado e atingido

instantaneamente. Há também a janela do termostato, intervalo em que o termostato liga e desliga o aquecedor a gás, no caso do ensaio experimental este valor é de aproximadamente  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  enquanto que no modelo simulado é de exatamente  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A elevação de temperatura proporcionada pelo acionamento do aquecedor a gás no modelo simulado é de aproximadamente  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$  concordando com o valor de elevação de temperatura do aquecedor do sistema paralelo determinado experimentalmente, apresentado na Tabela 4.1. O número de horas em que o aquecedor permaneceu acionado no sistema paralelo experimental foi de 2,4 horas, consumindo neste período  $0,55\text{ m}^3$ . O relatório gerado pelo programa de simulação apresentou resultados de 2,4 horas de acionamento e  $0,5\text{ m}^3$ .

A simulação apresentada para o sistema série, na Figura 7.11 (b), aponta uma boa concordância com o valor da temperatura, número de vezes que o aquecedor foi acionado e a intensidade das elevações de temperatura apresentadas pelo modelo experimental da Figura 7.11 (a).

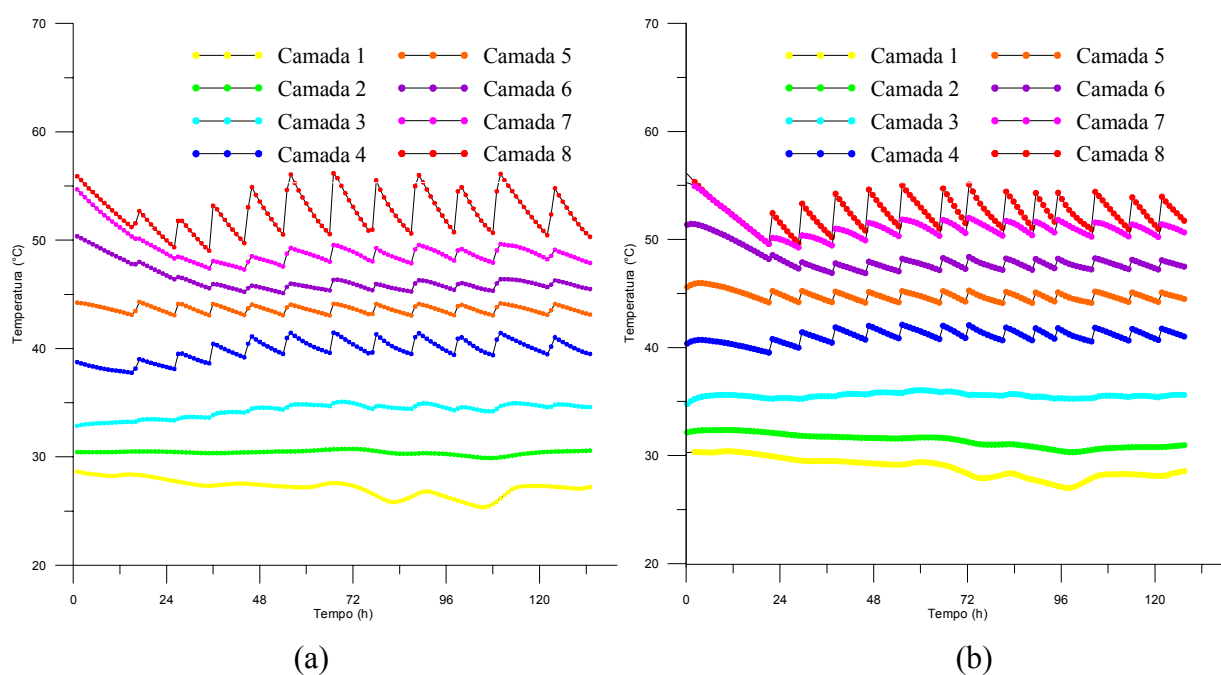


Figura 7.11 - Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema série com acionamento de gás automático, iniciando no dia 17/04/2004.

A elevação de temperatura proporcionada pelo acionamento do aquecedor a gás no modelo simulado é de aproximadamente  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  concordando com o valor de elevação de temperatura do aquecedor do sistema série determinado experimentalmente, apresentado na Tabela 4.1. O número de horas em que o aquecedor permaneceu acionado no sistema série

experimental foi de 2,1 horas, consumindo neste período 0,43 m<sup>3</sup>. O relatório gerado pelo programa de simulação apresentou resultados de 2,3 horas de acionamento e 0,5 m<sup>3</sup>. Esta diferença é maior do que a apresentada pelo sistema paralelo mas é considerada satisfatória visto o pequeno intervalo de ensaio considerado, incerteza das medidas experimentais e arredondamentos dos valores gerados no relatório do programa de simulação. Percebe-se que tanto no modelo experimental quanto no modelo simulado as camadas 1, 2 e 3 praticamente não sofrem alterações de temperatura quando o aquecedor a gás é acionado, pois se localizam abaixo dos pontos de conexão do aquecedor ao reservatório, nesta configuração. Isto não ocorre no sistema paralelo.

A Figura 7.12 apresenta o comportamento das camadas de água no interior do reservatório horizontal quando somente o aquecedor a gás está em operação, não há portanto consumo e nem aporte de energia por parte dos coletores solares.

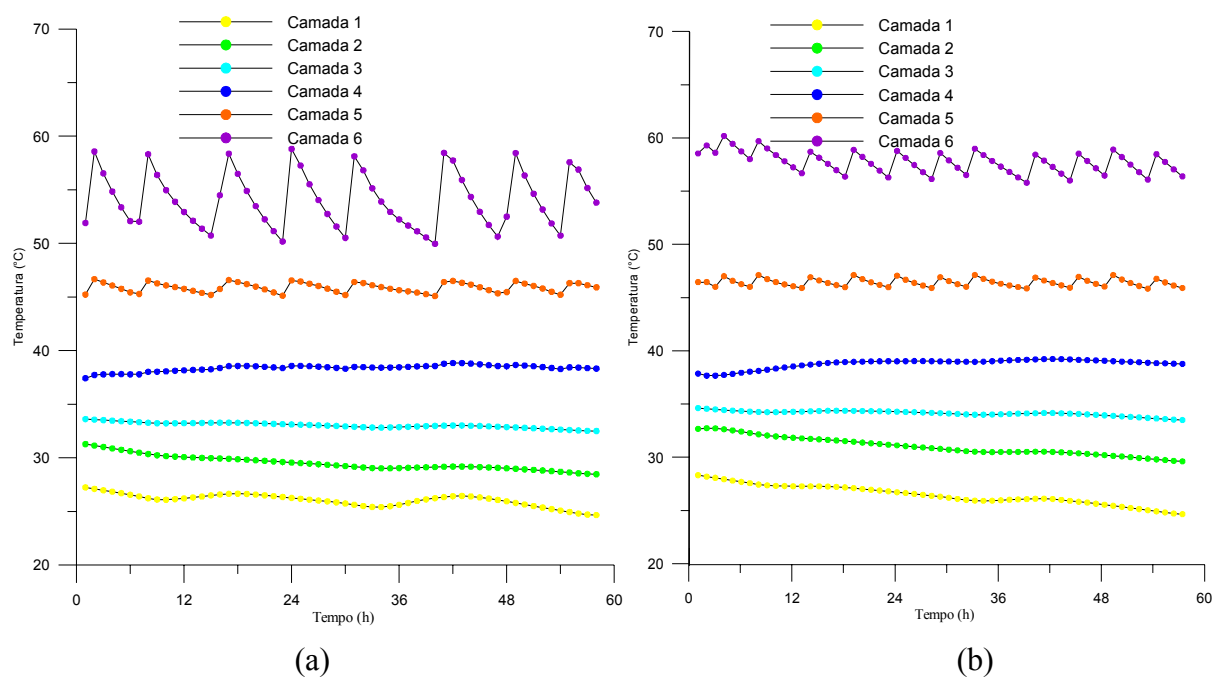


Figura 7.12 - Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório horizontal com acionamento de gás automático, iniciando no dia 27/04/2005.

A Figura 7.12 (a) apresenta o resultado do sistema experimental e a Figura 7.12 (b). Embora sejam inseridos os dados iniciais do sistema experimental no programa de simulação, este aciona o aquecedor a gás na primeira hora causando uma diferença na temperatura da camada 1, na condição inicial. Percebe-se que o acionamento do aquecedor a gás ocorre com intensidade maior no sistema experimental, porém ocorre em maior número de vezes no modelo



simulado. A altura do reservatório horizontal é menor que do reservatório vertical e nos modelos simulados ambos adotam 15 nós. Cada nó corresponde a uma altura da camada no interior do reservatório, logo se a altura do reservatório diminui e o número de nós mantém-se constante ocorre uma diminuição na altura de cada camada. Esta diminuição torna mais sensível a resposta do termostato em função de sua posição no interior do reservatório e do gradiente térmico encontrado no mesmo. Verificou-se que o consumo de gás no modelo simulado foi igual ao do período ensaiado ( $0,3\text{m}^3$ ).

A Figura 7.13 apresenta os dados de irradiância solar e temperatura ambiente utilizada no programa de simulação para efetuar a simulação dos coletores dos sistemas paralelo e série do dia 13/09/2003.

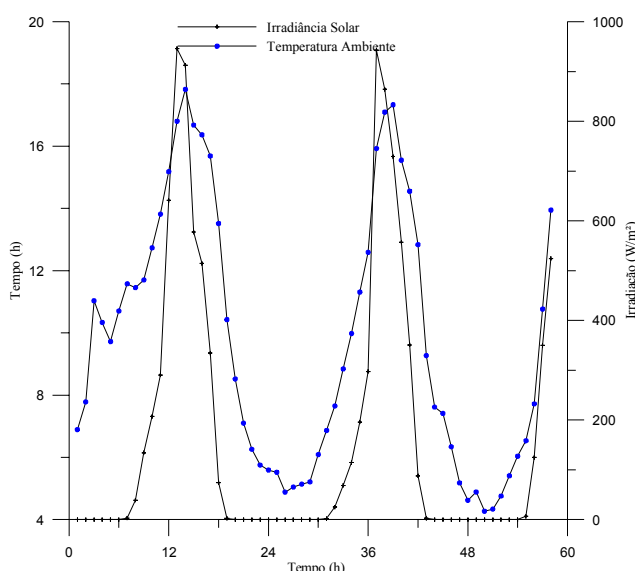


Figura 7.13 – Dados de irradiância solar e temperatura ambiente iniciando no dia 13/09/2003.

As Figuras 7.14 a 7.15 apresentam os resultados experimentais e simulados dos sistemas de aquecimento de água com reservatórios verticais, considerando os coletores e sem acionamento do aquecedor a gás. O ensaio dos dois sistemas experimentais foi realizado no mesmo dia, portanto sofreram as mesmas influências externas. Os sistemas experimentais foram ensaiados com condições iniciais semelhantes, o sistema paralelo apresentou uma estratificação inicial de temperaturas levemente superior e manteve esta diferença até o final do ensaio. Este ensaio ocorreu antes da alteração no isolamento dos reservatórios, logo os coeficientes globais de perdas térmicas utilizados no programa de simulação foram  $10$  e  $8,5$   $\text{W}/^\circ\text{C}$ , para os sistemas paralelo e série respectivamente.

No sistema paralelo experimental, Figura 7.14 (a), ocorre uma aproximação da temperatura de todas as camadas um pouco antes de ocorrer o pico de temperatura. A água que

circula pelo coletor provém do fundo do reservatório, onde se encontra o maior grau de estratificação e a menor temperatura. Nas primeiras horas do dia a água aquece pouco e acaba por esfriar as camadas abaixo da entrada, devido à altura de conexão do coletor no reservatório. Este fato também ocorre no modelo simulado, porém ele é um pouco mais atenuado.

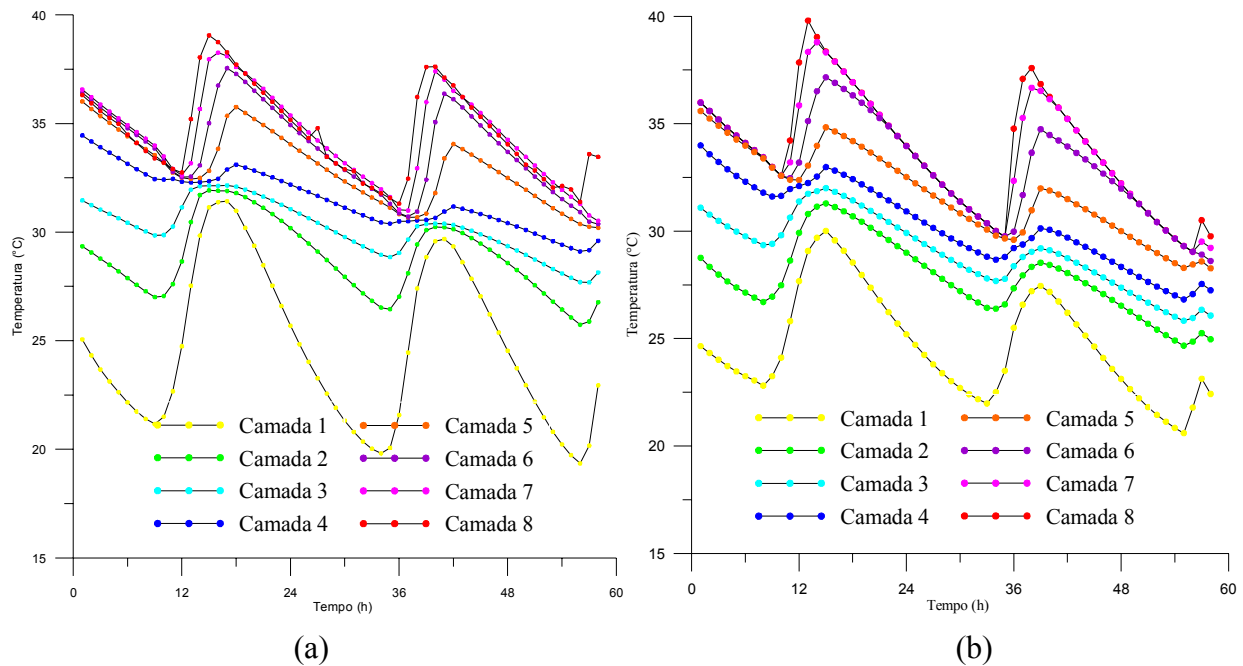


Figura 7.14 - Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema paralelo iniciando no dia 13/09/2003.

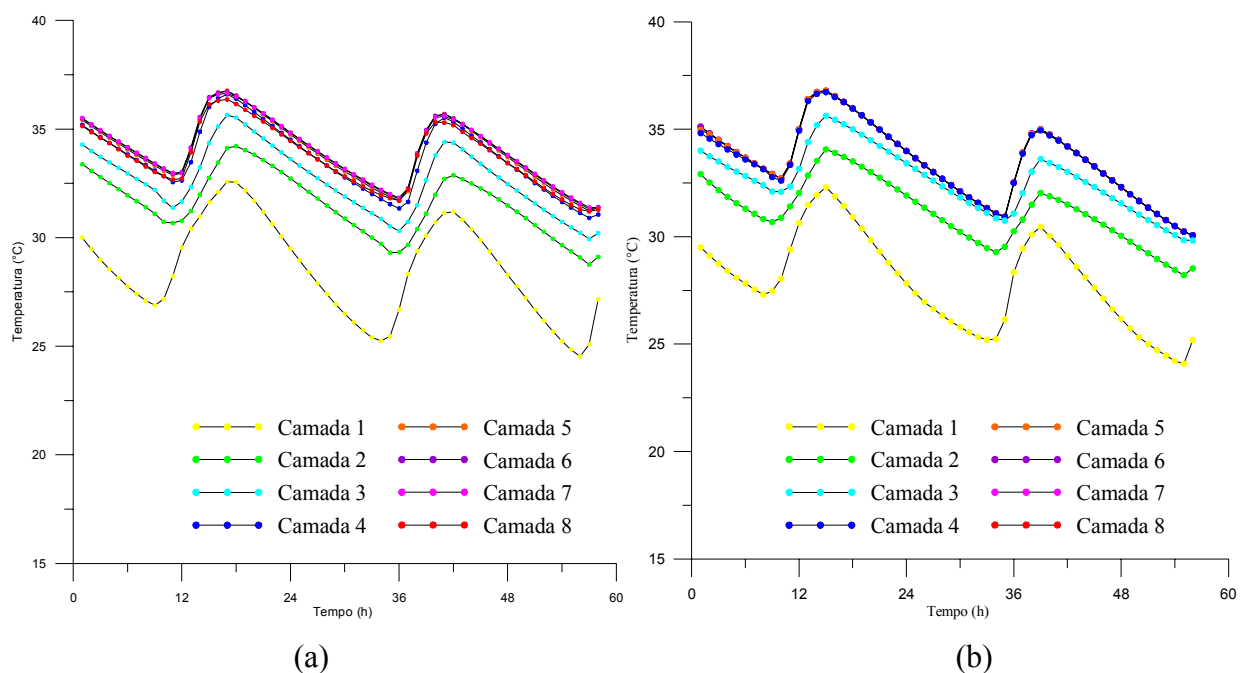


Figura 7.15 - Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema série iniciando no dia 13/09/2003.

A Figura 7.15 (a) demonstra a diferença de comportamento do perfil de temperaturas quando comparado com o sistema paralelo, Figura 7.14 (a), e a Figura 7.15 (b) representa igualmente esta diferença de comportamento devido as variações nas alturas de conexão.

A Figura 7.16 apresenta os dados de irradiância e temperatura ambiente utilizada no programa de simulação para efetuar a simulação dos coletores dos sistemas paralelo e série do dia 15/02/2005.

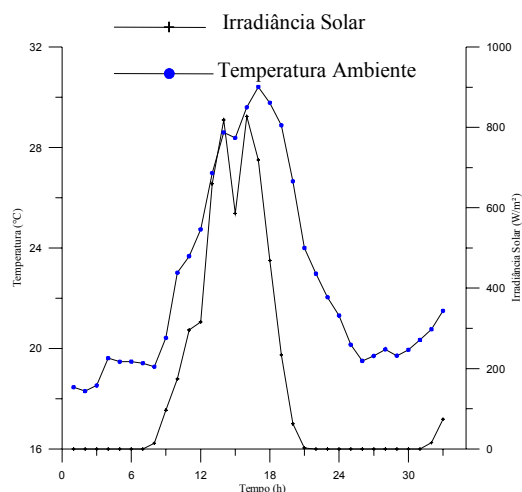


Figura 7.16 – Dados de irradiância solar e temperatura ambiente iniciando no dia 15/02/2005.

A Figura 7.17 (a) apresenta a temperatura na entrada e saída do coletor solar do sistema horizontal experimental.

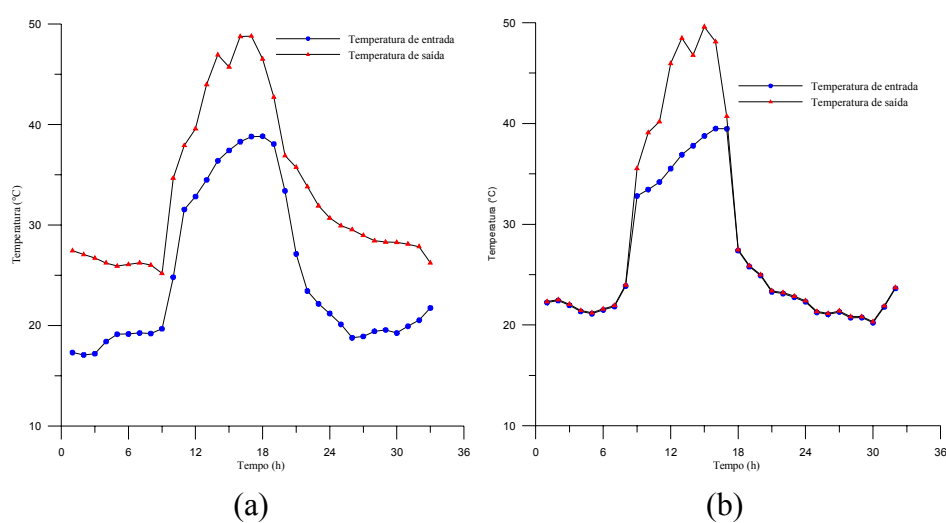


Figura 7.17 – Temperaturas de entrada e saída dos coletores solares do sistema horizontal experimental (a) e simulado (b), iniciando no dia 15/02/2005.

A Figura 7.17 (b) apresenta a temperatura de entrada e saída do coletor solar do sistema horizontal simulado no mesmo dia ensaiado da Figura 7.18. As maiores diferenças observadas entre o experimental e o simulado encontram-se justamente no período em que os coletores não estão operando. Neste período as temperaturas de entrada e saída do modelo simulado assumem o mesmo valor.

A Figura 7.18 apresenta os resultados experimentais e simulados do sistema de aquecimento de água com reservatório horizontal quando ocorre apenas o funcionamento dos coletores solares. No ensaio e na simulação não ocorreu consumo de água quente e o aquecedor a gás foi desativado. Percebe-se que o programa simula de forma satisfatória o funcionamento dos coletores solares para reservatórios horizontais.

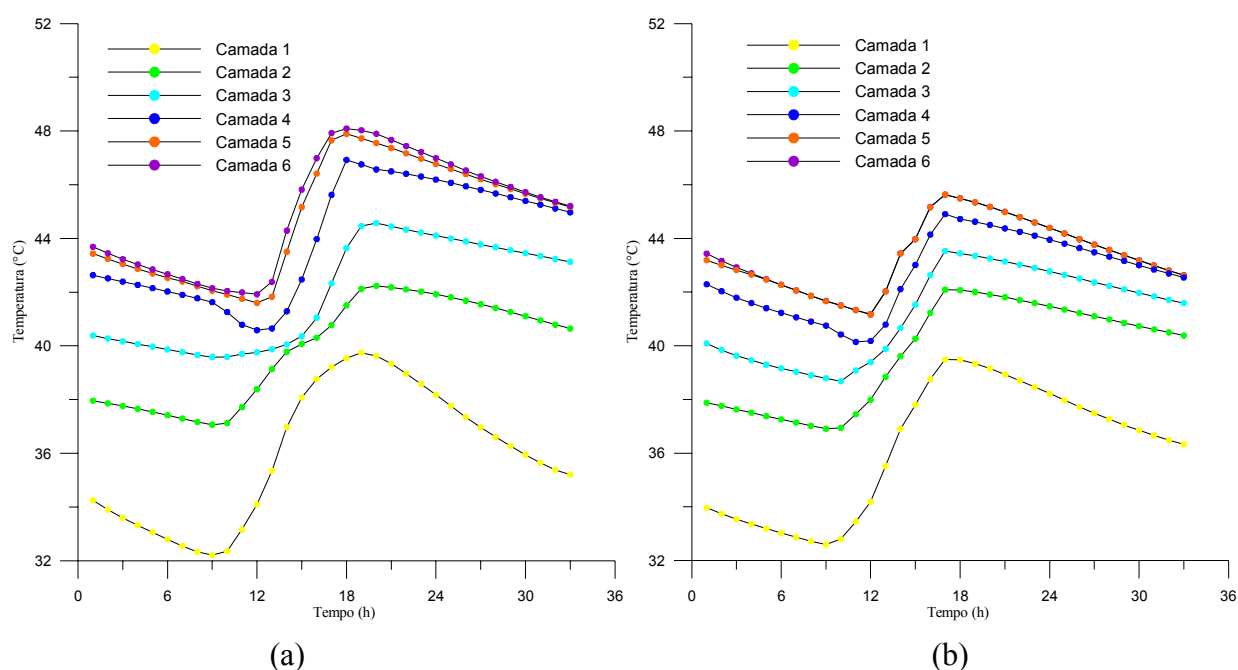


Figura 7.18 - Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas das camadas de água no interior do reservatório do sistema horizontal iniciando no dia 15/02/2005.

As Figuras 7.19 a 7.20 apresentam os perfis de temperatura da água no interior dos reservatórios verticais quando os sistemas operam de forma integrada, ou seja, quando coletores solares, aquecedores a gás e o consumo de água quente operam no sistema. Novamente aparece a diferença de comportamento entre os sistemas paralelo e série, sendo esta diferença representada corretamente pelos modelos simulados. O consumo de água quente ocorreu às 15 horas nas duas configurações.

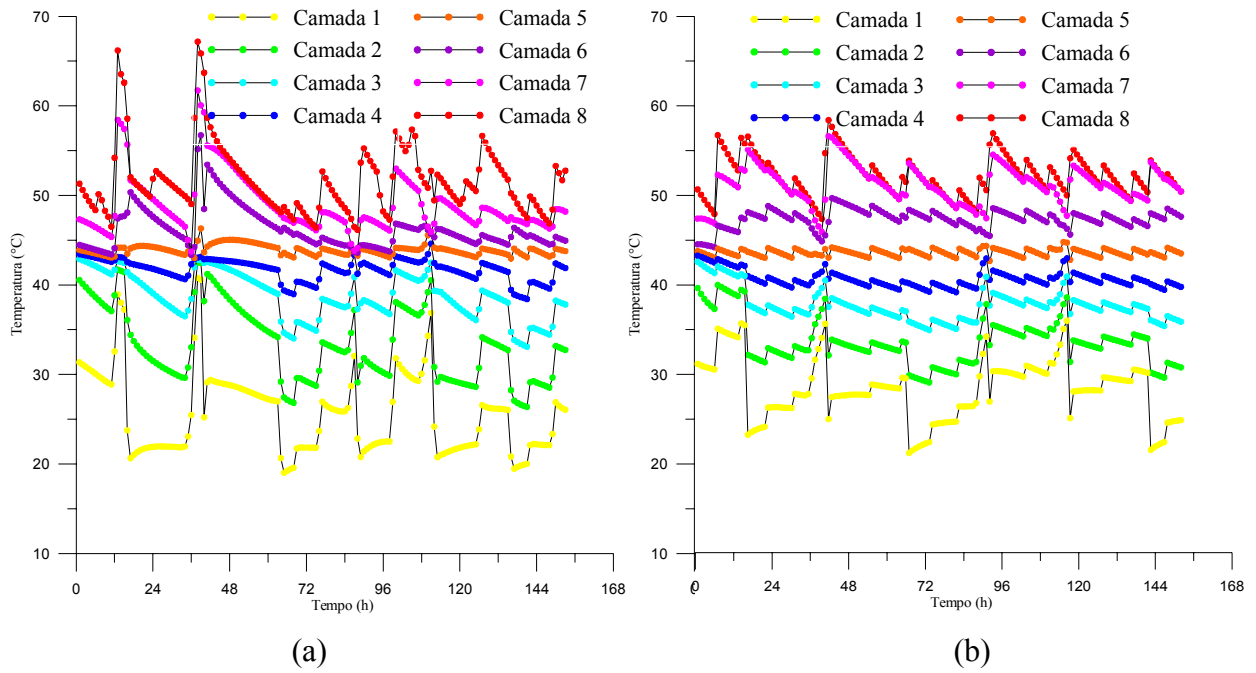


Figura 7.19 – Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas da água no interior do reservatório do sistema paralelo quando ocorre consumo de água quente, acionamento do aquecedor e funcionamento dos coletores solares.

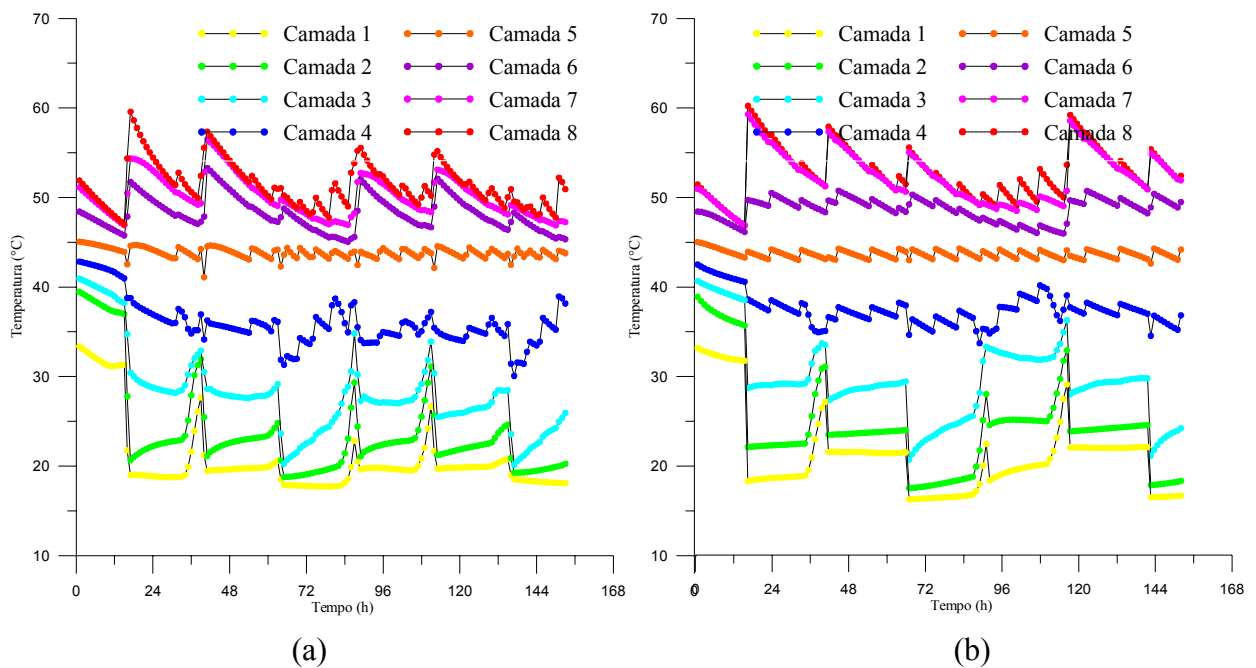


Figura 7.20 – Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas da água no interior do reservatório do sistema série quando ocorre consumo de água quente, acionamento do aquecedor e funcionamento dos coletores solares.

Na Figura 7.20 pode-se perceber nitidamente a diferença de comportamento das camadas de água superiores e inferiores. As camadas superiores respondem rapidamente ao

funcionamento do aquecedor a gás enquanto que as inferiores respondem ao funcionamento dos coletores solares. O termostato que comanda o acionamento do aquecedor a gás localiza-se na altura da camada 5, está ajustado para acionar aos 43°C e desligar o aquecedor aos 44°C, tanto para o sistema experimental como para o modelo simulado.

A Figura 7.21 apresenta o perfil de temperaturas da água no interior do reservatório horizontal quando o sistema opera de forma integrada, ou seja, quando coletores solares, aquecedores a gás e o consumo de água quente operam no sistema. O comportamento das temperaturas das camadas de água entre o experimental e o simulado é muito próximo. A camada 1 apresenta quantidade e intensidade de elevações de temperatura muito próximas entre o modelo simulado e o experimental.

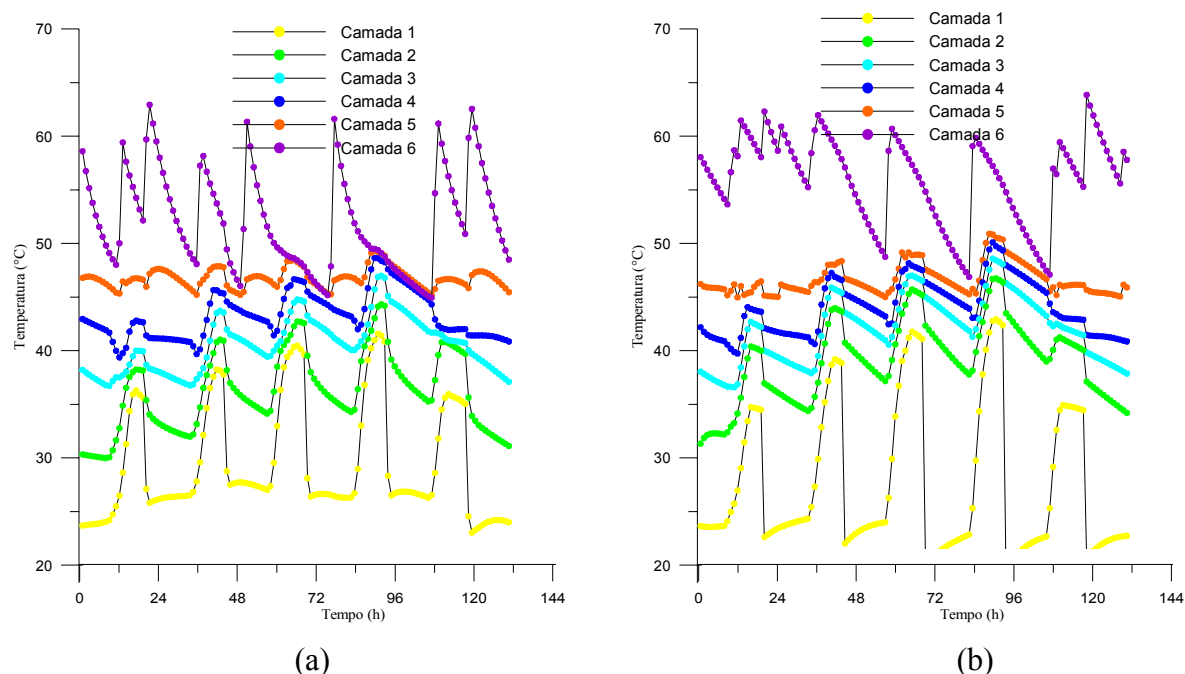


Figura 7.21 – Resultado experimental (a) e simulado (b) do perfil de temperaturas da água no interior do reservatório do sistema com reservatório horizontal quando ocorre consumo de água quente, acionamento do aquecedor e funcionamento dos coletores solares.

## CAPÍTULO 8

### ANÁLISE DOS SISTEMAS

Uma análise de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás pode abordar aspectos como atendimento do perfil de consumo, possibilidade de instalação, eficiência energética, rentabilidade econômica verificando o custo de implantação versus custo de operação e impacto ambiental. Neste capítulo será realizada uma análise econômica dos sistemas de aquecimento, atendendo um perfil de consumo pré-determinado considerando os dados climáticos da cidade de Porto Alegre.

Um estudo da eficiência destes sistemas em função do perfil de consumo foi realizado experimentalmente. O método experimental apresentou suas limitações devido à impossibilidade de repetir condições climáticas ao longo dos ensaios. A utilização do Programa “Aquesolgás” permitiu determinar as alturas de conexões, tanto dos coletores como do aquecedor a gás que apresentaram a melhor eficiência para um dado perfil de consumo.

A configuração dita como mais eficiente foi simulada e seus resultados foram comparados com os resultados das simulações de diferentes sistemas de aquecimento de água que atendiam o mesmo perfil de consumo. A partir dos resultados das simulações foram determinados os custos de implantação e de operação de cada sistema de aquecimento. Por haver diferenças de custos de implantação e operação entre os sistemas simulados, utilizou-se um método que permitiu uniformizar os valores para uma mesma data a fim de compará-los.

#### **8.1 Determinação da Configuração do Sistema de Aquecimento Mais Eficiente**

A metodologia de determinação do sistema de aquecimento mais eficiente adotou como critério o atendimento de um perfil de consumo. O perfil de consumo foi de 200 litros de água a 43 °C, ocorrendo às 7 horas da manhã (30%) e entre 18 e 21 horas (70%). A altura da tomada de água de consumo (950mm), altura do termostato (680mm) e altura de reposição de água da rede (80mm) mantiveram-se iguais para todas as configurações simuladas.

As duas configurações experimentais de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás, denominadas série e paralela, deram origem a 20 configurações que combinaram duas possibilidades de alturas de conexão dos coletores solares e quatro

possibilidades de conexão do aquecedor a gás de passagem. Os parâmetros destas configurações são apresentados na Tabela 8.1.

Tabela 8.1 – Alturas de conexões do coletor solar e aquecedor a gás das configurações simuladas.

<b>Configuração</b>	<b>Altura de entrada no coletor solar (m)</b>	<b>Altura de saída do coletor solar (m)</b>	<b>Altura de entrada no aquecedor a gás (m)</b>	<b>Altura de saída do aquecedor a gás (m)</b>
1	0,08	1,1	0,08	0,2
2	0,08	1,1	0,08	0,5
3	0,08	1,1	0,08	0,8
4	0,08	1,1	0,08	1,1
5	0,08	1,1	0,2	0,5
6	0,08	1,1	0,2	0,8
7	0,08	1,1	0,2	1,1
8	0,08	1,1	0,5	0,8
9	0,08	1,1	0,5	1,1
10	0,08	1,1	0,8	1,1
11	0,08	0,5	0,08	0,2
12	0,08	0,5	0,08	0,5
13	0,08	0,5	0,08	0,8
14	0,08	0,5	0,08	1,1
15	0,08	0,5	0,2	0,5
16	0,08	0,5	0,2	0,8
17	0,08	0,5	0,2	1,1
18	0,08	0,5	0,5	0,8
19	0,08	0,5	0,5	1,1
20	0,08	0,5	0,8	1,1

Realizaram-se as simulações destas 20 configurações com o intuito de verificar a configuração mais eficiente. Todas as configurações atenderam ao mesmo perfil de consumo, utilizando os mesmos componentes nas mesmas regulagens. A configuração que consumiu menos gás foi considerada a mais eficiente.

O programa de simulação gerou dados de temperatura ambiente, temperatura da água na rede, radiação solar e velocidade de vento para um ano típico. Estes mesmos dados foram utilizados em todas as configurações simuladas.



No ajuste do programa de simulação garantiu-se que a mesma quantidade de água de consumo final fosse utilizada para as diferentes configurações simuladas. A temperatura da água de consumo final é ajustada para 43° C. A água de consumo final utilizou uma mistura da água da rede e da água do interior do reservatório, para atingir a temperatura de consumo ajustada. A quantidade de energia fornecida pelos reservatórios de cada sistema pode ser diferente, porém a energia fornecida para o consumo foi idêntica.

### **8.1.1 Resultados das simulações**

Inicialmente são apresentados os resultados da eficiência do sistema solar de aquecimento, fração solar, energia agregada ao reservatório e consumo anual de gás, dos sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás utilizando dois e três coletores solares, com as mesmas características dos utilizados experimentalmente. Em seguida foram selecionadas as configurações mais eficientes, com dois e três coletores solares, para efetuar a simulação com 4 e 5 coletores. Todas as simulações adotaram reservatórios verticais em virtude de apresentarem melhores resultados que os reservatórios horizontais.

No intuito de verificar se todas as configurações foram capazes de atender ao perfil de demanda verificou-se a temperatura de consumo e a vazão de água fria dos arquivos gerados pela simulação. A temperatura de consumo não assumiu valores inferiores a 43° C. A vazão de água fria foi sempre maior que zero indicando que junto com a água retirada do reservatório sempre foi acrescentado água fria da rede para atender o consumo.

A Figura 8.1 apresenta a eficiência média do sistema solar das 20 configurações, com dois e três coletores solares. Nota-se que as configurações 8, 9, 18 e 19 apresentam as maiores eficiências médias do sistema solar. As configurações 8 e 9 apresentam a posição 1 das conexões dos coletores solares, enquanto que as configurações 18 e 19 utilizam a posição 2 das conexões dos coletores solares. As configurações 8 e 18 utilizam a mesma posição das conexões do aquecedor a gás, assim como as configurações 9 e 19.

A Figura 8.2 apresenta a fração solar das 20 configurações simuladas, também com dois e três coletores solares. As configurações de número 5, 6, 7, 8, 9, 18 e 19 destacaram-se entre as demais por apresentarem frações solares superiores a 45%, para dois coletores solares, e superiores a 60%, para três coletores solares. Esta elevada fração solar concorda com a elevada eficiência média do sistema solar destas configurações. Percebe-se também que ao aumentar a quantidade de coletores de dois para três o incremento da fração solar das configurações 8 e 9 (16,3%) é superior ao da configuração 19 (15%).

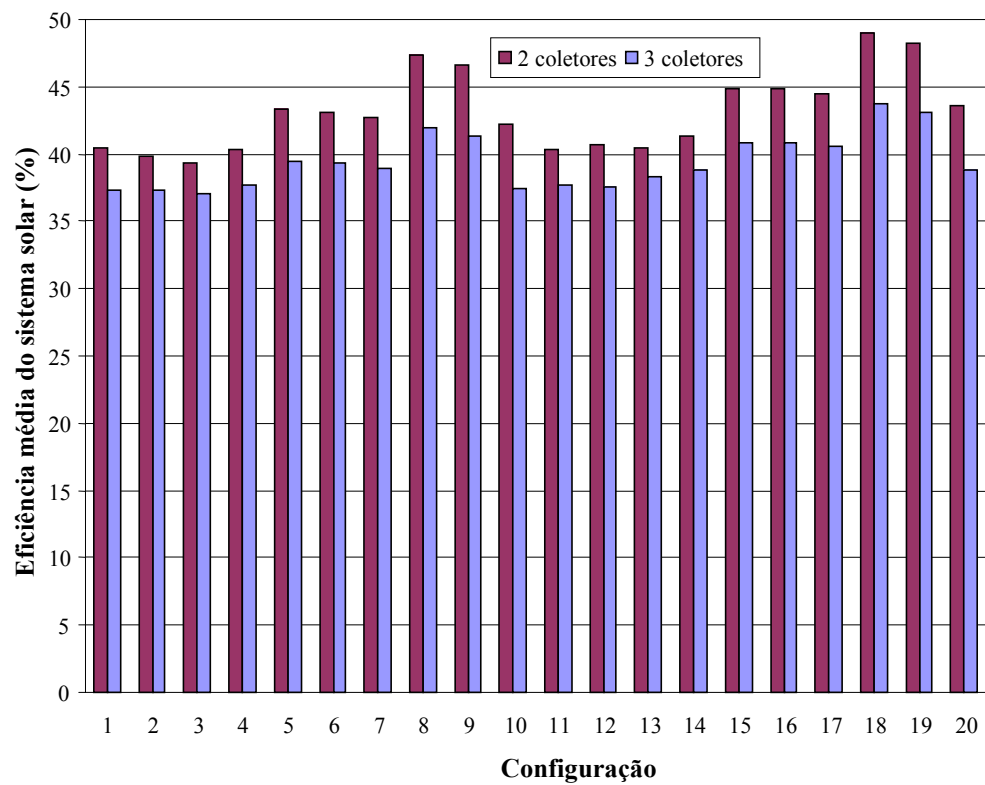


Figura 8.1 – Eficiência média do sistema solar das 20 configurações simuladas com dois e três coletores solares.

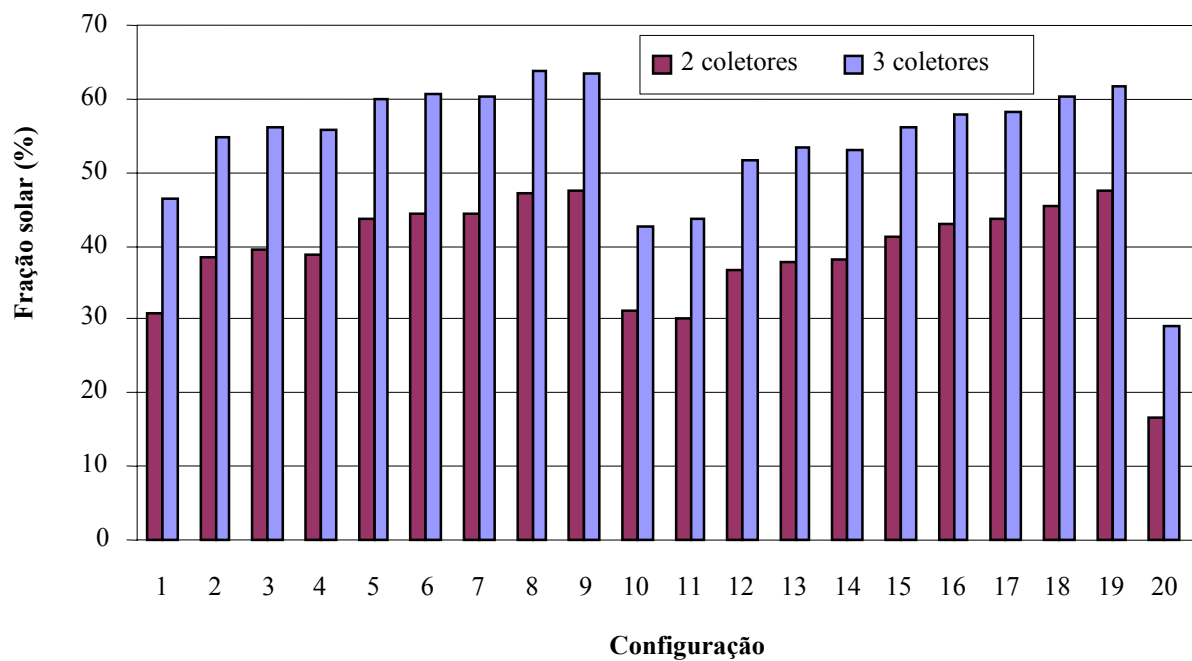


Figura 8.2 – Fração solar das 20 configurações simuladas com dois e três coletores solares.

A Figura 8.3 apresenta a energia agregada ao reservatório das 20 configurações, utilizando dois e três coletores solares. A energia anual consumida é de 7420 MJ, igual para todas as configurações. A diferença entre a energia agregada ao reservatório e a energia consumida representa as perdas térmicas. Logo, a configuração que apresenta a menor energia agregada ao reservatório é a que apresenta menos perdas. As configurações 5, 6, 7, 8 e 9 destacaram-se por terem baixa energia térmica agregada ao reservatório.

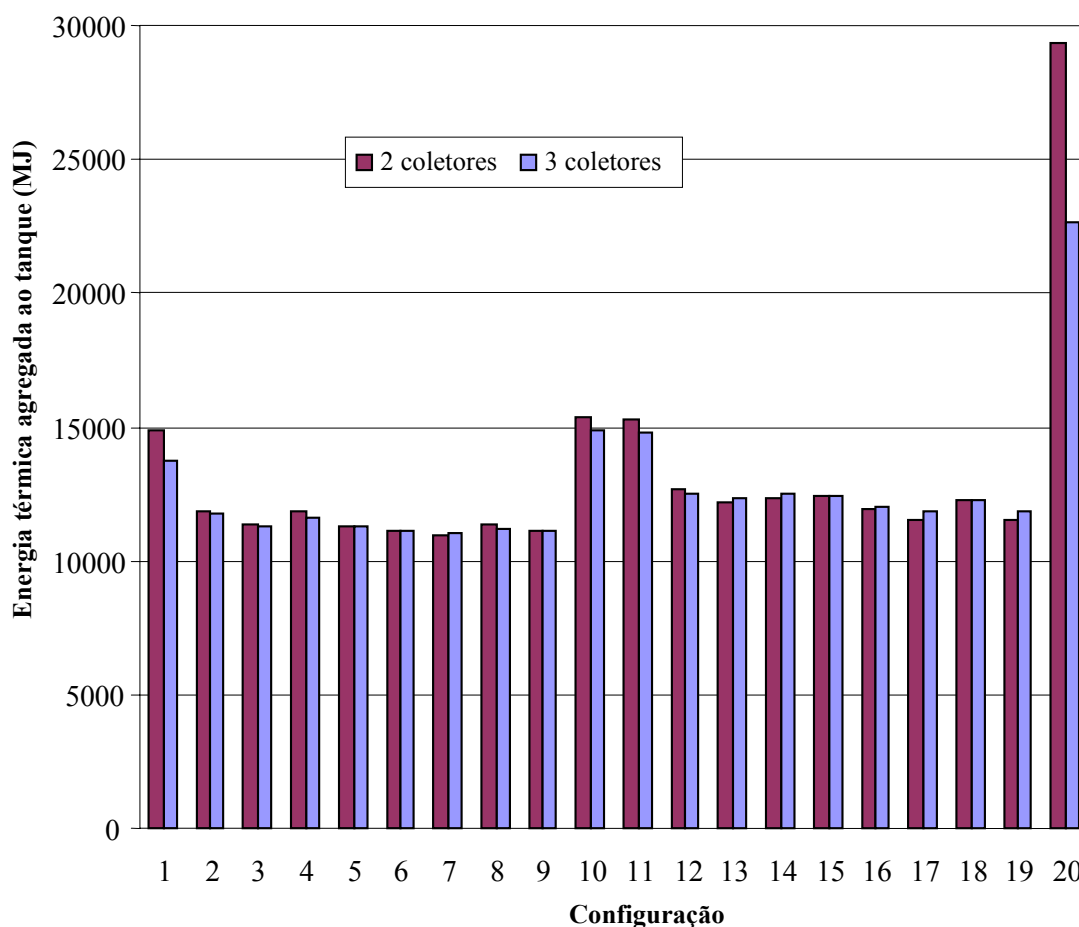


Figura 8.3 – Energia térmica agregada ao reservatório das 20 configurações com dois e três coletores solares.

A Figura 8.4 apresenta o consumo anual de gás das 20 configurações simuladas para dois e três coletores. A configuração de número 20 apresenta um consumo de gás excessivo quando comparada as demais. O termostato, nesta configuração, localiza-se abaixo da tomada e reposição de água do aquecedor a gás logo não exerce controle direto sobre o acionamento do

aquecedor. Somente é acionado após aquecer um grande volume de água na parte superior do reservatório. Algo similar ocorre com as configurações de números 1, 10 e 11.

As configurações de número 5, 6, 7, 8, 9 e 19 destacam-se por apresentarem baixos consumos anuais de gás. Estas configurações possuem as entradas e saídas do aquecedor próximas da altura do termostato, exercendo um controle direto sobre o mesmo. É recomendado que a saída para o aquecedor localize-se abaixo da altura do termostato e que este esteja posicionado abaixo da tomada de água para consumo.

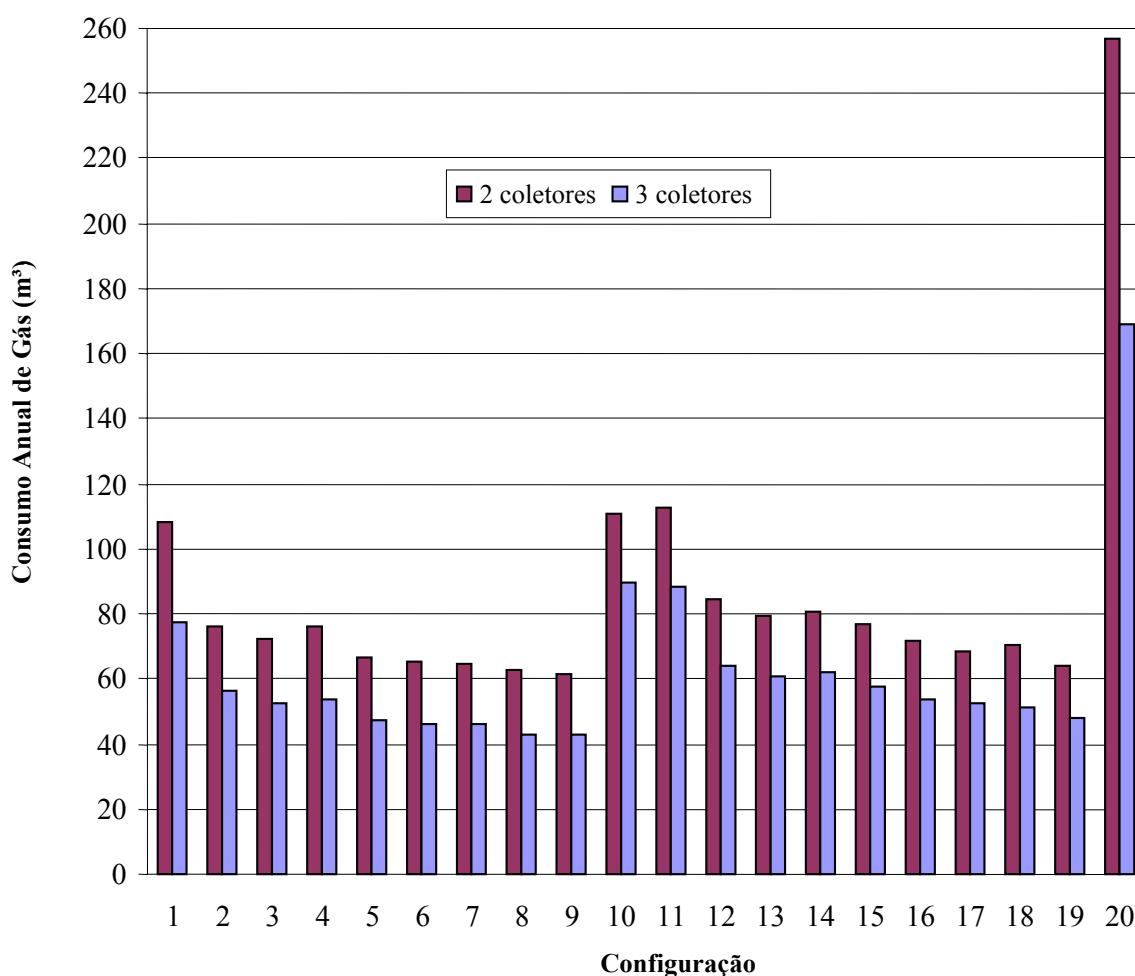


Figura 8.4 – Consumo anual de gás das 20 configurações simuladas com dois e três coletores solares.

Adotando o critério de configuração mais eficiente como sendo aquela que apresenta o menor consumo anual de gás para um número fixo de coletores solares, a escolha recai sobre a

configuração 9, com um consumo anual de gás de 61,3 m<sup>3</sup>, com dois coletores e 42,8 m<sup>3</sup>, com três coletores.

Posteriormente foi realizada a simulação com 4 coletores das configurações mais eficientes (5, 6, 7, 8, 9 e 19) verificando-se novamente os resultados da eficiência do sistema solar de aquecimento, fração solar, energia agregada ao reservatório e consumo anual de gás. Os resultados são apresentados na Tabela 8.2 e indicam a configuração 8 como sendo a mais eficiente. A configuração 19 apresenta a melhor eficiência média dos coletores solares, porém possui a maior energia térmica agregada ao reservatório e por consequência as maiores perdas.

Tabela 8.2 – Resultados das simulações das configurações mais eficientes utilizando 4 coletores solares.(média anual)

<b>Configuração</b>	<b>Eficiência média do sistema solar (%)</b>	<b>Fração solar (%)</b>	<b>Energia térmica agregada ao tanque (MJ)</b>	<b>Consumo Gás (m<sup>3</sup>)</b>
5	35,8	71,6	11382	34,1
6	35,8	72	11258,3	33,1
7	35,5	71,8	11219,1	33,3
8	37,4	74,6	11340,3	30,3
9	36,9	74,1	11278,5	30,8
19	39,1	72	12291,4	36,3

Realizaram-se novas simulações aumentando o número de coletores e alterando a posição do termostato de 0,68 m para 0,88 m até atingir uma fração solar próxima a 100% nos meses de verão. Com 5 coletores solares as configurações 8, 9, 18 e 19 atingiram esta fração solar. Os resultados das simulações são apresentados na Tabela 8.3. Nesta Tabela inseriram-se os resultados da melhor configuração que utiliza reservatório horizontal para demonstrar a superioridade de desempenho de sistemas que utilizam reservatórios verticais.

Tabela 8.3 - Resultados das simulações das configurações mais eficientes utilizando 5 coletores solares.(média anual)

<b>Configuração</b>	<b>Eficiência média do Sistema solar (%)</b>	<b>Fração solar (%)</b>	<b>Energia térmica agregada ao tanque (MJ)</b>	<b>Consumo Gás (m<sup>3</sup>)</b>
Horizontal	33,3	76,6	12365,8	30,5
8	34,6	85,9	11331,4	16,8
9	34,1	84,5	11346,9	18,5
18	37,2	83,6	12516,4	21,6
19	36,8	83,5	12406,4	21,6

A configuração 8 apresenta o menor consumo anual de gás para a simulação com 5 coletores, conforme Figura 8.5. Cabe ressaltar que esta configuração esteve entre as configurações que apresentaram os melhores resultados com 2, 3, 4 e 5 coletores solares.

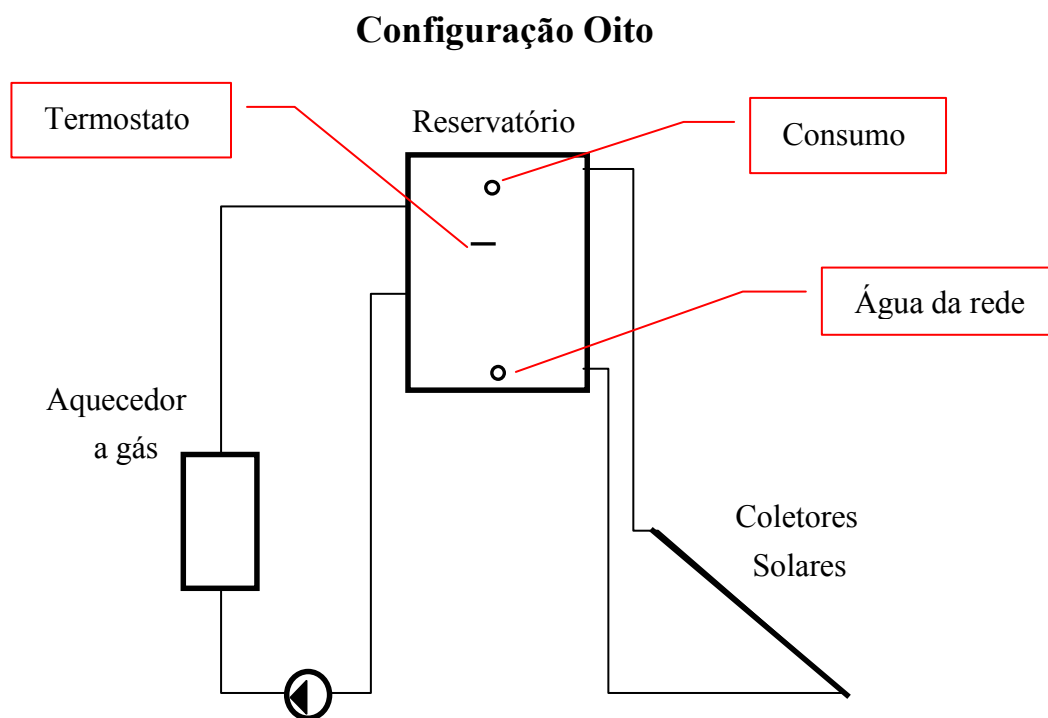


Figura 8.5 – Representação esquemática da configuração oito.

## 8.2 Comparação de Sistemas de Aquecimento de Água

Tendo determinado através da simulação a configuração que apresenta a maior eficiência para o sistema de aquecimento em estudo neste trabalho, efetuaram-se comparações entre outros tipos de sistemas de aquecimento de água. Foram escolhidos sistemas de aquecimento de acumulação que utilizassem quando possível os mesmos componentes. Foram simulados os sistemas solar e gás, solar e eletricidade, somente gás e somente eletricidade.

A Tabela 8.4 apresenta os valores dos componentes de uso comum dos sistemas utilizados em todos os sistemas de aquecimento de água. Foram considerados os mesmos valores de instalação do sistema solar, tubulação e isolamento independente do número de coletores.

Tabela 8.4 – Custo do sistema de aquecimento de água com energia solar (com 1 coletor solar).

<b>Componentes</b>	<b>Valor (R\$)</b>
Instalação sistema solar	600,00
Coletor Solar	550,00
Tubulação e isolamento (7m)	150,00
Reservatório 600 litros	1800,00
Total	3100,00

A Tabela 8.5 apresenta os valores dos componentes e da instalação do aquecedor a gás nos sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás. Sistemas de aquecimento com energia solar e eletricidade não necessitam de componentes complementares além dos apresentados nos sistemas de aquecimento com energia solar, pois a maioria dos fornecedores inclui a resistência elétrica no interior dos reservatórios. Deve-se salientar que o circuito de controle do aquecedor a gás ainda não é produzido em série tornando seu custo de fabricação ainda elevado.

Tabela 8.5 – Custo do sistema de aquecimento a gás.

<b>Componentes</b>	<b>Valor (R\$)</b>
Instalação aquecedor a gás	90,00
Bomba	60,00
Aquecedor a gás	400,00
Controlador do gás	150,00
Total	700,00

A Tabela 8.6 apresenta os custos de implantação, manutenção, operação e fração solar dos sistemas a serem comparados. O custo de manutenção complementar mencionado na Tabela 8.6 refere-se apenas a diferença do custo de manutenção dos sistemas a gás em relação aos sistemas com eletricidade, sendo as manutenções anuais inerentes a ambos os sistemas elas foram desconsideradas na análise. Além da manutenção anual necessária em todos os sistemas, nos sistemas de aquecimento de água com gás se considerou uma revisão do aquecedor a gás a cada sete anos e meio no valor de R\$ 100,00 e uma substituição de bombas a cada dez anos.

O custo das configurações que utilizam apenas gás e apenas eletricidade foi calculado utilizando o custo do reservatório e aquecedor, para o sistema a gás, e reservatório para o sistema com eletricidade.

Tabela 8.6 – Custos dos sistemas.

<b>Sistemas</b>	<b>Custo de implantação (R\$)</b>	<b>Custo de manutenção complementar (R\$/ciclo de vida)</b>	<b>Período da manutenção</b>	<b>Custo de operação (R\$/mês)</b>	<b>Fração solar (% Média anual)</b>
5 coletores e gás	6000	500	7,5 e 10 anos	6,92	85,9
4 coletores e gás	5450	500	7,5 e 10 anos	12,47	74,6
3 coletores e gás	4900	500	7,5 e 10 anos	19,45	60,4
2 coletores e gás	4350	500	7,5 e 10 anos	25,58	47,3
5 coletores e eletricidade	5300	0	0	16,04	85,9
4 coletores e eletricidade	4750	0	0	28,96	74,6
3 coletores e eletricidade	4200	0	0	45,16	60,4
2 coletores e eletricidade	3650	0	0	60,10	47,3
Gás	2500	500	7,5 e 10 anos	49,11	0
Eletricidade	1800	0	0	114,05	0

### 8.3 Método Econômico

Sabe-se que a alternativa tecnológica que apresenta a maior eficiência não é necessariamente a que traz a maior economia financeira. Uma análise econômica sobre diferentes sistemas de aquecimento de água pode determinar o sistema que apresenta o melhor desempenho ao longo do tempo. Existem vários métodos, que utilizam diferentes critérios, para avaliar economicamente sistemas de aquecimento. Segundo Duffie e Beckman (1991) a abordagem mais completa para efetuar análises econômicas de sistemas que operam com energia



solar é utilizar o método LCC (Life Cycle Cost), Custo do Ciclo de Vida. O método LCC permite comparar custos futuros com custos atuais. Isto é realizado descontando todos os custos antecipados para uma base comum do valor presente, isto é, quanto deveria ser investido hoje, na melhor taxa de investimento, para ter os fundos avaliados no futuro para pagar todas as despesas.

As despesas a serem consideradas nesta tese serão pagamento das parcelas do empréstimo do custo de implantação, custo de operação (combustível) e custo de manutenção. Por se tratar de instalação residencial não serão realizados cálculos de dedução de imposto de renda. Serão considerados 30 anos para o ciclo de vida do sistema. O valor residual dos materiais foi analisado, mas o efeito do mesmo foi tão pequeno no resultado que se decidiu não incluí-lo.

Foram considerados três cenários com taxas de juros mensais de empréstimo de 5%, 2% e 1%. A taxa de juros de mercado para investimento foi de 1% ao mês e a inflação mensal foi de 0,48%, respectivamente cenários 1, 2 e 3. O período do empréstimo foi de 36 meses e o de análise foi o mesmo período do ciclo de vida do equipamento (360 meses). O valor da parcela do empréstimo é calculado segundo o sistema francês de amortização PRICE, onde o valor das parcelas é constante, a parcela de juros decresce com o tempo, ao passo que a parcela de amortização aumenta com o tempo. O valor do energético foi calculado aplicando uma inflação de 0,48% ao mês, tanto para o gás (GLP) como para a eletricidade, e aplicado o método do valor presente sobre os valores inflacionados ao longo dos 30 anos da análise. Esta mesma abordagem foi realizada para o cálculo do valor presente da manutenção.

O valor da energia elétrica, apresentado na Tabela 2.2, acrescido da alíquota de ICMS de 30% da Tabela 2.3, assim como o valor do botijão de gás GLP, apresentado na Figura 2.4, utilizando os dados de densidade média e poder calorífico superior extraídos da Tabela 2.4 foram transformados na mesma base, ou seja, R\$/MJ e são apresentados na Tabela 8.7.

Tabela 8.7 – Custo dos combustíveis em R\$/MJ.

<b>Combustíveis</b>	<b>R\$</b>
kWh da eletricidade residencial	0,30436
kWh da eletricidade com 30% de ICMS	0,43480
<b>MJ da eletricidade</b>	<b>0,120777</b>
Botijão de gás de 13 kg de GLP	32,00
m <sup>3</sup> do gás do Botijão de 13 kg	4,307692
<b>MJ do Gás GLP de 13 kg</b>	<b>0,036745</b>
Botijão de gás de 45 kg de GLP	127,00
m <sup>3</sup> do gás do Botijão de 45 kg	4,938888
<b>MJ do Gás GLP de 45 kg</b>	<b>0,042199</b>
MJ do Gás Natural	0,031250

O método do valor presente utilizado para trazer os gastos futuros para uma única data utiliza a equação 8.1.

$$VP = \frac{A}{(1+d)^N} \quad (8.1)$$

onde  $A$  é o valor no período  $N$ ,  $d$  é a taxa de juros do mercado,  $N$  é o número de pagamentos.

O somatório dos  $N$  termos dos valores presentes representa o valor presente de cada custo. Os valores presentes dos custos de implantação, manutenção e operação assim como a soma destes termos é apresentada na Tabela 8.8.

Tabela 8.8 – Valores presentes dos custos de implantação, manutenção, operação e total dos sistemas de aquecimento simulados (cenário 1).

<b>Sistemas</b>	<b>Valor presente do custo de implantação</b>	<b>Valor presente do custo de manutenção complementar</b>	<b>Valor presente do custo de operação</b>	<b>Valor presente total</b>
5 coletores e gás	10766	171	734	11671
4 coletores e gás	9798	171	1323	11292
3 coletores e gás	8830	171	2064	11065
2 coletores e gás	7862	171	2746	10779
5 coletores e eletricidade	9534	0	1573	11107
4 coletores e eletricidade	8566	0	2832	11398
3 coletores e eletricidade	7598	0	4417	12015
2 coletores e eletricidade	6630	0	5878	12508
<b>Gás</b>	<b>4607</b>	<b>171</b>	<b>5211</b>	<b>9989</b>
Eletricidade	3574	0	11154	14728

O sistema economicamente mais vantajoso é o que apresenta o menor valor presente total. Para o cenário 1, que utiliza taxa de juros de financiamento de 5%, o sistema de

aquecimento de água que apresenta o menor valor presente total é o sistema que utiliza gás (GLP), botijão de 45kg. O sistema que opera com dois coletores solares e gás apresenta o segundo menor custo com uma diferença de R\$ 800,00 para o primeiro. O sistema que opera apenas com gás utiliza o mesmo reservatório das demais configurações e adota a posição da configuração 8 para as alturas de conexão do aquecedor a gás. O resultado apresentado na Tabela 8.8 é verdadeiro para o cenário descrito neste capítulo. Utilizando-se gás natural ou gás GLP do botijão de 13 kg os resultados seriam ainda mais favoráveis para o sistema que utiliza apenas gás, visto o mais baixo custo destes combustíveis.

A Tabela 8.9 apresenta os resultados dos valores presentes dos dez sistemas utilizando uma taxa de juros de financiamento de 2% ao mês. Neste cenário o sistema que utiliza 5 coletores e eletricidade e o sistema que utiliza 4 coletores e gás são os mais vantajosos economicamente. O sistema com 5 coletores e eletricidade apresenta uma pequena vantagem sobre o sistema com 4 coletores e gás. O sistema que utiliza apenas energia elétrica para aquecimento é o que apresenta o custo mais elevado.

Tabela 8.9 – Valores presentes dos custos de implantação, manutenção, operação e total dos sistemas de aquecimento simulados (cenário 2).

<b>Sistemas</b>	<b>Valor presente do custo de implantação</b>	<b>Valor presente do custo de manutenção complementar</b>	<b>Valor presente do custo de operação</b>	<b>Valor presente total</b>
5 coletores e gás	7061	171	734	7966
<b>4 coletores e gás</b>	<b>6433</b>	<b>171</b>	<b>1323</b>	<b>7927</b>
3 coletores e gás	5805	171	2064	8040
2 coletores e gás	5177	171	2746	8094
<b>5 coletores e eletricidade</b>	<b>6262</b>	<b>0</b>	<b>1573</b>	<b>7835</b>
4 coletores e eletricidade	5634	0	2832	8466
3 coletores e eletricidade	5004	0	4417	9421
2 coletores e eletricidade	4376	0	5878	10254
Gás	3063	171	5211	8445
Eletricidade	2463	0	11154	13617

A Tabela 8.10 apresenta os resultados dos valores presentes dos dez sistemas de aquecimento de água utilizando uma taxa de juros de financiamento de 1% ao mês, igual a taxa de juros de investimento. No terceiro cenário a opção mais vantajosa é o sistema com cinco coletores solares e apoio elétrico. Percebe-se que existe pouca variação entre os valores presentes totais dos sistemas de aquecimento que operam com gás, seja com nenhum, 2, 3, 4 ou 5 coletores solares. Esta Tabela apresenta a configuração com cinco coletores e eletricidade como fonte de energia auxiliar como a configuração mais vantajosa, porém a diferença entre o valor da configuração que utiliza cinco coletores solares e gás como energia auxiliar é inferior a R\$ 33,00. Esta diferença é muito pequena podendo ser invertida facilmente em função de variações nas cotações de qualquer um dos componentes dos sistemas de aquecimento de água.

Tabela 8.10 – Valores presentes dos custos de implantação, manutenção, operação e total dos sistemas de aquecimento simulados (cenário 3).

<b>Sistemas</b>	<b>Valor presente do custo de implantação</b>	<b>Valor presente do custo de manutenção complementar</b>	<b>Valor presente do custo de operação</b>	<b>Valor presente total</b>
5 coletores e gás	6000	171	734	6905
4 coletores e gás	5450	171	1323	6944
3 coletores e gás	4950	171	2064	7185
2 coletores e gás	4350	171	2746	7267
5 coletores e eletricidade	5300	0	1573	6873
4 coletores e eletricidade	4750	0	2832	7582
3 coletores e eletricidade	4200	0	4417	8617
2 coletores e eletricidade	3650	0	5878	9528
Gás	2500	171	5211	7882
Eletricidade	1800	0	11154	12954

Os resultados dos valores presentes apresentados nas Tabelas 8.8 a 8.10 deixam claro que o custo de operação do sistema de aquecimento com cinco coletores solares e apoio a gás foi o mais baixo de todos os sistemas e que o sistema sem coletor e com energia elétrica apresenta o

maior custo de operação. Os resultados também demonstram que um sistema de aquecimento pode ser economicamente mais interessante que outro em função da taxa de juros de financiamento em que a análise foi realizada. Nos três cenários apresentados utilizou-se uma abordagem simplificada ao adotar-se a taxa de inflação geral, projetada pelo governo para o ano de 2005, no cálculo do custo de operação dos sistemas de aquecimento ao longo de sua vida útil (30 anos).

A Tabela 8.11 apresenta os valores dos energéticos (gás GLP de botijão de 13 kg e eletricidade) praticados no estado do Rio Grande do Sul entre os anos de 2001 e 2004, assim como a taxa de inflação anual e mensal calculada para cada energético. Observa-se que as taxas de inflação dos combustíveis nestes últimos três anos foram superiores à taxa de inflação geral projetada utilizada nos cenários 1, 2 e 3.

Com os dados da Tabela 8.11 é possível calcular o valor médio da taxa de inflação mensal dos últimos três anos para a energia elétrica e para o gás, sendo 1,14% e 1,35%, respectivamente. Esta diferença de taxas de inflação entre os combustíveis cria um cenário pessimista para o GLP.

Tabela 8.11 – Valores da energia elétrica, botijão de gás e suas taxas de inflação.  
(ANEEL, 2005 e ANP, 2005)

Ano	Valor da Energia Elétrica (R\$/MWh)	Taxa de inflação anual (%)	Taxa de inflação mensal (%)	Valor do botijão de 13 kg de gás GLP	Taxa de inflação anual (%)	Taxa de inflação mensal (%)
2004	274,16	15,86	1,23	31,40	4,06	0,33
2003	236,61	12,27	0,97	30,17	18,04	1,39
2002	210,75	15,62	1,22	25,56	32,06	2,34
2001	182,27	-	-	19,35	-	-

Elaborou-se mais três cenários mantendo-se o valor presente do custo de manutenção. Os custos de operação foram recalculados com as taxas médias mensais de inflação calculadas a partir da Tabela 8.11. O custo de instalação foi calculado em função das taxas de financiamento utilizadas sendo 5% para a Tabela 8.12 (cenário 4), 2% para a Tabela 8.13 (cenário 5) e 1% para a Tabela 8.14 (cenário 6).

Tabela 8.12 – Valores presentes dos custos dos sistemas de aquecimento (cenário 4).

<b>Sistemas</b>	<b>Valor presente do custo de implantação</b>	<b>Valor presente do custo de manutenção complementar</b>	<b>Valor presente do custo de operação</b>	<b>Valor presente total</b>
5 coletores e gás	10766	171	877	11814
4 coletores e gás	9798	171	1581	11549
3 coletores e gás	8830	171	2465	11466
2 coletores e gás	7862	171	3280	11313
5 coletores e eletricidade	9534	0	1748	11282
4 coletores e eletricidade	8566	0	3148	11714
3 coletores e eletricidade	7598	0	4908	12507
2 coletores e eletricidade	6630	0	6532	13162
Gás	4606	171	6225	11001
Eletricidade	3574	0	12396	15970

Tabela 8.13 – Valores presentes dos custos dos sistemas de aquecimento (cenário 5).

<b>Sistemas</b>	<b>Valor presente do custo de implantação</b>	<b>Valor presente do custo de manutenção complementar</b>	<b>Valor presente do custo de operação</b>	<b>Valor presente total</b>
5 coletores e gás	7061	171	877	8109
4 coletores e gás	6433	171	1581	8184
3 coletores e gás	5805	171	2465	8441
2 coletores e gás	5177	171	3280	8628
5 coletores e eletricidade	6262	0	1748	8010
4 coletores e eletricidade	5634	0	3148	8782
3 coletores e eletricidade	5004	0	4908	9912
2 coletores e eletricidade	4376	0	6532	10908
Gás	3063	171	6225	9458
Eletricidade	2463	0	12396	14859

A Tabela 8.12 apresenta o sistema que utiliza apenas gás como sendo o mais vantajoso economicamente seguido do sistema com cinco coletores e eletricidade e do sistema com dois coletores solares e gás. Já a Tabela 8.13 apresenta o sistema com cinco coletores e eletricidade e o sistema com cinco coletores e gás como sendo as melhores opções.

A Tabela 8.14 apresenta os resultados dos valores presentes utilizando a mesma taxa de juros de financiamento e de investimento e os valores das taxas médias mensais dos combustíveis. Nesta situação os sistemas de menor custo são os que utilizam cinco coletores com energia elétrica e gás, apresentando o mesmo valor presente total.

Tabela 8.14 – Valores presentes dos custos dos sistemas de aquecimento (cenário 6).

<b>Sistemas</b>	<b>Valor presente do custo de implantação</b>	<b>Valor presente do custo de manutenção complementar</b>	<b>Valor presente do custo de operação</b>	<b>Valor presente total</b>
5 coletores e gás	6000	171	877	7048
4 coletores e gás	5450	171	1581	7201
3 coletores e gás	4950	171	2465	7586
2 coletores e gás	4350	171	3280	7801
5 coletores e eletricidade	5300	0	1748	7048
4 coletores e eletricidade	4750	0	3148	7898
3 coletores e eletricidade	4200	0	4908	9108
2 coletores e eletricidade	3650	0	6532	10182
Gás	2745	171	6225	9140
Eletricidade	1800	0	12396	14196

Os valores presentes apresentados nas Tabelas 8.8 a 8.14 utilizam o valor fixo de R\$ 550,00 para o m<sup>2</sup> dos coletores solares. As Figuras 8.6 a 8.8 apresentam os resultados dos valores presentes totais dos sistemas variando em função do valor do m<sup>2</sup> do coletor solar de R\$ 200,00 até R\$ 700,00. A curva de eficiência instantânea dos coletores solares foi mantida constante.

A Figura 8.6 utiliza os dados do cenário 1 e indica que até o valor de R\$ 400,00 por m<sup>2</sup> de coletor solar o sistema com 5 coletores e eletricidade torna-se mais vantajoso que o sistema apenas a gás. Reduzindo o valor do coletor solar para R\$ 350,00 os sistemas com 5, 4, 3 e 2 coletores solares e gás assim como o sistema com 4 coletores e eletricidade tornam-se alternativas mais atraentes que o sistema que utiliza somente gás.

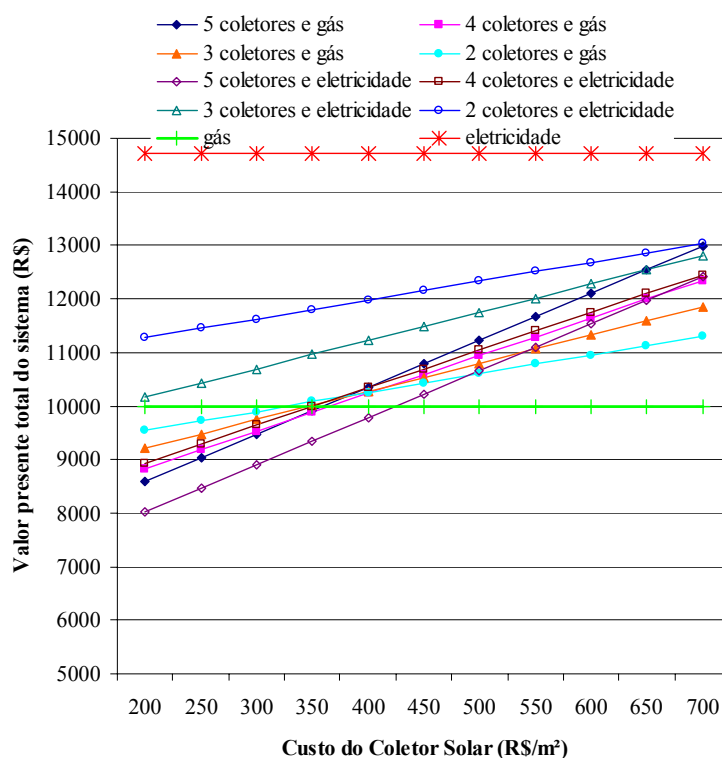


Figura 8.6 – Relação entre o valor presente total dos sistemas e o custo do coletor solar utilizando taxa de financiamento de 5%.

A Figura 8.7 apresenta os resultados dos valores presentes totais dos sistemas utilizando os dados do cenário 2. Esta indica que os sistemas que utilizam coletor solar e gás são mais vantajosos que os sistemas que utilizam apenas gás para qualquer valor de coletor solar. Para os sistemas que utilizam coletor solar e eletricidade a vantagem ocorre apenas para os sistemas com 4 e 5 coletores solares para qualquer valor de coletor. O sistema que utiliza 2 coletores e gás apresenta o custo baixando em relação as demais configurações a partir do valor de R\$ 400,00 o m<sup>2</sup> do coletor solar.

A Figura 8.8 apresenta os resultados dos valores presentes totais dos sistemas utilizando os dados do cenário 3 indicando a mesma tendência dos resultados apresentados na Figura 8.7. Verifica-se que todos os valores presentes totais dos sistemas que utilizam coletores solares e gás mantém-se muito próximos para o mesmo valor de coletor solar. O mesmo já não ocorre com os sistemas que utilizam coletores solares e eletricidade. Este fato indica que um erro no dimensionamento de um sistema de aquecimento de água com energia solar e apoio a gás não acarreta grandes ônus, porém com sistemas que utilizam apoio elétrico o prejuízo pode ser bem maior.



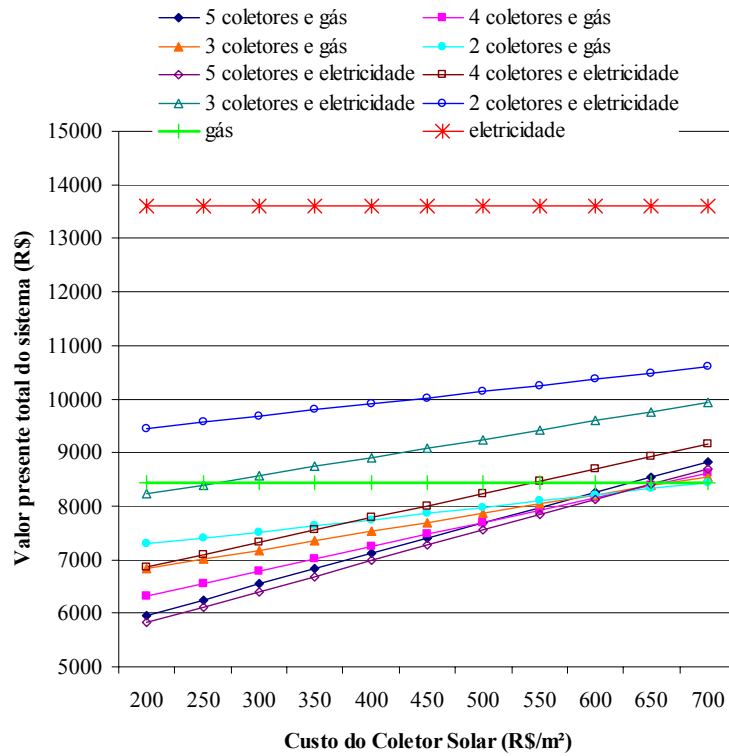


Figura 8.7 – Relação entre o valor presente total dos sistemas e o custo do coletor solar utilizando taxa de financiamento de 2%.

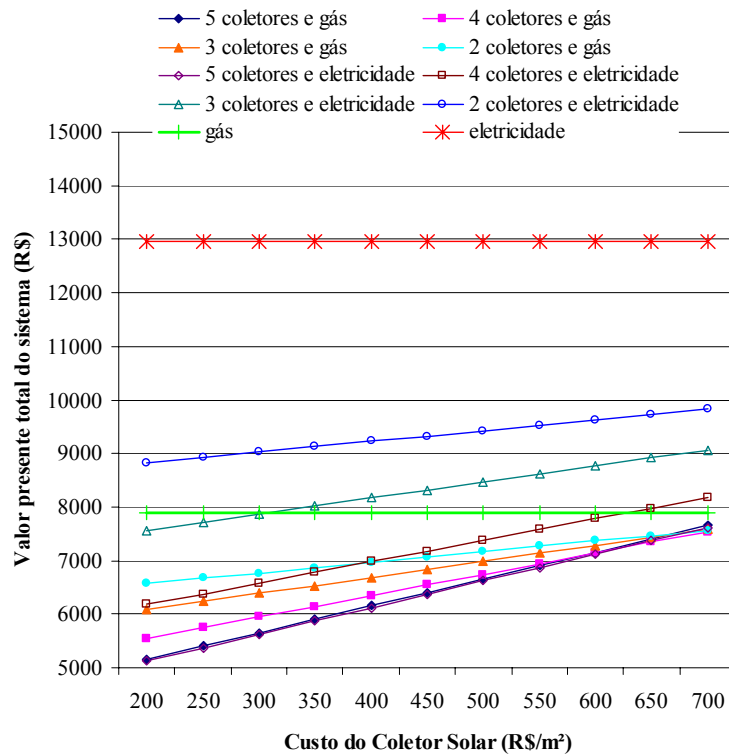


Figura 8.8 – Relação entre o valor presente total dos sistemas e o custo do coletor solar utilizando taxa de financiamento de 1% (cenário 3).

As Figuras 8.9 a 8.11 apresentam os resultados dos valores presentes totais dos sistemas de aquecimento de água em função dos valores dos coletores solares para os cenários 4, 5 e 6, onde a taxa de inflação é maior que a projetada pelo governo e a inflação do gás é maior que da eletricidade.

A Figura 8.9 indica o sistema que utiliza apenas gás como sendo o mais vantajoso a partir de R\$ 500,00 o m<sup>2</sup> do coletor solar. Abaixo deste valor os sistemas com cinco coletores e eletricidade assim como o sistema com cinco coletores e gás demonstram ser a melhor opção. Acima de R\$ 500,00 os sistemas com dois e três coletores e gás tornam-se mais interessantes que os demais sistemas, perdendo apenas para o sistema que utiliza apenas gás.

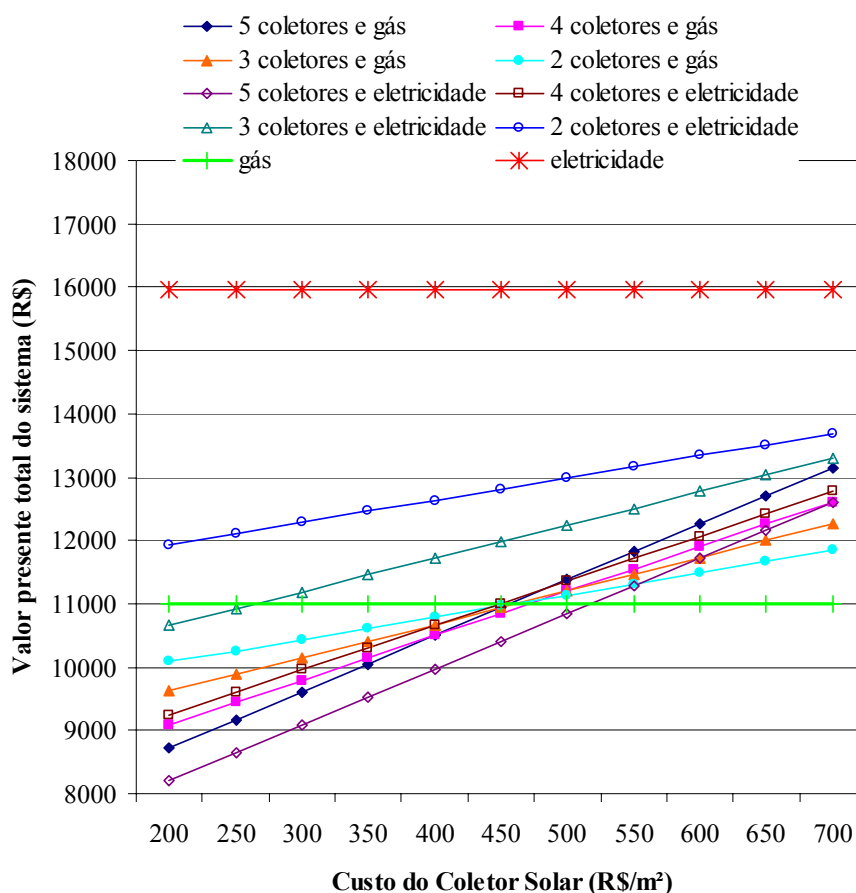


Figura 8.9 – Relação entre o valor presente total dos sistemas e o custo do coletor solar utilizando taxa de financiamento de 5% (cenário 4).

Na Figura 8.10 os sistemas com cinco coletores solares que utilizam tanto eletricidade como gás são os sistemas mais interessantes para qualquer valor de coletor solar. Para o valor de R\$ 700,00 o m<sup>2</sup> de coletor solar os sistemas com 2, 3, 4 e 5 coletores solares e gás assim como o sistema com 5 coletores solares e eletricidade assumem o mesmo valor presente total. Neste caso pode-se optar em qualquer um destes sistemas.

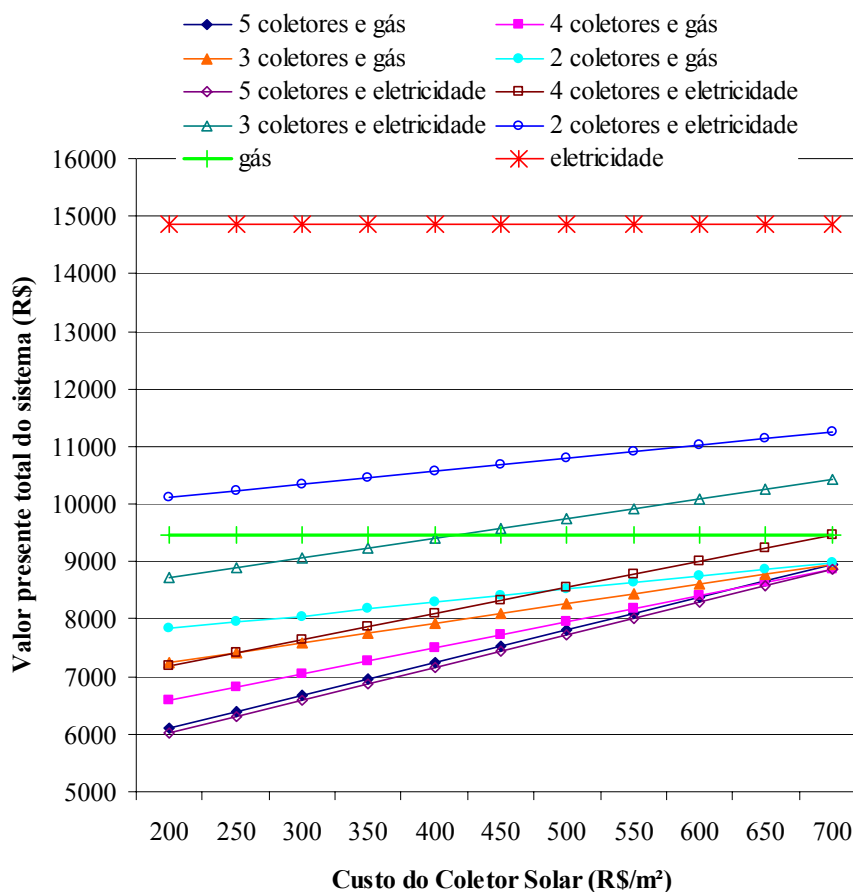


Figura 8.10 – Relação entre o valor presente total dos sistemas e o custo do coletor solar utilizando taxa de financiamento de 2% (cenário 5).

Na Figura 8.11 os sistemas com cinco coletores e gás e os sistemas com cinco coletores e eletricidade são a melhor opção para qualquer valor de coletor solar, além de apresentarem exatamente os mesmos valores presentes entre si. A partir de R\$ 550,00 o m<sup>2</sup> do coletor solar os sistemas com 2, 3 e 4 coletores solares e gás convergem para o mesmo valor dos sistemas mais vantajosos.

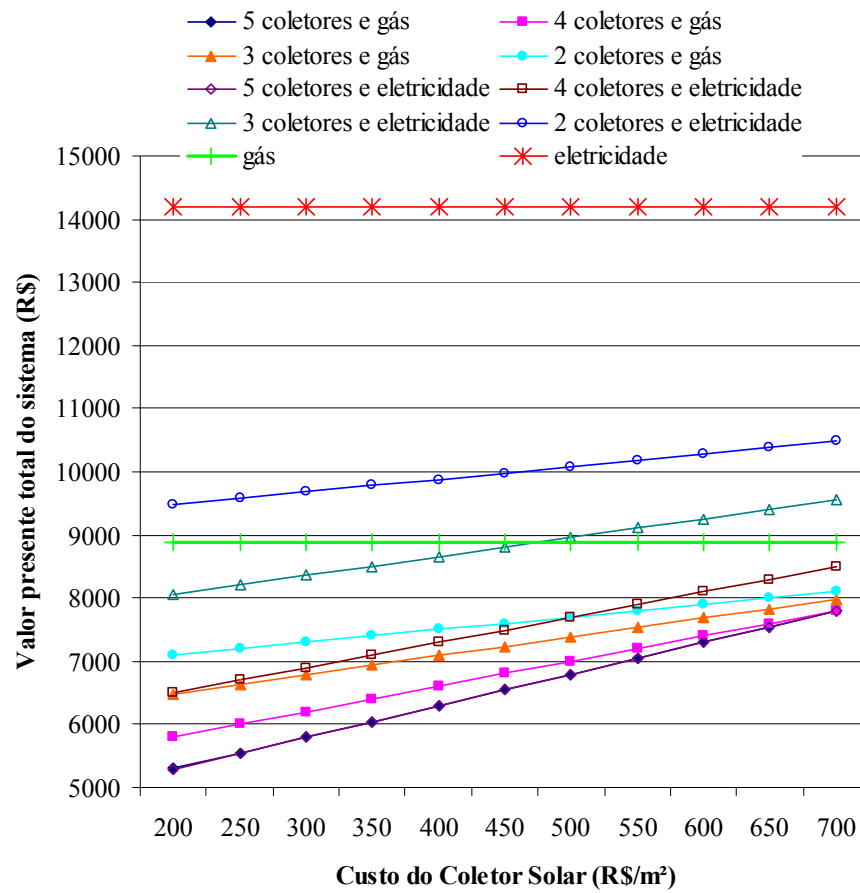


Figura 8.11 – Relação entre o Valor presente total dos sistemas e o custo do coletor solar utilizando taxa de financiamento de 1% (cenário 6).

## CAPÍTULO 9

### CONCLUSÃO

Os sistemas de aquecimento solar em estudo nesta tese tiveram seus componentes caracterizados com êxito, transferindo confiabilidade aos resultados obtidos. O sistema de aquisição de dados foi conveniente e seguro. Resultados experimentais foram obtidos a partir da aquisição e tratamento de dados dos sistemas montados no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, nas três configurações propostas. Estes resultados permitiram um entendimento maior sobre os fenômenos associados ao funcionamento de tais sistemas, permitindo estabelecer critérios para um dimensionamento que atenda o perfil de demanda desejado.

Os resultados experimentais que apresentaram a influência do horário de consumo na eficiência dos sistemas de aquecimento referem-se apenas às condições dos ensaios realizados no escopo da Tese e apresentaram um valor máximo de eficiência na configuração paralela com horário de consumo às 9 horas. Ficou claro que a eficiência dos sistemas em estudo não é tão dependente da eficiência dos coletores solares como o é da interação entre horário de consumo, acionamento de gás e intensidade da radiação solar, além das perdas térmicas dos sistemas. A temperatura de consumo mostrou-se mais estável ao longo do tempo na configuração paralela, onde a estratificação não é tão favorecida.

A parcela de energia proveniente do gás mostrou-se sempre maior que a parcela solar (inclusive como consequência do mau desempenho do reservatório térmico), para os reservatórios verticais antes da alteração do isolamento, indicando que foi dimensionado de forma a atender 50% da fração solar nos sistemas para os perfis de demanda ensaiados.

Embora a metodologia empregada na análise experimental visasse manter a maioria das condições constantes, a variação climática entre cada seqüência de dias (para diferentes horários) alterava a fração de energia solar que os sistemas recebiam, assim como as perdas térmicas. Mesmo estando ambas configurações submetidas simultaneamente às mesmas condições climáticas, essas variações refletiam-se diferentemente no comportamento de cada sistema.

Os modelos experimentais, paralelo, série e horizontal, geraram dados confiáveis sobre o comportamento dos perfis de temperatura no interior dos reservatórios. Análises destes

dados assim como a caracterização dos componentes do sistema permitiram determinar os parâmetros inerentes aos sistemas experimentais.

O programa de simulação AQUESOLGÁS teve cada um de seus módulos validados através da comparação dos resultados experimentais com os simulados. Estas comparações permitiram a correção de pequenos erros do programa de simulação. Os valores dos parâmetros, das condições iniciais e dos dados meteorológicos utilizados pelos modelos experimentais foram inseridos no programa e o mesmo foi executado gerando resultados simulados. As simulações realizadas verificaram o comportamento do reservatório isolado termicamente, dos aquecedores a gás e dos coletores solares. Todas as simulações apresentaram resultados muito próximos dos resultados dos modelos experimentais correspondentes. O programa de simulação apresenta uma interface amigável facilitando o processo de inserção de valores de variáveis.

Uma análise da influência da altura de conexão da fonte de energia auxiliar assim como da altura de conexão dos coletores solares sobre a eficiência dos sistemas de aquecimento foi realizada utilizando o programa de simulação já validado experimentalmente. Vinte configurações foram ensaiadas com 2, 3, 4 e 5 coletores, todas atendendo um mesmo perfil de demanda. As configurações que apresentaram menores consumos de energia auxiliar caracterizaram-se por apresentar o termostato em uma posição próxima à entrada e à saída de água do aquecedor a gás, ou logo acima do retorno da água do aquecedor a gás. Desta forma o aquecedor a gás exerce uma influência direta sobre o termostato. A localização do termostato esteve sempre abaixo da posição da tomada de água para consumo, garantindo o fornecimento de água na temperatura ajustada para o consumo.

Foi realizada uma análise econômica considerando um perfil de consumo de 200 litros diários, dados climáticos de Porto Alegre para a configuração mais eficiente utilizando 2, 3, 4 e 5 coletores solares com fonte de energia auxiliar a gás e eletricidade. Também foram realizadas análises econômicas com sistemas de aquecimento por acumulação que utilizam apenas gás e apenas energia elétrica. A análise econômica foi realizada para um período de 30 anos segundo seis cenários econômicos. Os primeiros três cenários consideraram uma taxa de inflação mensal de 0,48% (projeção para 2005), taxa de juros de investimento de 1% ao mês e taxa de juros de empréstimo de 5%, 2% e 1% ao mês. Os três últimos cenários utilizaram valores da taxa de inflação dos energéticos (gás e eletricidade), calculando a média mensal para os últimos três anos (2002, 2003 e 2004). Os valores dos componentes utilizados na montagem experimental serviram de base para a análise econômica. A análise econômica consistiu em considerar todos os custos dos sistemas de aquecimento no período da análise e aplicar o método do valor presente, trazendo todos os gastos futuros para uma única data. O sistema que

apresentou a maior rentabilidade econômica foi o que apresentou o menor valor presente. O melhor sistema sob o ponto de vista econômico oscilou entre o sistema que utilizou somente aquecedor a gás, sistema com dois coletores solares e gás, sistema com quatro coletores e gás, sistemas com cinco coletores e gás e sistemas com cinco coletores e eletricidade. Esta oscilação em torno destes sistemas foi função dos cenários econômicos elaborados.

O alto custo de instalação de sistemas de aquecimento de água com energia solar associado ao custo do sistema de aquecimento de água com gás, ainda assim os tornaram atrativos economicamente em diversos cenários. Uma redução no custo do circuito de controle do gás tornariam estes sistemas ainda mais competitivo que o sistema com cinco coletores solares e energia elétrica. Outra consideração importante é que nos cenários 4, 5 e 6 utilizaram-se taxas de inflação mais elevadas para o gás GLP do que para a eletricidade, com base no que ocorreu nos últimos três anos. O custo do GLP utilizado foi o do botijão de 45 kg o qual é maior que o GLP do botijão de 13 kg e do gás natural.

O programa de simulação AQUESOLGÁS demonstrou ser uma poderosa ferramenta para dimensionamento de sistemas de aquecimento de água com energia solar e fonte auxiliar de energia. Sugere-se que seja implementado um módulo de análise econômica para enriquecer os critérios de dimensionamento, pois como foi comprovado, o sistema mais eficiente não é necessariamente o sistema economicamente mais atrativo. Para obter conclusões mais gerais sobre a viabilidade econômica deste sistema o programa deve ser rodado para diversos climas, perfis de consumo e variando outros parâmetros de projeto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAVA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO, 1996. “**O Aquecedor Solar de Água para o Setor Elétrico e para o Usuário Final**”, São Paulo.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 1998. “**O Estado das Energias Renováveis no Brasil: Fórum Permanente de Energias Renováveis**”, CD-ROM.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA 2003.  
<http://www.aneel.gov.br>

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. 2005 <http://www.anp.gov.br>

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, 1996. “**Systems and Equipment Handbook**”, New York.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, 1999. “**Application Handbook**”, New York.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988. “**Coletores Solares Planos para Líquidos - Determinação do Rendimento Térmico (NBR10184)**”, Rio de Janeiro, Brazil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998. “**Aquecedor de Água a Gás Tipo Instantâneo – Requisitos e Métodos de Ensaio (NBR8130)**”, Rio de Janeiro, Brazil.

BEN – BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2002. Ministério de Minas e Energia, Brasília. <http://www.mme.gov.br>



CEEE - COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2005.  
<http://www.ceee.com.br>

CEMIG, 1987. “**Seminário sobre Aquecimento Solar como Alternativa de Conservação de Energia**”, Belo Horizonte, Brasil.

COMETTA, E., 1978. “**Energia Solar – Utilização e Empregos Práticos**”, Hemus Livraria Editora Limitada, São Paulo, SP

COMPET, 2004. <http://www.conpet.gov.br/>

COSTA, E., R., 2002. “**Limitações no Uso de Coletores Solares sem Cobertura para Sistemas Domésticos de Aquecimento de Água**”, Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, RS.

DUFFIE, J. A. and BECKMAN, W. A., 1991, “**Solar Engineering of Thermal Processes**”, Wiley, New York, U.S.A.

FISH, M.M., GUIGAS, M., DALENBACK, J.O., 1998. “**A review of large-scale solar heating systems in Europe**”, Solar energy, Vol.63, pp 355-366.

GOLDEMBERG, J., 1998. “**Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**”. Editora da Universidade de São Paulo, Brasil.

GUTIERREZ, G., HINCAPIE, F., DUFFIE, A., BECKMAN, W.A., 1974. “**Simulation of forced circulation water heaters; effects of auxiliary energy supply, load type and storage capacity**”, Solar Energy Vol. 15, pp 287-298.

HERNANDEZ, F., 2004. “**Análise experimental e simulação de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos**”, Tese de Doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, RS.

HOLMAN, J. P. 1971 “**Experimental Methods for Engineers**”, New York: McGraw-Hill, U.S.A.

HUDSON, L.G., MARKELL, J., 1985. **“Solar Technology”**, Reston Publishing Company, Reston.

HUSSEIN, H.M.S., 2002. **“Transient Investigation of a two phase closed thermosyphon flat plate solar water heater”**, Energy Conversion and Management 43, 2479-2492.

INCROPERA, F. P. and DEWITT, D., 1998. **“Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, RJ

KRENZINGER, A., LAFAY, J.M., 2002. **“Análise Experimental de um Sistema de Aquecimento de Água com Energia Solar e Gás”**, IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, Caxambu, MG, Brasil.

KRENZINGER, A., SIQUEIRA, A.M.O., OLIVESKI, R.C., 2003. **“Aquesolgas”**, 17 th International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo, Brasil.

LAFAY, J.M., KRENZINGER, A., PRIEB, C., 2003. **“Experimental Results For Hybrid Solar & Gás Water Heating Systems”**, 17 th International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo, Brasil.

LAFAY, J.M., KRENZINGER, A., PRIEB, C., 2004. **“Influência do horário de consumo de água quente no rendimento de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás”**, III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belém, Brasil.

LAGES, P.I.A.G, 2001. **“Contribuição da Energia Solar Térmica para a Redução das Emissões Nacionais de Gases de Efeito Estufa”**, Energia Solar – Revista de Energias Renováveis & Ambiente, nº49 – Sociedade Portuguesa de Energia Solar.

LOURENÇO, I. J., 2000. **“Estudo de um Sistema de Aquecimento de Água Híbrido Gás-Solar”**, Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, RS.

MARROQUIN, A.I., 1989. **“Relação Custo Benefício para Coletores Solares Planos”**, Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, RS.

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.

MVEH, J.D.M., 1999. **“Análise Teórica e Experimental da Eficiência Térmica de Coletores Solares sem Cobertura e de Baixo Custo”**, Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, RS.

MOUCHOT, A., (1825-1912), **“Chaleur solaire et ses aplicatios”**, <http://www.unige.ch>

OLIVESKI, R. C., 2000. **“Análise Numérica e Experimental dos Campos de Temperatura e Velocidade em Armazenadores Térmico”**, Doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, RS

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., v. 46, pp2015-2026, 2003.

PALZ, W., 1981. **“Energia Solar e Fontes Alternativas”**, Hemus, São Paulo.

PRADO, R.T.A., GONÇALVES,O.M., 1998. **“Water heating through electric shower and energy demand”**, Energy and Buildings 29, pp 77-82.

PREOBRAZHENSKI, V. P., 1980. **“Mediciones Termotécnicas y Aparatos para Efectuarlas”** , Editora Mir, Moscou

PROCEL- PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2003. <http://www.eletrobras.gov.br/procel/site/home/index.asp>

SHAH, L.J., FURBO, S., 2003. **“Entrance effects in Solar Storage Tanks”**, Solar Energy Vol 75, pp 337-348.

SHARIAH, A.M., LÖF, G.O.G., 1997. **“Effects of auxiliary heater on annual performance of thermosyphon solar water heater simulated under variable operating conditions”**, Solar Energy Vol. 60, N°2, pp119-126.

SHARPLES, S., CHARLESWORTH, P.S., 1998. **“Full-Scale Measurements of Wind-Induced Convective Heat Transfer From a Roof-Mounted Flat Plate Solar Collector”**, Solar Energy, Vol 62, N°2, pp.69-77.

SCHRÖDER, M., REDDEMANN, B., 1982. **“Three Different Criteria To Evaluate The Economics Of Solar Water Heating Systems”**, Solar Energy, Vol. 29, No 6, pp. 549-555.

SIQUEIRA, A.M.O, KRENZINGER, A., 2003. **“Cálculo da Eficiência Diária em Média Mensal de um Sistema de Aquecimento Solar Operando em Regime de Termossifão”**. CRESESB/CEPEL. Coletânea de Artigos, Vol.1, pp 135-143, Rio de Janeiro, Brasil.

STANFORD, A.S., 1999. **“O Uso dos Recursos Energéticos, água e Energia Solar: Implicações Econômicas e Decisão Através de Modelos Dinâmicos”**, Tese de Doutorado, PIMES, UFPE, Recife, Brasil.

TOLMANSQUIM, M. T., 2003. **“Fontes renováveis de energia no Brasil”**. Editora interciência Ltda, Rio de Janeiro.

WALEY, P., CAMPELLO, F.S., 1990. **“Uncertainty and Indeterminacy in Assessing the Economic Viability of Energy Options: A Case Study of Solar Heating Systems in Brazil”**, Energy Systems and Policy, Taylor & Francis, Vol 14, pp 281-304.

ZANESCO, I., 1991. **“Análise e Construção de um Piranômetro Fotovoltaico”**, Dissertação, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, RS.

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

## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

ABREU, S. L., 2003. “**Desenvolvimento de um sistema de aquecimento solar compacto utilizando termossifões bifásicos**”. Doutorado, UFSC, Florianópolis.

BROWN, L. R., 2003. “**Eco-Economia**”.UMA – Universidade livre da mata atlântica, Salvador.

CHEHEBE, J. R. B., 1998. “**Análise do ciclo de vida de produtos**”. Qualitymark , Rio de Janeiro.

## PUBLICAÇÕES GERADAS POR ESTA TESE

KRENZINGER, A., LAFAY, J.M., 2002. “**Análise Experimental de um Sistema de Aquecimento de Água com Energia Solar e Gás**”, IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, Caxambu, MG, Brasil.

LAFAY, J.M., KRENZINGER, A., PRIEB, C., 2003. “**Experimental Results For Hybrid Solar & Gás Water Heating Systems**”, 17 th International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo, Brasil.

LAFAY, J.M., KRENZINGER, A., PRIEB, C., 2004. “**Influência do horário de consumo de água quente no rendimento de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás**”, III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belém, Brasil.

LAFAY, J.M., KRENZINGER, A., 2004. “**Sistema de aquecimento de água com energia solar e gás**”, XII Congresso Ibero Y VII Congresso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo – Espanha.

LAFAY, J.M., KRENZINGER, A., 2004. “**Validação experimental de um programa de simulação de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás**”. X Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.