

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

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA POR
ENERGIA SOLAR E GÁS**

por

Fernando Aita

**Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia**

Porto Alegre, Fevereiro de 2006.

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA POR
ENERGIA SOLAR E GÁS**

por

**Fernando Aita
Engenheiro Mecânico**

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

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Aprovada por:

Prof. Dr. Mário Henrique Macagnan (UNISINOS)

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer (PROMEC)

Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello (PROMEC)

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

Porto Alegre, Fevereiro de 2006

Dedico este trabalho aos meus pais Mário e Maria Eugênia por sempre acreditarem em mim. À minha amiga e companheira, Candida, pela compreensão, auxílio e incentivo para alcançar este objetivo.

AGRADECIMENTOS.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Arno Krenzinger, pela colaboração, amizade e incentivo para alcançar este objetivo.

À Companhia Estadual de Energia Elétrica, através da Diretoria da Área de Distribuição, por ter disponibilizado o tempo necessário aos estudos e aos colegas CEEE que me incentivaram.

Ao Eng^o. Carlos Marcelo Cecin, pela amizade e por acreditar que é através do conhecimento que as empresas chegam aos níveis de excelência.

Ao amigo Eng^o Luiz Rosa Viera, MSc, pelo exemplo que a idade não é obstáculo para alcançar os objetivos.

Ao Eng^o Marcos Telló, Prof. Dr, pelo encorajamento para enfrentar este desafio e pela amizade.

Ao Eng^o. Paulo Kutter, em especial, pela atenção, colaboração e amizade e também aos demais funcionários e professores do PROMEC/ UFRGS.

Ao amigo e colega Eng^o Luiz Roberto S. Guedes, MSc, pelo auxílio prestado.

A todos os colegas do PROMEC, pela convivência e companheirismo.

A minha irmã Patrícia, pelo constante incentivo para alcançar o objetivo.

A todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A energia solar esta sendo cada vez mais utilizada para o aquecimento de água, tanto para o uso industrial, comercial e residencial, apresentando, esta última, um crescimento muito expressivo nos últimos anos, devido às ações de marketing de algumas empresas do setor.

Para manter a temperatura da água do reservatório nas condições estabelecidas para o uso é necessário à utilização de uma fonte de energia auxiliar. As duas fontes de energia auxiliar mais empregadas nos sistemas de aquecimento de água por energia solar são a eletricidade e o gás. A escolha do gás como fonte auxiliar de energia, apesar de apresentar um investimento inicial superior ao da energia elétrica, representa um menor custo operacional em longo prazo.

Na presente dissertação foram realizadas simulações computacionais para a cidade de Porto Alegre - RS, através do aplicativo TERMOSIM, com a finalidade de analisar o comportamento energético de um sistema de aquecimento de água por energia solar, por circulação natural (termossifão), utilizando como fonte de energia auxiliar o gás. Esta análise foi desenvolvida com a variação de parâmetros construtivos, de parâmetros de utilização e dos parâmetros de qualidade dos materiais e, ainda, com a caracterização dos componentes da instalação.

Para a execução do trabalho foram realizadas 3456 simulações. Considerando os resultados obtidos foram elaboradas tabelas e gráficos, por meio dos quais verificou-se a influência do número de coletores, do volume do reservatório, da altura do termostato, da razão de aspecto do reservatório, do consumo de água quente e da qualidade dos coletores sobre a eficiência do sistema.

O aplicativo demonstrou coerência nos resultados gerados, motivo pelo qual foi possível identificar, por meio da análise dos mesmos, quais os parâmetros que exercem maior influência no desempenho do sistema de aquecimento de água. Combinando os resultados, foi desenvolvida uma equação para estimar a eficiência média mensal do sistema.

ABSTRACT

STUDY OF THE PERFORMANCE OF A SOLAR AND GAS WATER HEATING SYSTEM

Solar energy is being used more intensively for water heating, as much for the industrial and commercial as residential uses. The last one shows a significant growth in the last years, due to marketing actions promoted by some enterprises.

To conserve the water temperature inside the reservoir in the established temperature conditions for the use is necessary to utilize an auxiliary energy source. The two main sources of energy that are employed in the Solar Domestic Hot Water (SDHW) are electric energy and gas. The use of gas as an auxiliary energy source, although implies more initial investment in the system in comparison with electrical energy, represents a smaller operational cost in the long term.

In this work, it were realized computer simulations for the location of Porto Alegre – RS using the TERMOSIM program to analyze the thermal behavior of a water heating system that use solar energy and gas as auxiliary energy source, by natural convection. This analysis was developed through the variation of constructive parameters, utilization parameters and collector material parameter and moreover with the characterization of the installation components.

For the execution of this task it was necessary to simulate over than 3,456 cases. The result of these simulations were transcribed in tables and graphics, where was possible to verify the influence of the collector number, reservoir volume, thermostat height, reservoir aspect ratio, hot water use and collector design.

The software shows coherence in the results. This fact allows identify which parameters are most important in the SDHW performance. The assembly of the results allows developing an equation for the evaluation the monthly averaged system efficiency.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Objetivo.....	3
1.2.	Escopo da Dissertação.....	3
2.	SISTEMA SOLAR DE AQUECIMENTO DE ÁGUA.....	4
2.1.	Coletores Solares.....	4
2.2.	Reservatório Térmico.....	7
2.3.	Estratificação Térmica nos Reservatórios.....	8
2.3.1.	Coeficiente de Perdas nos Reservatórios.....	10
2.4.	Fonte Auxiliar de Energia.....	10
2.5.	Tubulações Isoladas Termicamente.....	11
2.6.	Configurações dos Sistemas de Aquecimento de Água com Energia Solar.....	11
2.6.1.	Sistema Ativo.....	11
2.6.2.	Sistema Passivo ou Termossifão.....	12
2.7.	Definições utilizadas na Dissertação.....	13
3.	PROGRAMA TERMOSIM.....	15
3.1.	Origem.....	16
3.2.	Estrutura do Programa.....	17
3.2.1.	Dados Climáticos.....	19
3.2.2.	Tubulações Hidráulicas.....	23
3.2.3.	Coletores Solares.....	24
3.2.4.	Reservatório Térmico.....	26
3.2.5.	Geometria do Sistema.....	28
3.2.6.	Configuração de Demanda.....	29
3.2.7.	Dados Gerais do Sistema.....	29
3.2.8.	Aquecedor de Passagem.....	31
3.2.9.	Relatórios e Gráficos.....	32
4.	A INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS CONSTRUTIVOS NO DESEMPENHO DE UM SISTEMA.....	36

4.1. Metodologia Utilizada para Realizar as Simulações.....	36
4.2. Sistema de Aquecimento para Inverno e Verão	36
4.3. Resultado das Simulações para o Inverno e Verão	42
4.4. Influência do Número de Coletores.....	45
4.4.1. Resultados	46
4.4.2. Análise dos Resultados.....	49
4.5. Influência do Volume do Reservatório	53
4.5.1. Resultados	53
4.5.2. Análise dos Resultados.....	57
4.6. Influência da Altura do Termostato.....	59
4.6.1. Resultados	60
4.6.2. Análise dos Resultados.....	66
4.7. Influência da Razão de Aspecto (Comprimento/ Diâmetro)	67
4.7.1. Resultados	67
5. O EFEITO DO CONSUMO DE ÁGUA QUENTE E DA QUALIDADE DOS COLETORES	71
5.1. Consumo de Água Quente.....	71
5.1.1. Resultados	73
5.1.2. Análise dos Resultados.....	78
5.2. Influência da Qualidade do Coletor.....	82
5.2.1. Resultados	82
5.2.2. Análise da Eficiência dos Coletores na Condição de Referência.....	87
5.2.3. Análise dos Resultados.....	88
5.3. Correlação para a Eficiência Térmica	89
5.3.1. Aplicação da Correlação Desenvolvida na Obtenção da Eficiência Térmica do Sistema de Aquecimento de Água por Energia Solar.	94
6. CONCLUSÕES.....	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98
APÊNDICE I – INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE COLETORES	100
APÊNDICE II – INFLUÊNCIA DO VOLUME DO RESERVATÓRIO	105

APÊNDICE III – INFLUÊNCIA DA ALTURA DO TERMOSTATO	106
APÊNDICE IV – INFLUÊNCIA DO CONSUMO DE ÁGUA QUENTE.....	108
APÊNDICE V – INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DO COLETOR.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Coletor solar plano. Fonte www.soletrol.com.br	4
Figura 2.2 – Gráfico da eficiência do coletor solar.....	6
Figura 2.3 – Fluxo de energia em um reservatório de água quente	7
Figura 2.4 – Reservatório térmico vertical. Fonte: www.soletrol.com.br	8
Figura 2.5 – Método de estratificação térmica.....	9
Figura 2.6 – Sistema solar de aquecimento com circulação forçada (sistema ativo).....	12
Figura 2.7 – Sistema solar de aquecimento com circulação natural por termossifão (sistema passivo).....	13
Figura 2.8 – Desenho esquemático de uma instalação de aquecimento por energia solar, com energia auxiliar através de um aquecedor auxiliar a gás de passagem ou resistência elétrica, com circulação natural. Fonte: www.iem.com.br	14
Figura 3.1 – Tela do menu principal do TERMOSIM	18
Figura 3.2 – Tela do menu de simulação do TERMOSIM	19
Figura 3.3 – Fluxograma simplificado do processo de determinação do desempenho térmico do sistema. Fonte Siqueira, 2003.....	20
Figura 3.4 – Formulário de geração dos dados meteorológicos do programa SEQMETBR.....	21
Figura 3.5 – Entrada manual dos dados climáticos do programa SEQMETBR	22
Figura 3.6 – Formulário de geração de arquivo estocástico dos dados meteorológicos do programa SEQMETBR	22
Figura 3.7 – Formulário das tubulações hidráulicas	23
Figura 3.8 – Formulário de entrada dos dados para o coletor solar	25
Figura 3.9 – Formulário dados gerais do reservatório térmico	26
Figura 3.10 – Formulário de dados geométricos do sistema.....	28
Figura 3.11 – Formulário de perfil de demanda.....	30
Figura 3.12 – Formulário de dados gerais do sistema.....	30
Figura 3.13 – Formulário das características do aquecedor.....	32
Figura 3.14 – Relatório das simulações	33
Figura 3.15 – Gráfico mensal das simulações.....	34

Figura 3.16 – Gráfico anual das simulações	34
Figura 3.17 – Resumo anual das simulações.....	35
Figura 3.18 – Resultados horários das simulações, nesse exemplo mostrando dados de radiação solar e temperatura de saída do coletor	35
Figura 4.1 – Gráfico da radiação solar horária para a cidade de Porto Alegre–RS, incidente sobre um plano inclinado de 45° em relação à horizontal voltado para a direção Norte.....	38
Figura 4.2 – Gráfico da radiação solar diária para a cidade de Porto Alegre-RS, incidente sobre um plano inclinado de 45° em relação à horizontal voltado para a direção Norte.....	39
Figura 4.3 – Gráfico da radiação solar média mensal para a cidade de Porto Alegre-RS, incidente sobre um plano inclinado de 45° em relação à horizontal voltado para a direção Norte	39
Figura 4.4 – Gráfico da temperatura ambiente horária para a cidade de Porto Alegre–RS.....	40
Figura 4.5 – Gráfico da temperatura ambiente média diária para a cidade de Porto Alegre–RS.....	40
Figura 4.6 – Gráfico da temperatura ambiente média mensal para a cidade de Porto Alegre–RS.....	41
Figura 4.7 – Exemplo de dados de 3 dias de radiação solar incidente e temperatura ambiente para o inverno na cidade de Porto Alegre–RS, obtido do arquivo climático utilizado.....	41
Figura 4.8 – Exemplo de dados de 3 dias de radiação solar incidente e temperatura ambiente para o verão na cidade de Porto Alegre–RS, obtido do arquivo climático utilizado.....	42
Figura 4.9 – Dados geométricos do sistema.....	43
Figura 4.10 – Gráfico da energia térmica convertida a partir da radiação solar, energia térmica obtida do gás e perdas térmicas	44
Figura 4.11 – Gráfico da energia térmica convertida a partir da radiação solar, energia térmica obtida do gás e perdas térmicas	45
Figura 4.12 – Evolução da conversão de energia utilizando 1 coletor.....	47
Figura 4.13 – Evolução da conversão de energia utilizando 4 coletores	48
Figura 4.14 – Evolução da conversão de energia utilizando 8 coletores	48
Figura 4.15 – Evolução da conversão de energia utilizando 12 coletores	49
Figura 4.16 – Gráfico da eficiência do sistema.....	50

Figura 4.17 – Gráfico da energia versus o número de coletores	51
Figura 4.18 – Gráfico do percentual de energia versus o número de coletores	51
Figura 4.19 – Gráfico da fração solar média mensal do sistema de aquecimento	52
Figura 4.20 – Gráfico de energia em função do volume do reservatório com 2 coletores	54
Figura 4.21 – Gráfico de energia em função do volume do reservatório com 6 coletores	55
Figura 4.22 – Gráfico de energia em função do volume do reservatório com 10 coletores	55
Figura 4.23 – Gráfico da eficiência solar em função do volume do reservatório para diversos coletores.....	56
Figura 4.24 – Gráfico da energia térmica solar em função do volume do reservatório	57
Figura 4.25 – Gráfico da energia térmica gás em função do volume do reservatório	58
Figura 4.26 – Evolução da conversão de energia térmica solar e gás em função da altura do termostato para volume do reservatório igual a $0,2\text{ m}^3$ e vários coletores	61
Figura 4.27 – Evolução da conversão de energia térmica solar e gás em função da altura do termostato para volume do reservatório igual a $0,4\text{ m}^3$ e vários coletores	61
Figura 4.28 – Evolução da conversão de energia térmica solar e gás em função da altura do termostato para volume do reservatório igual a 1 m^3 e vários coletores	62
Figura 4.29 – Eficiência do sistema em função da altura do termostato para volume do reservatório igual a $0,2\text{ m}^3$ e vários coletores	63
Figura 4.30 – Eficiência do sistema em função da altura do termostato para volume do reservatório igual a $0,4\text{ m}^3$ e vários coletores	63
Figura 4.31 – Eficiência do sistema em função da altura do termostato para volume do reservatório igual a 1 m^3 e vários coletores	64
Figura 4.32 – Evolução da energia térmica solar em função da razão de aspecto para o volume do reservatório igual a $0,4\text{ m}^3$	69
Figura 4.33 – Evolução da energia térmica gás em função da razão de aspecto para o volume do reservatório igual a $0,4\text{ m}^3$	69
Figura 4.34 – Evolução da eficiência solar em função da razão de aspecto para o volume do reservatório igual a $0,4\text{ m}^3$	70
Figura 5.1 – Gráfico de energia em função do consumo percentual do volume do reservatório para 2 coletores solares.....	73
Figura 5.2 – Gráfico de energia em função do consumo percentual do volume do reservatório para 4 coletores solares.....	74

Figura 5.3 – Gráfico de energia em função do consumo percentual do volume do reservatório para 10 coletores solares.....	74
Figura 5.4 – Gráfico de energia em função do consumo percentual do volume do reservatório para 2 coletores solares.....	75
Figura 5.5 – Gráfico de energia em função do consumo percentual do volume do reservatório para 4 coletores solares.....	75
Figura 5.6 – Gráfico de energia em função do consumo do volume do reservatório para 10 coletores solares.....	76
Figura 5.7 – Gráfico de energia em função do consumo percentual do volume do tanque para 2 coletores solares.....	76
Figura 5.8 – Gráfico de energia em função do consumo percentual do volume do tanque para 4 coletores solares.....	77
Figura 5.9 – Gráfico de energia em função do consumo de 80% do volume do tanque para 10 coletores solares.....	77
Figura 5.10 – Eficiência do sistema em função do consumo percentual do volume do reservatório para diversos coletores.....	78
Figura 5.11– Evolução da energia em função da qualidade do coletor com 2 coletores.....	84
Figura 5.12– Evolução da energia em função da qualidade do coletor com 4 coletores.....	84
Figura 5.13– Evolução da energia em função da qualidade do coletor com 10 coletores.....	85
Figura 5.14 – Gráfico de eficiência do coletor na condição de referência.....	88
Figura 5.15 – Gráfico de eficiência do sistema em função da eficiência do coletor nas condições de referência.....	88
Figura 5.16 – Gráfico da eficiência térmica mensal: Correlação versus Simulação.....	93

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Dados da instalação	37
Tabela 4.2 – Parâmetros de simulação para inverno e verão	43
Tabela 4.3 – Valores obtidos com a simulação para o inverno e verão	44
Tabela 4.4 – Parâmetros de simulação	46
Tabela 4.5 – Resumo anual das simulações utilizando diferentes números de coletores solares	47
Tabela 4.6 – Parâmetros de simulação	53
Tabela 4.7 – Resumo anual das simulações para volume e número de coletores variável	59
Tabela 4.8 – Parâmetros de simulação	60
Tabela 4.9 – Simulações para volume do reservatório igual a 0,1 m ³	64
Tabela 4.10 – Simulações para volume do reservatório igual a 0,2 m ³	65
Tabela 4.11 – Simulações para volume do reservatório igual a 0,4 m ³	65
Tabela 4.12 – Simulações para volume do reservatório igual a 0,8 m ³	66
Tabela 4.13 – Simulações para volume do reservatório igual a 1 m ³	66
Tabela 4.14 – Parâmetros de simulação	68
Tabela 5.1 – Parâmetros de simulação	72
Tabela 5.2 – Resumo dos casos simulados para volume de reservatório igual a 0,1 m ³	79
Tabela 5.3 – Resumo dos casos simulados para volume de reservatório igual a 0,2 m ³	80
Tabela 5.4 – Resumo dos casos simulados para volume de reservatório igual a 0,4 m ³	80
Tabela 5.5 – Resumo dos casos simulados para volume de reservatório igual a 0,8 m ³	81
Tabela 5.6 – Resumo dos casos simulados para volume de reservatório igual a 1 m ³	81
Tabela 5.7 – Parâmetros de simulação	83
Tabela 5.8 – Comparativo do ganho de energia para várias qualidades de coletores	86
Tabela 5.9 – Parâmetros das simulações	90
Tabela 5.10 – Parâmetros do caso típico	90

Tabela 5.11 – Eficiência média mensal do sistema solar para o caso típico.....	91
Tabela 5.12 – Dados para cálculo da eficiência através da correlação	94
Tabela 5.13 – Comparação entre resultados da correlação e da simulação	95

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Área do coletor	[m ²]
C_p	Calor específico à pressão constante	[J/kg°C]
F_R	Fator de remoção de calor	[-]
G_T	Energia da radiação solar sobre a superfície do coletor	[J]
\dot{m}	Vazão mássica	[kg/s]
Q_u	Energia útil	[J]
T_a	Temperatura ambiente	[°C]
T_{cons}	Temperatura de consumo	[°C]
T_e	Temperatura de entrada da água no coletor	[°C]
T_s	Temperatura de saída da água do coletor	[°C]
U	Coeficiente de perdas térmicas do reservatório	[W/°C]
U_L	Coeficiente global de perdas térmicas do coletor solar	[W/m ² °C]
U_T	Coeficiente global de perdas térmicas	[W/°C]
V	Volume	[m ³]
V_0	Volume normalizado	[m ³]
E_{CS}	Energia solar captada pelo coletor solar e fornecida ao reservatório	[kJ]
E_A	Energia fornecida pelo aquecedor de passagem	[kJ]
E_{AF}	Energia da água fria que vai para o reservatório	[kJ]
Δ_{ER}	Variação da energia total no reservatório	[kJ]
E_{AQC}	Energia da água quente para consumo	[kJ]
E_{AQR}	Energia da água quente contida no reservatório	[kJ]
E_{PR}	Energia perdida pela água na circulação quando o coletor está a uma temperatura abaixo da temperatura do reservatório	[kJ]
E_{PA}	Energia perdida para o ambiente	[kJ]
ALTURA_S_Q	Representa a altura entre saída do coletor e entrada do tanque	[m]
DESNÍVEL	Representa a altura entre a saída do coletor e a base do tanque	[m]
ALTURA_S_F	Representa a altura da saída da água do tanque para o coletor	[m]
ALTURA_T	Representa a altura do termostato	[m]
ALTURA_G_F	Representa a altura de saída da água do tanque p/ o aquecedor	[m]
ALTURA_Consumo	Representa altura da saída da água quente do tanque p/ o consumo	[m]
ALTURA_G_Q	Representa altura da saída do retorno da água do aquecedor p/ o tanque	[m]
ALTURA_REDE	Representa a altura que a água da rede entra no reservatório	[m]
N	Número de nós do reservatório	-
S_h	Nó que recebe a água do coletor	-
S_L	Nó que recebe a água fria para reabastecer o reservatório	-
V_1	Volume da primeira seção do reservatório	[m ³]
V_2	Volume da segunda seção do reservatório	[m ³]
V_3	Volume da terceira seção do reservatório	[m ³]

V_4	Volume da quarta seção do reservatório	$[m^3]$
T_{R1}	Temperatura da água de retirada da primeira seção do reservatório	$[^{\circ}C]$
T_{R2}	Temperatura da água de retirada da segunda seção do reservatório	$[^{\circ}C]$
T_{R3}	Temperatura da água de retirada da terceira seção do reservatório	$[^{\circ}C]$
T_{R4}	Temperatura da água de retirada da quarta seção do reservatório	$[^{\circ}C]$
.met	Extensão do arquivo climático do programa TERMOSIM	-
.col	Extensão do arquivo de coletor do programa TERMOSIM	-
.per	Extensão do arquivo perfil de demanda do programa TERMOSIM	-
N_{Reserv}	Grau de estratificação do reservatório	-
T_{ref}	Temperatura de referência do aquecedor	$[^{\circ}C]$
ΔT_{ref}	Varição da temperatura de referência do aquecedor	$[^{\circ}C]$
V_{AF}	Volume da água fria	$[m^3]$
U_{ptub}	Coefficiente global de perdas médias nas tubulações	$[W/^{\circ}C]$
V_C	Volume fornecido pelo coletor	$[m^3]$
TER	Temperatura de retirada	$[^{\circ}C]$
T_{AF}	Temperatura da água fria	$[^{\circ}C]$
P1	Parâmetro volume do tanque / Área de coletor	$[m^3/m^2]$
P2	Parâmetro volume demanda / Área de coletor	$[m^3/m^2]$
P3	Parâmetro qualidade do coletor	$[W.m^2/^{\circ}C]$
P4	Parâmetro altura do termostato	-

Caracteres Gregos

H	Eficiência	$[%]$
$(\tau\alpha)$	Produto da transmitância-absortância	-
γ	Função de controle do funcionamento do aquecedor	-
θ	Fator devido à variação da relação do volume do reservatório e a área de coletor	-
ϕ	Fator devido à variação da relação da demanda de água quente e a área de coletor	-
δ	Fator devido à variação da qualidade dos coletores	-
ω	Fator devido a altura do termostato	-

1. INTRODUÇÃO

As fontes alternativas de energia estão conquistando um espaço importante na matriz energética mundial, conciliando a geração de riquezas com a redução da degradação do meio ambiente e diminuindo especialmente o volume de emissões de gases poluentes.

O consumo de energia em nosso planeta está aumentando devido à necessidade do desenvolvimento tecnológico, do acréscimo da população e também em razão do aumento das necessidades humanas. A crescente demanda de energia poderá ocasionar um desequilíbrio ambiental, como por exemplo, a devastação de florestas e a inundação de campos, para produzir a energia necessária para sustentar o desenvolvimento. A energia solar utilizada para o aquecimento de água torna-se uma das alternativas mais corretas e eficazes para a redução do consumo de energia convencional, tanto ecológica quanto financeiramente. O desenvolvimento de uma consciência ambiental na população, com o objetivo de ensiná-la a utilizar a energia proveniente do Sol: limpa e gratuita, irá contribuir para a estabilidade da demanda energética mundial.

O aspecto positivo do crescente aumento no consumo de energia está provocando o reaparecimento, o desenvolvimento e a utilização de fontes alternativas de energia: como a solar, a eólica e a biomassa.

A energia solar está disponível em abundância na região tropical e o fato da maior parte do território brasileiro estar localizado nesta região, faz com que o Brasil apresente um dos maiores potenciais para o seu uso, tanto para o aquecimento de água, como para a geração de energia elétrica.

O aquecimento de água utilizando o chuveiro elétrico representa aproximadamente 67% do consumo doméstico de energia elétrica do Brasil, [Montenegro, 1998 apud Mveh, 1999], tornando-o um dos países que mais consomem energia elétrica para este fim. Isto, por sua vez, provoca o aparecimento de uma sobrecarga no sistema elétrico, obrigando as concessionárias a realizarem grandes investimentos no sistema de geração e transmissão, com o objetivo de atender o chamado “horário de ponta” (entre 18 h e 21 h), e segundo Lafay, 2005, chegando a representar quase 20% do consumo nacional de energia elétrica.

Entretanto, é possível demonstrar que o uso da energia solar para o aquecimento de água, considerando todo o investimento necessário para a instalação e manutenção do sistema ao longo de sua vida útil é mais econômica do que outras opções disponíveis. No Brasil, quase

todos os sistemas de aquecimento de água por energia solar são compostos por coletores solares planos com circulação natural, sendo a água aquecida armazenada em reservatórios térmicos.

Os sistemas solares, nos dias com baixa insolação, não conseguem fornecer toda a energia necessária para o aquecimento da água, havendo a necessidade da utilização de uma fonte de energia auxiliar, principalmente nos estados do sul e centro do Brasil, onde os invernos são mais rigorosos. A fonte de energia auxiliar mais utilizada é o aquecedor elétrico, devido ao seu baixo investimento inicial e a facilidade de ser controlada por equipamentos eletrônicos.

O custo equivalente da tarifa de energia elétrica residencial comparada ao gás (GLP ou GN) é superior, por isso é interessante substituir a energia auxiliar elétrica pelos aquecedores a gás. Esta troca, associada ao menor custo da energia, possibilita que os novos projetos contemplem cada vez mais o uso da fração da energia auxiliar do gás e, conseqüentemente, a redução da área de coletores solares. Krenzinger et al, 2002, demonstraram que nos sistemas solares, com a utilização da energia auxiliar a gás, o uso de reservatórios térmicos com maiores volumes e temperaturas de operação mais baixas reduzem as perdas térmicas no sistema, gerando um menor custo de instalação inicial e também uma maior eficiência solar ao longo de todo o ano.

A fim de auxiliar a utilização da energia solar, o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) desenvolveu um programa computacional denominado TERMOSIM, versão 2.0, em linguagem Visual Basic 5.0, que possibilita ao usuário realizar simulações sobre o desempenho de um sistema de aquecimento de água por energia solar com a utilização de uma fonte de energia auxiliar elétrica ou a gás. O programa possibilitou o estudo do comportamento da fonte de energia auxiliar a gás, que até então não era conhecido, em razão dos softwares comerciais não permitirem a modificação dos parâmetros operacionais. O modelamento matemático do programa TERMOSIM é o mesmo utilizado no aplicativo AQUESOLGAS, o qual foi desenvolvido no âmbito de um projeto conjunto entre UFRGS, PETROBRAS e FINEP. O modelamento matemático utilizado foi validado experimentalmente por Krenzinger et al, 2004, comparando os dados experimentais obtidos através do sistema real com os valores auferidos com o programa de simulação, nas mesmas condições do sistema real. Os resultados obtidos com as simulações ficaram muito próximos dos valores reais.

A existência do programa TERMOSIM e a confiabilidade conferida a seus resultados depois de validado permitem explorar esta ferramenta com diferentes simulações para comparar os resultados, da mesma forma que poderiam ser comparados resultados

experimentais ao longo dos anos. Com este procedimento surge a possibilidade de encontrar correlações entre parâmetros relacionados e a eficiência média do sistema de aquecimento solar.

1.1. Objetivo

O objetivo desta dissertação é realizar um estudo sobre a influência que exercem o número de coletores, o volume do reservatório, a altura do termostato, a razão de aspecto do reservatório, o consumo de água quente e a qualidade dos coletores sobre a eficiência do sistema de aquecimento, com a realização de simulações através do programa TERMOSIM.

Um segundo objetivo do estudo citado é consolidar os resultados em um procedimento de correlação entre diversos parâmetros construtivos e a eficiência média do sistema de aquecimento solar.

1.2. Escopo da Dissertação

O capítulo 2 descreve o funcionamento de um sistema de aquecimento de água por energia solar, os seus componentes e as configurações das instalações.

O capítulo 3 apresenta o software utilizado para a realização das simulações, o seu princípio de funcionamento, suas telas e a entrada de dados.

O capítulo 4 estuda a influência do número de coletores, do volume do reservatório, da altura do termostato e da razão de aspecto no desempenho de um sistema de aquecimento de água por energia solar.

O capítulo 5 analisa a influência que exercem os diferentes consumos de água quente e a qualidade dos coletores no rendimento energético do sistema. Além disso, é apresentada uma correlação para o cálculo da eficiência térmica através das simulações realizadas.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. SISTEMA SOLAR DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

Os sistemas de aquecimento de água utilizando a energia solar são compostos por coletores solares, reservatórios térmicos, fonte auxiliar de energia e tubulações isoladas termicamente, que interligados aquecem a água.

2.1. Coletores Solares

Os coletores são dispositivos utilizados para captar a energia disponível pelo sol e convertê-la em energia térmica, podendo ser do tipo plano ou de concentração.

No presente trabalho utilizou-se o modelo de coletor plano, com área de 0,6 m², com placas e tubulações de cobre, por onde escoam a água. O coletor possui uma superfície absorvedora com cobertura transparente simples, sendo isolado termicamente na parte inferior e lateral com lã de vidro. A energia absorvida do sol é transferida para os tubos e por sua vez à água.

Os coletores planos, em relação aos de concentração, apresentam uma construção simples com baixo custo de fabricação e manutenção, operando em dias nublados com certa eficiência, sendo este tipo o mais adequado para a produção de água quente para fins residenciais.



Figura 2.1 – Coletor solar plano. Fonte www.soletrol.com.br

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

O coletor solar plano tem a sua eficiência térmica definida como a relação entre a energia útil ganha pelo coletor e a radiação que chega no seu plano.

A equação 2.1 representa a eficiência do coletor

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G_T} = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_e)}{A_c G_T} \quad (2.1)$$

onde η é a eficiência, Q_u é a energia transferida à água, G_T é a radiação solar incidente no plano do coletor, A_c é a área do coletor, \dot{m} é a vazão da água, C_p é o valor específico da água, T_s é a temperatura de saída da água e T_e é a temperatura de entrada da água.

A teoria dos coletores planos possibilita calcular a energia total de um coletor por meio da diferença entre a energia absorvida e as suas perdas térmicas, conforme apresentado na equação 2.2.

$$Q_u = A_c F_R [G_T (\tau\alpha) - U_L (T_e - T_a)] \quad (2.2)$$

onde F_R , chamado fator de remoção de calor, representa a capacidade do coletor transferir calor da placa para a água; $(\tau\alpha)$ é o produto da transmitância-absortância; U_L é o coeficiente global de perdas, que reúne todas as perdas térmicas do coletor e T_a é a temperatura ambiente.

Com isso, a eficiência do sistema pode ser definida por:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G_T} = F_R \left[(\tau\alpha) - \frac{U_L (T_e - T_a)}{G_T} \right] \quad (2.3)$$

A equação 2.3 apresenta um comportamento similar à equação de uma reta do tipo $Y = a + bx$, onde o termo “a” (constante) representa o coeficiente linear $F_R(\tau\alpha)$ e a inclinação representada por “b”, o coeficiente angular $F_R U_L$.

Os resultados apresentados na forma de gráficos facilitam a obtenção desses dois parâmetros, demonstrando de maneira simplificada o comportamento do coletor. Os gráficos apresentam no eixo das ordenadas a eficiência instantânea η e no eixo das abscissas, a razão entre a diferença de temperatura do fluido na entrada do coletor e a temperatura ambiente e a radiação solar no plano do coletor.

Sendo U_L , F_r e $(\tau\alpha)$ constantes, o gráfico η versus $\frac{(T_e - T_a)}{G_T}$ será uma linha com interceptação em $F_R\tau\alpha$ e a derivada em $-F_RU_L$.

A seleção do melhor coletor irá depender da sua aplicação, pois a sua eficiência está relacionada com o valor da temperatura de entrada da água no mesmo, pois quanto maior o valor da radiação solar incidente na placa mais vertical será sua curva.

A Figura 2.2 apresenta o gráfico da eficiência para os coletores solares.

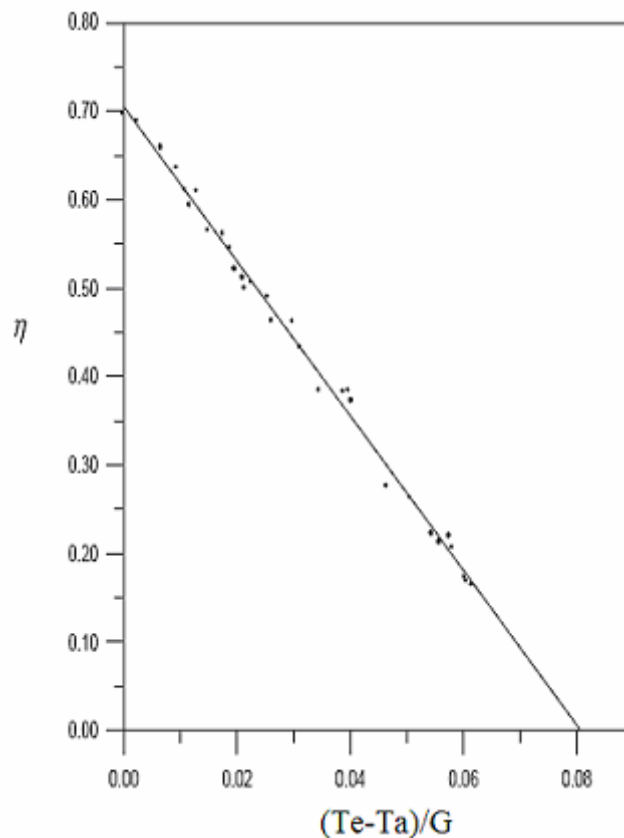


Figura 2.2 – Gráfico da eficiência do coletor solar

2.2. Reservatório Térmico

Os sistemas de aquecimento por energia solar devem ter um reservatório térmico que acumule o fluido aquecido sem degradação ou corrosão, bem como suportar as pressões envolvidas.

Segundo Lima, 2003, a ASHRAE considera que o projeto e a seleção do reservatório térmico são os itens mais desprezados dos sistemas de aquecimento por energia solar, apesar do reservatório exercer uma grande influência no desempenho do sistema como um todo, principalmente do ponto de vista econômico e de confiabilidade.

O material mais utilizado na confecção dos reservatórios térmicos é o aço inox, pois apresenta uma ótima resistência à corrosão, possui menor condutividade térmica em relação ao cobre.

Lafay, 2005, acrescenta, ainda, que a ASHRAE recomenda o uso de reservatórios verticais, devido a sua maior facilidade de estratificação da água, melhorando com isso a eficiência térmica.

Este trabalho foi desenvolvido com a utilização de um reservatório vertical de aço inoxidável com espessura de parede de 1 mm, isolado termicamente com lã de vidro com espessura de 60 mm, com volume de 0,1; 0,2; 0,4; 0,8 e 1 m³ e razão de aspecto (relação entre diâmetro e altura) de 0,5; 1; 1,5 e 2.

Os reservatórios de água quente recebem, armazenam e cedem calor a taxas variáveis ao longo do tempo. Os coletores solares e o aquecedor de passagem a gás fornecem o calor necessário ao sistema, ao passo que o consumo de água quente, as perdas térmicas e a circulação da água por meio dos coletores configuram o calor cedido.

A Figura 2.3 apresenta o fluxo de calor em um reservatório de água quente desenvolvido por Arruda, 2004.

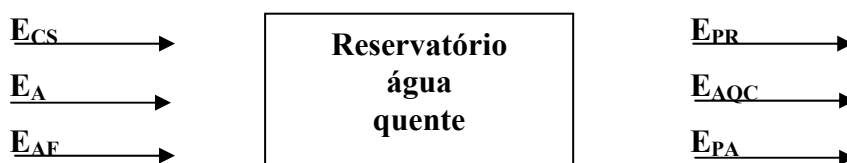


Figura 2.3 – Fluxo de energia em um reservatório de água quente

A variação da energia total no reservatório é fornecida pela equação 2.4.

$$\Delta_{ER} = E_{AQR} + E_{CS} + E_A - E_{AF} - E_{AQC} - E_{PA} - E_{PR} \quad (2.4)$$

Onde:

Δ_{ER} = variação da energia total no reservatório (kJ)

E_{AQR} = energia da água quente contida no reservatório (kJ)

E_{CS} = energia solar captada pelo coletor solar e fornecida ao reservatório (kJ)

E_A = energia fornecida pelo aquecedor auxiliar (kJ)

E_{AF} = energia da água fria que vai para o reservatório (kJ)

E_{AQC} = energia da água quente para consumo (kJ)

E_{PA} = energia perdida para o ambiente (kJ)

E_{PR} = energia perdida pela água na recirculação (kJ)

2.3. Estratificação Térmica nos Reservatórios

A distribuição natural de temperatura no interior do tanque caracteriza uma maneira de estratificação térmica em virtude das diferenças de massa específica da água. Nos sistemas de aquecimento solar a estratificação interfere diretamente no rendimento do coletor, sendo tomado cuidado para que não haja mistura da água.



Figura 2.4 – Reservatório térmico vertical. Fonte: www.soletrol.com.br

O estudo da estratificação térmica nos reservatórios, segundo Duffie e Beckman, 1991, pode ser dividido em duas categorias: uma denominada de múltiplos nós, onde o reservatório é dividido em N nós, sendo feito um balanço de energia entre cada seção convectiva e a outra consistindo no deslocamento em volume das várias seções do reservatório, ou seja, quando uma seção na entrada ou na saída do reservatório se mover irá ocorrer um igual deslocamento das outras camadas.

O modelo dos múltiplos nós, descrito por Duffie e Beckman, 1991, considera que as vazões de entrada no reservatório são distribuídas em apenas um segmento e que neste ponto ocorre uma mistura total. Os nós são numerados do topo para o fundo do tanque, sendo dada a designação de S_h para o nó que recebe a água do coletor e a designação de S_L para o nó que recebe a água fria para reabastecer o reservatório.

Não é considerado no modelo a tendência de desestratificação com o tempo por meio da difusão e pela condução de calor através das paredes do tanque.

Na segunda forma de estudo da estratificação considera-se que o retorno da água dos coletores ocorre na camada mais alta do reservatório. Para exemplificar este método é mostrada a Figura 2.5, onde o reservatório foi dividido em quatro seções com volumes denominados V_1 , V_2 , V_3 e V_4 e também com temperaturas T_{R1} , T_{R2} , T_{R3} e T_{R4} , onde o índice com número 1 representa o topo do reservatório e 4 o fundo. Depois de decorrido um intervalo de tempo, o coletor fornece um volume V_C a uma temperatura T_{RE} , supondo que T_{RE} é maior que T_{R1} uma nova camada será adicionada ao topo do tanque, sendo a camada com volume V_1 deslocada. No mesmo instante entra no fundo do reservatório com temperatura T_{AF} um V_{AF} que irá formar uma nova camada e deslocar a porção com volume V_4 .

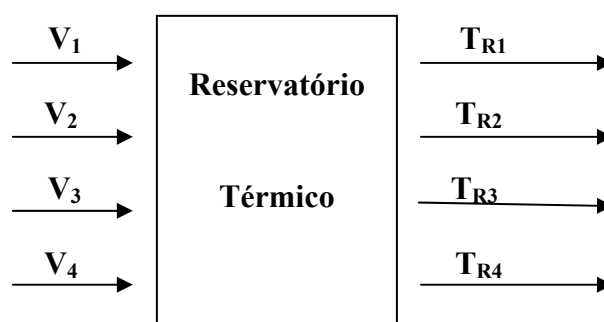


Figura 2.5 – Método de estratificação térmica

Este modelo, segundo Duffie e Beckman, 1991, pode apresentar um maior grau de estratificação que o modelo dos múltiplos nós.

Oliveski et al, 2003 apresentaram um estudo bastante completo sobre estratificação em tanques verticais demonstrando, entre outros resultados, que os modelos de múltiplos nós podem ser utilizados desde que incluam artifícios de cálculo para que não ocorra inversão das camadas de temperatura.

O modelo utilizado no programa TERMOSIM é uma variante dos modelos de múltiplos nós sendo descrito em Krenzinger et al, 2003.

2.3.1. Coeficiente de Perdas nos Reservatórios

O coeficiente global de perdas térmicas (U_L) dos reservatórios é definido considerando: convecção interna, condução pelas paredes, convecção e radiação nas paredes externas.

Nos sistemas de aquecimento de água por energia solar o reservatório térmico pode ser considerado como o coração do sistema, pois tanto a água quente vinda dos coletores como do aquecedor auxiliar convergem para ele. Para que a água contida no reservatório não libere calor para o ambiente devem ser utilizados reservatórios com baixo coeficiente global de perdas térmicas.

Lafay, 2005 relata que determinou o coeficiente global de perdas térmicas do reservatório através da divisão da potência fornecida por uma resistência elétrica instalada no fundo do tanque para manter a temperatura da água em um certo valor pela diferença entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura da água. Ressalta, ainda, que o método tem a vantagem de ser independente do conhecimento do volume do tanque e da sua área, assim como do material e da espessura do isolamento.

Neste trabalho foi adotado o valor de $4 \text{ W/}^\circ\text{C}$ para o coeficiente global de transferência de calor do reservatório.

2.4. Fonte Auxiliar de Energia

Os sistemas de aquecimento de água por energia solar não são dimensionados para fornecer toda a energia necessária ao aquecimento da água a ser consumida. Caso fossem, a quantidade de coletores e o volume do reservatório inviabilizariam o sistema do ponto de vista econômico e também tornaria a instalação superdimensionada. Em função disso, os sistemas

são especificados para fornecer entre 50 a 80% da energia térmica necessária. [Shariah e Löf, 1997]

Nos dias em que a energia disponível pelo sol não é suficiente, é preciso utilizar uma fonte de energia auxiliar, que pode ser resistência elétrica ou aquecedor de passagem a gás (aquecedor auxiliar). O primeiro tipo é o mais utilizado, pois apresenta um menor investimento inicial, porém em longo prazo o custo torna-se maior. Já o segundo tipo, que foi usado neste trabalho, representa um investimento inicial maior, tornando-se menor em longo prazo, porque o custo equivalente da tarifa residencial de energia elétrica comparada ao gás é superior.

2.5. Tubulações Isoladas Termicamente

As tubulações utilizadas no sistema de aquecimento solar devem ser capazes de suportar o fluido com temperatura de até 100 °C, sem sofrer nenhuma degradação ou corrosão. Normalmente, o material utilizado é o cobre porque apresenta uma boa relação custo / benefício no que se refere à resistência a corrosão e condutividade térmica.

2.6. Configurações dos Sistemas de Aquecimento de Água com Energia Solar

Os sistemas de aquecimento solar podem utilizar diferentes maneiras para circular a água nos coletores, podendo ser denominados ativos ou passivos.

2.6.1. Sistema Ativo

Os sistemas ativos são aqueles em que a circulação da água pelos coletores ocorre através do uso de bomba (circulação forçada), permitindo a instalação tanto dos coletores como do reservatório, em qualquer posição.

O princípio de funcionamento destes sistemas consiste no controle de acionamento da bomba por meio de sensores de temperatura instalados na entrada e saída dos coletores. Quando a diferença de temperatura entre a parte superior do coletor e o reservatório atinge um valor pré-estabelecido a bomba é acionada. O desligamento da bomba ocorre quando esta diferença de temperatura torna-se muito pequena ou quando a água atinge a temperatura estabelecida.

Na utilização deste sistema em regiões em que a temperatura ambiente possa ser muito baixa, próxima a 0 °C, deve ser previsto um dispositivo de proteção contra o congelamento da água no interior do coletor durante a noite.

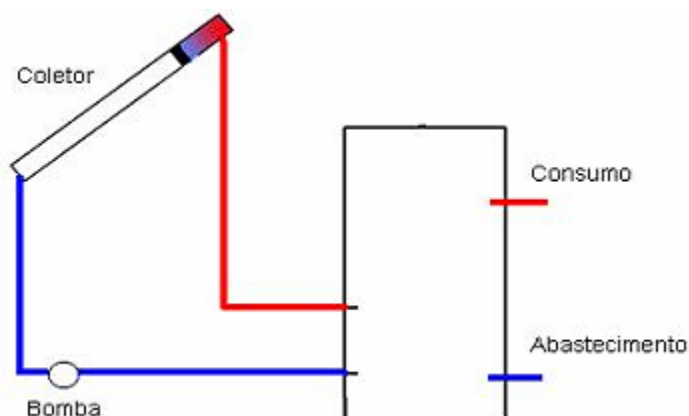


Figura 2.6 – Sistema solar de aquecimento com circulação forçada (sistema ativo)

2.6.2. Sistema Passivo ou Termossifão

No sistema passivo ou termossifão a circulação do fluido é realizada pelo aquecimento do mesmo no coletor através do sol, fazendo com que a sua massa específica diminua e o seu volume aumente, produzindo um fluxo convectivo do fundo do tanque para a entrada do coletor, da entrada para a saída do coletor e da saída do coletor para o topo do reservatório.

Este sistema é o mais utilizado no Brasil, devido ao fato do clima ajudar o funcionamento durante o ano inteiro. A utilização deste sistema em regiões em que a temperatura ambiente pode ser muito baixa deve ser previsto um dispositivo de proteção contra o congelamento da água.

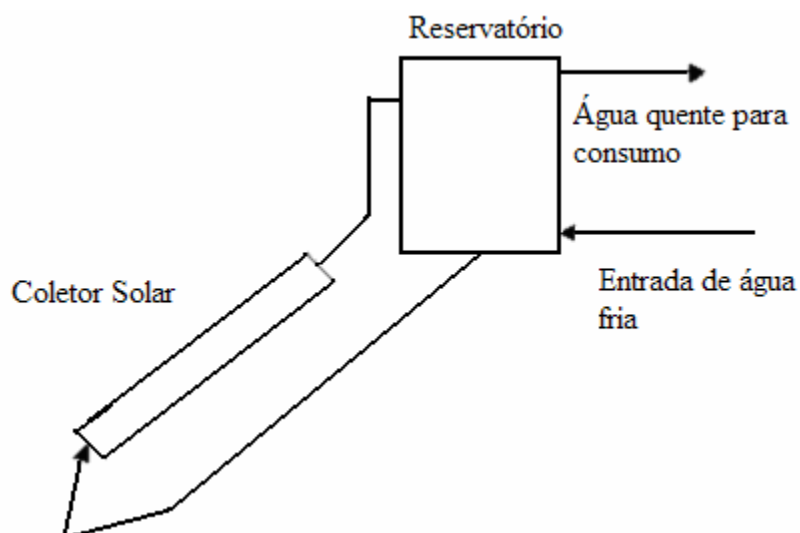


Figura 2.7 – Sistema solar de aquecimento com circulação natural por termosifão (sistema passivo)

Nos sistemas passivos, a posição do reservatório tem grande importância para o bom funcionamento, sendo recomendado que o mesmo fique no mínimo 30 cm acima do coletor para que não ocorra a circulação reversa. Lourenço Júnior, 2000, destaca que Huang concluiu por meio da análise de muitos experimentos, realizados por vários pesquisadores, a observância desta altura mínima.

No período em que não há radiação solar a água perde calor no interior dos coletores, ocorrendo a circulação reversa do reservatório para o coletor, resfriando parte do volume do tanque.

A Figura 2.8 apresenta um desenho esquemático de uma instalação residencial com circulação por termosifão, com aquecimento por energia solar e energia auxiliar fornecida por um aquecedor a gás de passagem ou por uma resistência elétrica no interior do reservatório térmico.

2.7. Definições utilizadas na Dissertação

Os sistemas de aquecimento de água por energia solar não dependem apenas dos coletores, mas de todos os componentes da instalação.

Nesta dissertação foram consideradas as seguintes definições:

- Energia térmica do sol: representa o valor da energia térmica fornecida à água pelo sol.

- Energia térmica do gás: representa o valor da energia térmica fornecida à água pelo gás.
- Energia térmica perdida: representa o valor da energia térmica que foi adicionada ao sistema e não foi utilizado para aquecer a água.
- Energia térmica total: representa a soma do valor da energia térmica do sol e da energia térmica do gás fornecido ao sistema.
- Fração solar: representa a energia térmica do sol dividida pela energia total do sistema.
- Ganho de energia solar: representa o acréscimo de energia térmica do sol que o sistema obtém com a inclusão de mais coletores.
- Eficiência solar: representa a energia solar convertida em energia térmica pelo coletor dividida pela energia solar disponível na área de incidência dos coletores.
- Razão de aspecto: representa a razão entre a altura do reservatório e o seu diâmetro.
- Aquecedor a gás de passagem (aquecedor auxiliar): equipamento utilizado para aquecer a água contida no reservatório térmico.

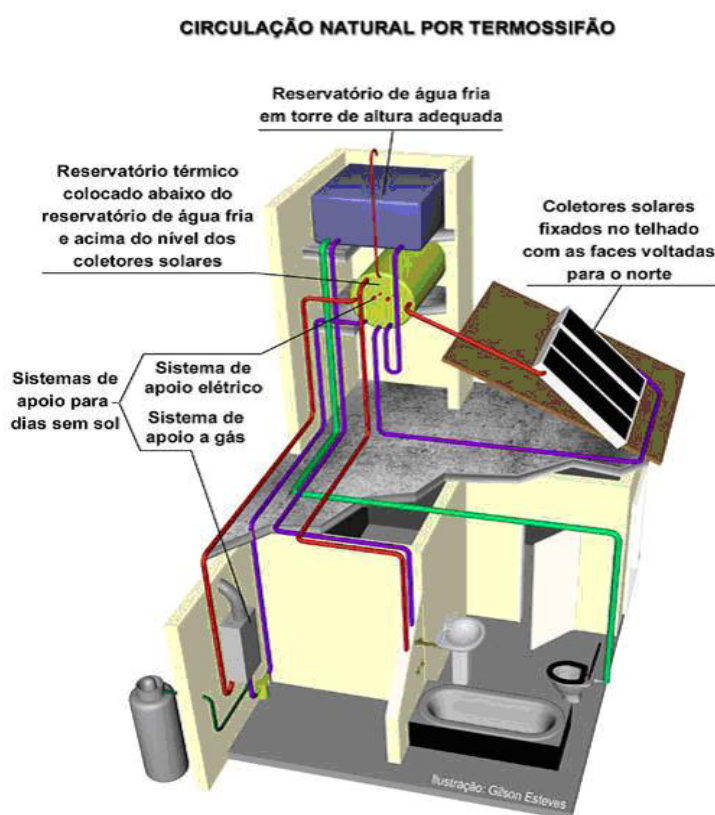


Figura 2.8 – Desenho esquemático de uma instalação de aquecimento por energia solar, com energia auxiliar através de um aquecedor auxiliar a gás de passagem ou resistência elétrica, com circulação natural. Fonte: www.iem.com.br

3. PROGRAMA TERMOSIM

Com o advento da informática, as simulações de processos através de cálculos computacionais se tornaram uma ferramenta de grande valia no auxílio das pesquisas. O uso das simulações permite a obtenção de respostas para várias situações em um curto espaço de tempo e com custos muito menores, pois evita, por exemplo, a necessidade de realizar gastos com a construção de protótipos e também com a instrumentação necessária para avaliar os parâmetros de desempenho de sistemas.

De acordo com a pesquisa realizada por Siqueira, 2003, existem muitos programas de simulação de sistemas de aquecimento de água por energia solar com finalidades, precisão e metodologia de avaliação diferente. Com base nesta pesquisa serão apresentados alguns dos principais programas de simulação de sistemas de aquecimento de água por energia solar:

- CLIMASOL: é um aplicativo criado na França e composto por módulos de coletores solares, reservatório térmico e tubulações. Este sistema possibilita ao usuário escolher a base de tempo para realizar as simulações diárias, mensais e anuais, mas por outro lado, apresenta algumas restrições, uma vez que utiliza um perfil fixo de consumo de água, estando a temperatura de consumo regulada para 60 °C e operando somente por circulação forçada de água.

- T-SOL : Simulation Programme for Thermal Heating System, é um aplicativo de uso comercial, desenvolvido na plataforma Windows para a simulação de sistemas de aquecimento de água por energia solar através de circulação forçada. No programa estão incluídos: coletores solares, tanque de acumulação de água, tubulações, bombas, trocadores de calor e fonte de energia auxiliar (aquecedor elétrico ou a gás), onde o usuário define o sistema a ser simulado, mas impossibilita analisar separadamente os coletores solares e reservatórios, pois são considerados um único componente do sistema.

- O SOLAR-PRO 2.0 é um aplicativo que pode ser utilizado para realizar simulações ou dimensionamento de sistemas de aquecimento de água por energia solar através de circulação forçada de água.

- SOLARSIM - programa de simulação de sistema de aquecimento de água por energia solar, desenvolvido na Dinamarca, em linguagem Pascal e em módulos, podendo operar por circulação natural ou forçada.

- TRNSYS – programa disponível comercialmente desde 1975, sendo desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da Universidade de Wisconsin (USA), com a finalidade de

estudar, analisar e simular transientes com estrutura modular, de aplicações de energia solar, com a colaboração dentre outros, de John A Duffie e William A Beckmann.

3.1. Origem

O Brasil, por ser um país de dimensões continentais e possuir grande parte de sua área distribuída na região dos trópicos, apresenta elevada disponibilidade de radiação solar. Devido a isto, os sistemas de aquecimento de água utilizam na sua grande maioria a energia proveniente do sol, com coletores solares de placa plana e com circulação natural.

Com a intenção de estudar o comportamento dos sistemas de aquecimento por energia solar e também dos seus componentes, foram desenvolvidos modelos matemáticos usados na simulação computacional dos sistemas, através de programas de computador com interfaces amigáveis.

Por isso, o Laboratório de Energia Solar da UFRGS desenvolveu, com base nos modelos matemáticos, o SOLARCAD, que apresenta um pacote de programas cuja finalidade consiste no projeto de sistemas que utilizam energia solar e de seus componentes tanto para sistema térmicos quanto fotovoltaicos.

O TERMOSIM, programa utilizado neste trabalho, é um dos módulos do SOLARCAD.

O aplicativo foi desenvolvido na linguagem de programação Visual Basic 5.0. A modelagem matemática utilizada no programa foi a mesma utilizada no aplicativo AQUESOLGAS, cujo projeto contou com o apoio da PETROBRAS e FINEP.

A modelagem matemática usada foi validada experimentalmente por Krenzinger et al, 2004, comparando os dados experimentais obtidos através do sistema real com os valores alcançados com o programa de simulação, nas mesmas condições do sistema real. Os resultados obtidos com as simulações ficaram muito próximos dos valores dos modelos correspondentes.

O programa TERMOSIM versão 2.0 constitui-se numa ferramenta de simulação através de computador e também de dimensionamento de sistemas de aquecimento de água para uso doméstico, podendo utilizar como energia auxiliar um aquecedor de resistência elétrica ou um aquecedor de água do tipo passagem, com Gás Natural (GN) ou Gás Liquefeito de Petróleo (GLP).

O programa possui uma interface amigável (padrão Windows), para que o usuário possa usá-lo de uma forma mais simples ou completa, dependendo do grau de conhecimento e experiência em sistemas de aquecimento solar.

O aplicativo permite que sejam feitas avaliações dos resultados obtidos com as simulações de maneira ágil e organizada, com vários tipos de instalações, como por exemplo:

- Orientação, quantidade e qualidade dos coletores;
- Tipo e volume do reservatório;
- Geometria do sistema;
- Perfil do consumo;
- Tipo do sistema de energia auxiliar.

Os resultados apresentados pelas simulações permitem a obtenção de parâmetros otimizados da instalação solar para o atendimento de cada sistema em particular.

3.2. Estrutura do Programa

O aplicativo foi desenvolvido de forma que o usuário possa definir os parâmetros da instalação de maneira individualizada.

Quando o aplicativo é iniciado aparece a tela do Menu Principal, conforme Figura 3.1, possibilitando o acesso aos diversos módulos do programa que serão apresentados.

O Programa está dividido em nove módulos principais:

- 3.2.1- Dados climáticos;
- 3.2.2- Tubulações hidráulicas;
- 3.2.3- Coletores solares;
- 3.2.4- Reservatório térmico;
- 3.2.5- Geometria do sistema;
- 3.2.6- Configuração de demanda;
- 3.2.7- Dados gerais do sistema de aquecimento;
- 3.2.8- Sistema de energia auxiliar;
- 3.2.9- Relatórios e gráficos.

Na Figura 3.2, que representa a tela do menu de simulação do TERMOSIM, podem ser visualizados a cada momento os valores de temperatura da água de entrada e saída nos coletores e no reservatório, bem como a temperatura média do ar ambiente e do tanque e, ainda, a temperatura média da água da rede que está sendo misturada.

Com o objetivo de facilitar o entendimento acerca do funcionamento do programa, foi elaborado um fluxograma simplificado da metodologia utilizada na determinação do desempenho térmico do sistema, que se baseia em substituições sucessivas na determinação da vazão mássica ao longo do circuito, sendo apresentado na Figura 3.3.

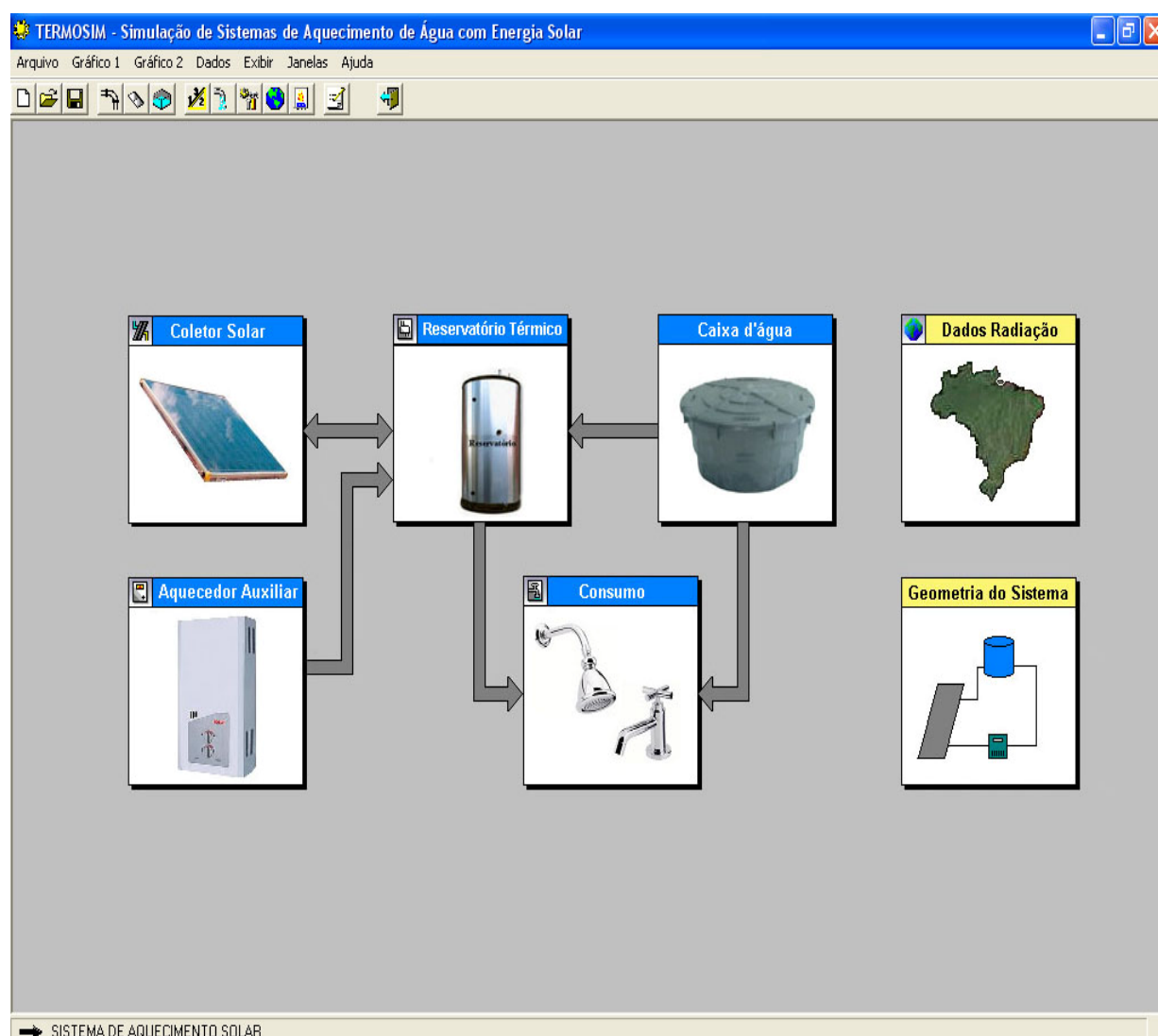


Figura 3.1 – Tela do menu principal do TERMOSIM

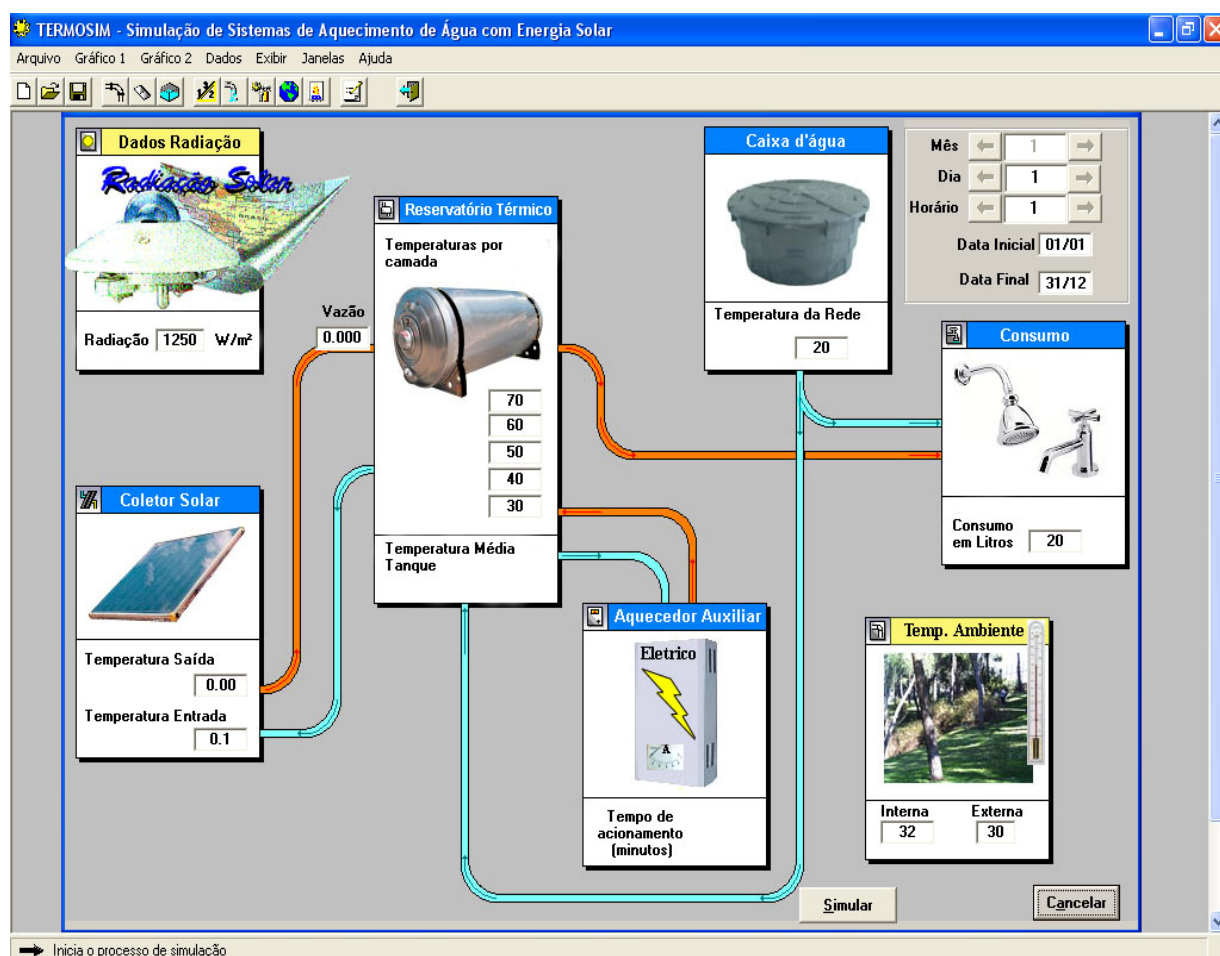


Figura 3.2 – Tela do menu de simulação do TERMOSIM

3.2.1. Dados Climáticos

Para a realização da simulação deve ser definida a cidade em que será executada a análise. Para ter acesso automático aos dados climáticos, o TERMOSIM utiliza um segundo programa, também desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da UFRGS: o SEQMETBR, cujo objetivo é sintetizar, a partir de dados em média mensal, os dados em seqüências meteorológicas com intervalo de uma hora. Este programa permite que seja escolhido um estado, uma região e/ou localidade através de um mapa político do Brasil, sendo posteriormente gerado um arquivo com os dados climáticos estocásticos necessários para a realização da simulação, conforme Figura 3.4. Se o local não estiver contemplado na listagem é possível efetuar manualmente a entrada das informações, como por exemplo: latitude, longitude, valor da radiação solar média para cada mês em $\text{kWh/m}^2\cdot\text{dia}$, umidade relativa média, temperatura máxima, temperatura média e a temperatura mínima em $^{\circ}\text{C}$, conforme mostrado na Figura 3.5.

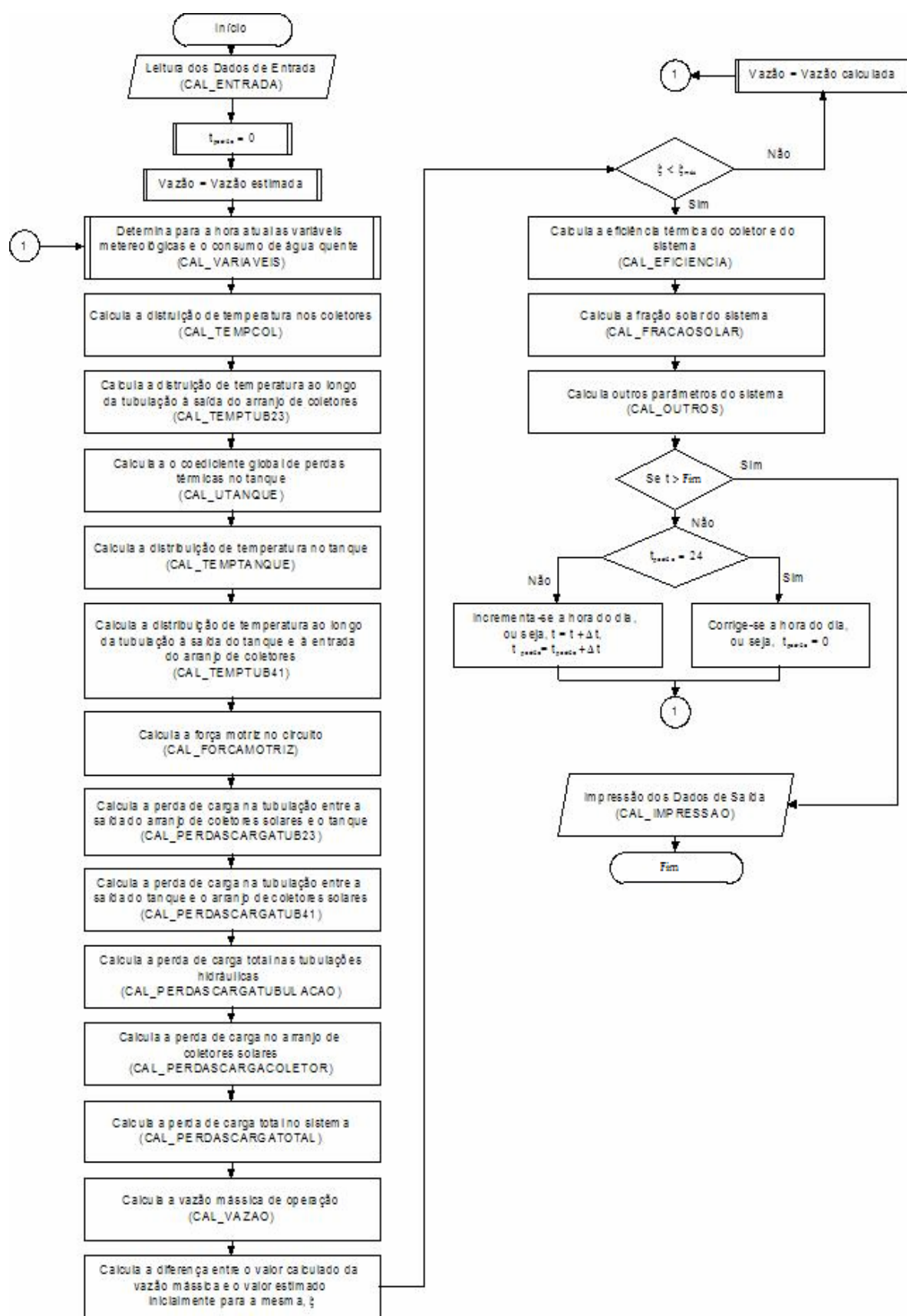


Figura 3.3 – Fluxograma simplificado do processo de determinação do desempenho térmico do sistema. Fonte Siqueira, 2003.

Quando o usuário escolher a entrada manual de dados terá a opção de salvar os dados climáticos informados em um arquivo com extensão “.met”, para ser utilizado em outras simulações. No caso de uma cidade não possuir seus dados climáticos cadastrados no banco de dados, poderá ser escolhida outra cidade próxima, com base na qual o programa irá calcular os dados ou, ainda, poderá ser escolhida uma cidade que apresente as mesmas características climáticas da cidade indicada, quando o programa calculará os dados interpolados com as informações das três cidades mais próximas, obtendo uma média ponderada com o inverso da distância do ponto pretendido à cidade onde há dados disponíveis.

No mapa do Rio Grande do Sul, mostrado na Figura 3.6, os pontos em vermelho correspondem aos locais em que há ausência de alguns dados climáticos e a existência de outros. Os pontos em amarelo correspondem às cidades que contêm todos os dados climáticos necessários.

Figura 3.4 – Formulário de geração dos dados meteorológicos do programa SEQMETBR

Entrada Manual de Dados - Alterando

Entre com os dados da localização do sistema:

Latitude: Longitude: Nome:

Mês	Radiação*	Umidade Relativa	Temp. Máxima	Temp. Média	Temp. Mínima
Janeiro	5,97	71	30,7	24,7	20,1
Fevereiro	5,50	74	30,1	24,5	20,1
Março	4,67	75	29,0	23,3	18,8
Abril	3,86	77	25,3	19,7	15,5
Mai	2,92	81	22,3	17,1	12,9
Junho	2,42	84	20,0	14,9	11,0
Julho	2,83	81	19,6	14,0	9,9
Agosto	3,33	78	20,9	15,4	10,9
Setembro	4,08	78	21,8	16,2	12,8
Outubro	5,25	75	24,2	19,2	14,9
Novembro	6,03	71	27,0	21,4	16,5
Dezembro	6,50	69	29,4	23,2	18,4

* Radiação em kWh/m²-dia

Figura 3.5 – Entrada manual dos dados climáticos do programa SEQMETBR

SeqMet BR - Laboratório de Energia Solar - UFRGS

Umidade Relativa

Radiação

Radiação Inclinada

Origem dos dados
 Mapas
 Interpolação

Cidade: Porto Alegre

Desvio Azimutal

Inclinação do Módulo

Temperatura Máxima

Temperatura Média

Temperatura Mínima

Albedo Local (%)

Figura 3.6 – Formulário de geração de arquivo estocástico dos dados meteorológicos do programa SEQMETBR

3.2.2. Tubulações Hidráulicas

Para realizar as simulações devem ser definidos a geometria do sistema, o comprimento, o diâmetro e as características do isolamento das tubulações hidráulicas de conexão entre os coletores solares e o reservatório térmico e entre o reservatório térmico e o aquecedor de passagem, conforme mostrado na Figura 3.7.

Dados Gerais da Tubulações Hidráulicas

Sistema

Dados da Tubulação em [m]

Dimensões

Comprimento do tubo "a"	2,27
Comprimento do tubo "b"	2,6
Comprimento do tubo "c"	3,2
Comprimento do tubo "d"	3,3
Diâmetro interno do tubo "a"	0,024
Diâmetro interno do tubo "b"	0,024
Diâmetro interno do tubo "c"	0,013
Diâmetro interno do tubo "d"	0,013
Nº de conexões na tubulação "a"	5
Nº de conexões na tubulação "b"	6

Isolamento Térmico

Tubo "a"	Tubo "b"	Tubo "c"	Tubo "d"
Espessura isolamento: 8	Espessura isolamento: 8	Espessura isolamento: 8	Espessura isolamento: 8
Cond.Térm. isolamento: 0,034	Cond.Térm. isolamento: 0,034	Cond.Térm. isolamento: 0,034	Cond.Térm. isolamento: 0,034
Cond.Térmica parede: 385	Cond.Térmica parede: 385	Cond.Térmica parede: 385	Cond.Térmica parede: 385

Espessura em [mm], Condutividade Térmica em [W/mK]

Confirmar **Cancelar**

Figura 3.7 – Formulário das tubulações hidráulicas

Na Figura 3.7, as tubulações são identificadas pela palavra tubo, seguida de uma letra que representa o local da instalação, conforme mostrado abaixo:

- a: tubulação de saída do coletor para o reservatório térmico;
- b: tubulação de saída do reservatório para o coletor;
- c: tubulação de saída do reservatório para o aquecedor de passagem;
- d: tubulação de saída do aquecedor de passagem para o reservatório.

Alguns trabalhos desenvolvidos para estudar o desempenho das instalações de aquecimento de água por meio de coletores solares desconsideram as perdas térmicas ao longo destas tubulações, por serem pequenas devido ao fato das mesmas estarem bem isoladas. No TERMOSIM estas perdas térmicas foram consideradas nos cálculos.

As tubulações do sistema são divididas em vários segmentos com igual comprimento entre si, sendo consideradas as perdas térmicas em cada segmento para o ar ambiente, usando o coeficiente global de perdas médias ($U_{p_{tub}}$), baseado no perímetro interno da tubulação em questão, sendo calculado em função dos parâmetros geométricos e da condutividade térmica dos materiais.

3.2.3. Coletores Solares

O aplicativo possui um módulo que possibilita informar com relação ao coletor utilizado as propriedades dos materiais usados, os parâmetros construtivos ou, ainda, os dados resultantes das curvas características experimentais medidas, para a determinação do rendimento térmico dos coletores solares.

A Figura 3.8 apresenta o formulário de entrada dos dados para o coletor solar, constituindo-se numa interface que permite a informação das características construtivas e as propriedades térmicas/ópticas dos coletores ou utilizar os parâmetros de qualidade dos mesmos para que o software realize os cálculos. O programa apresenta uma opção onde podem ser informados os parâmetros do coletor, como dados dimensionais ou curva medida e depois salvá-los em um arquivo com extensão “.col”, para posterior utilização.

Portanto, o usuário tem a possibilidade de escolher a maneira de analisar o desempenho térmico dos coletores, ou seja, através das características construtivas ou dos parâmetros de qualidade.

No programa TERMOSIM foi usado a modelagem matemática desenvolvida por Hottel-Bliss-Whillier (Duffie e Beckman 1991). Nesta modelagem são usados os parâmetros de qualidade do coletor: $F_R(\tau\alpha)$ e F_{RU_L} , que representam, respectivamente, o efeito das propriedades ópticas e das propriedades térmicas do coletor, podendo ser obtidas através de ensaio experimental para determinar o rendimento térmico dos coletores. Isto pode ser realizado de acordo com as Normas Técnicas como, por exemplo, ABNT NBR 10184(1988) e ASHRAE Standard 93-77(1977), sendo a combinação dos valores de $F_R(\tau\alpha)$ e F_{RU_L} , usado para determinar a qualidade do coletor, expressando o comportamento da curva de eficiência do mesmo.

O modelo matemático do processo foi elaborado fazendo algumas suposições simplificativas e delimitadoras relacionadas a seguir:

- Comportamento em regime pseudopermanente;
- A base do coletor é uma placa metálica absorvedora interligada a tubos paralelos;

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

Dados do Coletor solar

Dimensões do Coletor [mm]

Espessura do Absorvedor	0,3	Esp. Isolamento Lateral	50
Comprimento do Absorvedor	1000	Esp. Isolamento do Fundo	50
Largura do Absorvedor	500	Diâmetro Int.tubo cabeçote	28
Espessura da Cobertura	3,0	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	1100	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	100	<input type="checkbox"/> Coletor sem cobertura transparente	

Eficiência Instantânea
 Eficiência Instantânea = 0,71
 (Temp. Entrada - Temp. Ambiente)/Rad no coletor

Opção de Dados
 Dados dimensionais
 Curva Medida

Valor de FR_TA: 0,64
 Valor de FR_UL: 6,88

Propriedades dos Materiais

Absortância Solar do Absorvedor	0,95	Condutividade Absorvedor	386
Emitância do Absorvedor	0,95	Condutividade Isolamento	0,04
Transmitância Solar da Cobertura	0,87	Condutividade Solda	64
Emitância da Cobertura	0,95		

Posição dos Tubos
 Seleccione a posição:
 Acima do absorvedor
 No meio do absorvedor
 Abaixo do absorvedor

Salvar Abrir Confirmar Cancelar

Figura 3.8 – Formulário de entrada dos dados para o coletor solar

3.2.4. Reservatório Térmico

O módulo reservatório térmico do programa TERMOSIM, mostrado na Figura 3.9, apresenta vários parâmetros que podem ser definidos, como por exemplo: características do isolamento térmico, coeficiente de perdas térmicas e também o modelo de estratificação térmica a ser usado.

Figura 3.9 – Formulário dados gerais do reservatório térmico

No aquecimento da água, o fluido aquecido vindo do coletor entra na parte superior do reservatório e a água a ser aquecida entra no coletor a partir da base do tanque. À medida que a água é consumida o fluxo ocorre de forma inversa ao do coletor, ou seja, a água quente sai pela parte superior do tanque e a água fria entra pela parte inferior.

Como a água quente é mais leve, devido a sua densidade ser menor que a água fria, ela tem a tendência de permanecer na região superior do tanque, enquanto que a água fria, por apresentar densidade maior, fica na parte inferior. O funcionamento do TERMOSIM considera que a água, depois de passar pelos coletores solares, retorna ao tanque dirigindo-se para a porção do reservatório mais próxima da temperatura da água vinda dos coletores. Com isto, em cada parte do reservatório em que a água se dirigir será considerado um volume nodal, possibilitando uma maior estratificação das temperaturas do tanque.

A homogeneização da temperatura no interior do tanque ocorrerá de forma lenta por difusão térmica dentre as camadas de água e por condução nas paredes do reservatório. Assim, a água que está no reservatório apresentará uma distribuição de temperatura não-uniforme ao longo da altura do mesmo.

A posição de entrada e saída dos circuitos de aquecimento e de consumo influencia na distribuição da temperatura da água no interior do reservatório. Através da determinação do arranjo geométrico da instalação, o perfil de temperatura no interior do tanque dependerá somente das vazões e das temperaturas de entrada da água dos dois circuitos no reservatório. Com base nisso, é possível realizar uma análise e determinar como se comporta a distribuição da temperatura da água no interior do tanque, fazendo uso de um modelo matemático, onde o reservatório é subdividido em vários nós, isto é, em camadas que representarão a temperatura média da água neste nó.

Oliveski et al, 2003 demonstraram a possibilidade de simular com grande exatidão o comportamento do reservatório térmico, mas para soluções mais rápidas é comum utilizar soluções unidimensionais, como os modelos de temperaturas de múltiplos nós. No programa TERMOSIM, o cálculo da distribuição de temperaturas nas camadas de água foi realizado com base em um trabalho apresentado por Hussein, modificado para permitir o acesso de mais conexões externas, no caso devido ao aquecedor a gás de passagem externo.

No modelo original de Hussein algumas camadas foram identificadas como sendo detentoras de conexões físicas, aquelas que tem um tubo conectado ao tanque e outras foram identificadas por representarem uma conexão de equilíbrio térmico, qualidade a elas atribuída por terem temperatura similar àquela da água que estaria entrando por uma das tubulações.

O reservatório se comunica com 3 circuitos externos (demanda, solar e aquecimento auxiliar). Cada circuito tem 2 conexões físicas e uma conexão térmica. A vazão de circulação de água pelo reservatório e por cada circuito é distribuída uniformemente entre todas as camadas compreendidas entre as duas conexões físicas, mas a distribuição de energia térmica ocorre de forma uniforme apenas entre a conexão de entrada de água e a correspondente conexão térmica. Para realizar esta tarefa foram definidos fatores de fluxo que comandam os termos de uma equação geral de transferência de calor e massa no reservatório. Estes fatores de fluxo são detalhados em Krenzinger et al, 2004, onde apresenta a definição de operadores lógicos para definir os fatores de fluxo de cada camada.

As modificações realizadas sobre o modelo original de Hussein permitiram que o programa TERMOSIM considerasse corretamente a possibilidade de conectar a água da rede, a saída para consumo, o coletor solar e o aquecedor auxiliar em alturas arbitrárias no reservatório

de água quente. Lafay, 2005, demonstrou que o modelo modificado tem um comportamento que concorda com os resultados experimentais.

Para efeito de simplificação todas as perdas térmicas que ocorrem nos diferentes volumes nodais são consideradas com o mesmo coeficiente, exceto as do topo e da base. Como uma opção de funcionalidade, o aplicativo permite que o usuário defina para cada volume nodal seu coeficiente de perda, com o intuito de obter um valor mais próximo da realidade.

O programa considera como base de tempo para obtenção dos valores de temperatura sessenta segundos, sendo o método de Euler usado para a resolução das equações diferenciais resultantes para cada volume nodal. Após terem sido realizados os cálculos da temperatura na referida base de tempo, por um processo de correção física, os valores inconsistentes serão descartados.

3.2.5. Geometria do Sistema

O programa TERMOSIM possibilita a determinação de vários parâmetros de altura das instalações do sistema de aquecimento solar, conforme mostrado na Figura 3.10.

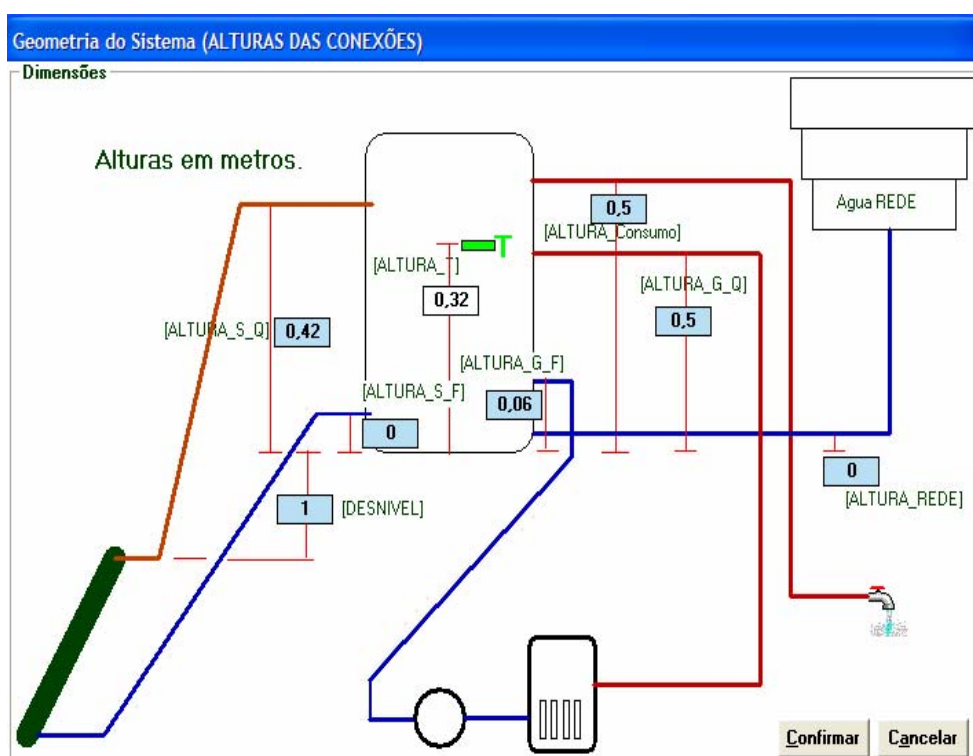


Figura 3.10 – Formulário de dados geométricos do sistema
Todas as alturas relacionadas a seguir estão referenciadas na base do tanque.

Onde:

ALTURA_S_Q representa a altura entre saída do coletor e a base do tanque;

DESNÍVEL representa a altura entre a saída do coletor e a base do tanque;

ALTURA_S_F representa a altura da saída da água do tanque para o coletor;

ALTURA_T representa a altura do termostato;

ALTURA_G_F representa a altura de saída da água do tanque para o aquecedor;

ALTURA_Consumo representa altura da saída da água quente do tanque para o consumo;

ALTURA_G_Q representa altura da saída do retorno da água do aquecedor para o tanque;

ALTURA_REDE representa a altura que a água da rede entra no reservatório.

3.2.6. Configuração de Demanda

Com a finalidade de tentar reproduzir uma situação mais próxima da realidade, o aplicativo TERMOSIM possibilita determinar como será a demanda de água quente. No formulário apresentado na Figura 3.11, pode ser especificado o volume de consumo de água quente, diário ou mensal, particularizado por hora, especificando o valor da temperatura de consumo da água. O usuário pode criar vários perfis de consumo e salvá-los em um arquivo com extensão “.per” para utilizá-los em outras simulações.

3.2.7. Dados Gerais do Sistema

Este módulo possibilita determinar a maneira que os coletores solares foram conectados, em série ou em paralelo ou em série/paralelo, conforme definido no formulário de dados gerais do sistema (Figura 3.12). Além disso, permite definir a forma de circulação da água nos coletores, ou seja, forçada ou natural (termossifão), bem como o número de coletores instalados, a vazão mássica nos coletores para o caso de circulação forçada e o número de módulos instalados em série e, ainda, possibilita realizar simulações com o sistema sem coletores solares.

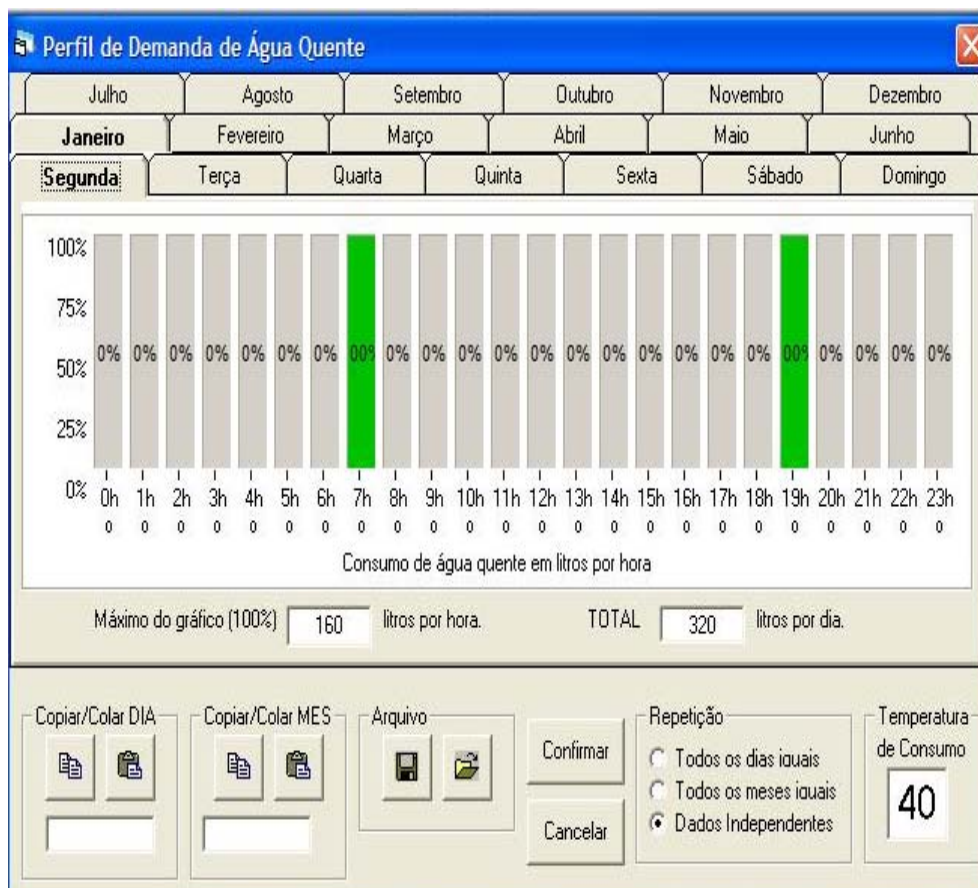


Figura 3.11 – Formulário de perfil de demanda

Dados Gerais do Sistema de Aquecimento

Configuração

Arranjo

Paralelo
 Série-Paralelo
 Série

Circulação

Natural
 Forçada

Núm. de col. em paralelo: 4
Vazão de operação, kg/s/m²: 0,02
Núm. de MÓDULOS em série: 1

Confirmar Cancelar

SISTEMA SEM COLETORES SOLARES

Figura 3.12 – Formulário de dados gerais do sistema

3.2.8. Aquecedor de Passagem

Um sistema de aquecimento de água por energia solar necessita de uma fonte de energia auxiliar para suprir os períodos em que a água não estiver na temperatura determinada, devido à ausência/deficiência da energia solar. Portanto, a potência fornecida pelo aquecedor deve ser compatível com o nível de consumo, para que possa atuar de forma independente ou auxiliar.

Para facilitar a configuração do sistema, o programa possui uma interface na qual pode ser informado o tipo de aquecedor que será utilizado, ou seja, elétrico ou a gás de passagem, conforme se verifica na Figura 3.13. No caso de ser utilizado um aquecedor de passagem a gás deverão ser informados os seguintes dados: vazão, rendimento e consumo de gás. Por outro lado, quando for utilizado um aquecedor elétrico deverá ser informada a potência da resistência elétrica. Além disso, a temperatura de acionamento do termostato deverá ser determinada para os dois tipos de aquecedores, a fim de permitir o seu acionamento.

O aquecedor de água a gás de passagem pode estar instalado em série ou em paralelo ao tanque. A instalação em série condiciona a colocação do aquecedor próximo ao consumo e a colocação em paralelo normalmente é feita com o aquecedor instalado próximo ao reservatório, fornecendo calor a toda massa de água armazenada no tanque.

Observa-se que o aquecedor em série irá funcionar somente quando ocorrer consumo de água quente. Nesta condição seria desejável utilizar um aquecedor com controle eletrônico de temperatura com chama modulada, que consegue estabelecer uma temperatura constante na saída, independente da vazão ou da temperatura de entrada. O sistema de aquecimento solar opera como “pré-aquecedor”. Infelizmente estes aquecedores com controle eletrônico de temperatura são muito caros, com custo entre 5 e 10 vezes mais que os aquecedores de passagem convencionais.

No caso de aquecedor de passagem em paralelo, com o objetivo de garantir que a temperatura da água esteja sempre no valor desejado, independente de ter energia suficiente proveniente do sol, deve ser conectado no aquecedor a gás um termostato em série com o circuito elétrico da bomba de circulação. Em face disso, quando o valor da temperatura da água no interior do tanque estiver abaixo do valor ajustado no termostato o circuito elétrico será fechado, ligando a bomba de circulação que por sua vez irá acionar automaticamente o aquecedor. Em contrapartida, quando a temperatura da água estiver acima do valor ajustado no termostato não será permitida a passagem de corrente elétrica para a bomba de circulação, motivo pelo qual não será acionando o aquecedor.

Para o sistema com aquecedor elétrico o termostato irá ligar e desligar a resistência elétrica quando a temperatura da água não estiver no valor determinado.

O TERMOSIM utiliza uma função de controle denominada γ . Se a função de controle estiver em $\gamma = 1$, informará que o aquecedor está ligado, fornecendo calor à água até a temperatura especificada pelo usuário (T_{ref}), de acordo com os dados do fabricante do equipamento. Para garantir que não ocorra problemas de superaquecimento, o aplicativo simula o comportamento de um aquecedor real, considerando que o mesmo possui capacidade para produzir uma variação de temperatura na água de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ com uma razão pré-fixada, com limite máximo de temperatura, não possibilitando que a temperatura da água que sai do aquecedor ultrapasse o limite de segurança, isto é, $T_{ref} + \Delta T_{ref}$. Todas as perdas térmicas relativas ao aquecedor e a sua eficiência são consideradas no modelamento matemático.

Dados do Aquecedor de Passagem	
Marca do Aquecedor	0
Modelo	0
Vazão Nominal (litros/minuto)	8,0
Consumo de gás (m³/h)	1,6
Rendimento (%)	81
Ação termostato (C°)	40

O programa considera este valor como Poder Calorífico Superior para o Gás Natural utilizado no Aquecedor Auxiliar.

Poder Calorífico Superior para o Gás Natural
28000 kcal/m³

Salvar Abrir Confirmar Cancelar

Figura 3.13 – Formulário das características do aquecedor

3.2.9. Relatórios e Gráficos

Depois de realizada a simulação, o programa apresenta quatro opções de saída dos dados, sendo uma em forma de tabela com dados mensais, duas em forma de gráficos (mensal e anual) e a última consistindo no resumo da simulação.

A opção Dados Mensais contém informações a respeito da radiação solar captada, consumo de água quente, consumo de gás, energia térmica necessária para aquecer a água,

energia térmica do gás, energia térmica solar, a energia térmica perdida e a eficiência solar, conforme mostrado na Figura 3.14, sendo possível copiar os dados da tabela para outros aplicativos.

RELATÓRIO								
Dados Mensais		Gráfico Mensal (MJ)		Gráfico Anual (MJ)		Resumo (clique na folha)		
	Radiação Solar	Consumo Água	Consumo Gás	Cons_En.Térm.	En.Térm.do GN	En.Térm.Solar	En_Não Usada	Eficiência Solar
Mês	Rad (MJ)	ConsAg (m³)	C_GN (m³)	C_E.T. (MJ)	E.T.GN (MJ)	E.T.Sol (MJ)	E.T.P. (MJ)	Ef_Sol (%)
Janeiro	294,7	0,69	5,79	164,0	549,4	29,5	414,9	10,0
Fevereiro	273,0	0,62	5,28	150,8	501,3	29,7	380,2	10,9
Março	304,7	0,69	6,03	182,0	572,2	32,7	422,8	10,7
Abril	290,6	0,67	6,48	213,7	615,2	30,5	432,0	10,5
Mai	246,3	0,69	7,25	248,0	688,6	21,7	462,3	08,8
Junho	226,5	0,67	7,44	264,4	706,3	17,7	459,7	07,8
Julho	265,8	0,69	7,79	280,5	739,3	24,1	482,9	09,1
Agosto	277,0	0,69	7,55	265,2	716,5	28,4	479,7	10,3
Setembro	279,1	0,67	7,04	245,4	668,4	29,8	452,8	10,7
Outubro	317,3	0,69	6,93	223,7	658,2	30,4	464,9	09,6
Novembro	291,3	0,67	6,19	190,3	587,4	28,6	425,6	09,8
Dezembro	306,0	0,69	6,19	178,6	587,4	30,4	439,2	09,9
TOTAL ou MÉDIA	3372,3	8,13	80,0	2606,6	7590,2	333,5	5317,0	9,8

Figura 3.14 – Relatório das simulações

As opções Gráfico Mensal e Gráfico Anual possibilitam a visualização dos valores da radiação solar captada, consumo de energia térmica, consumo de gás, conversão solar e energia térmica desperdiçada, conforme Figura 3.15 e Figura 3.16.

O aplicativo disponibiliza ainda um resumo da simulação realizada, no qual é possível verificar o número de coletores utilizados, o volume e o tipo de reservatório, a temperatura de regulagem do termostato, o consumo anual de gás, o consumo anual de energia térmica, a energia térmica adicionada ao reservatório, a fração solar utilizada, a eficiência média do sistema solar, o tempo de acionamento do aquecedor a gás, a temperatura média na saída para consumo, a temperatura ambiente média, o consumo anual de água quente e a temperatura da água quente, de acordo com a Figura 3.17.

O programa apresenta, ao final das simulações, uma ferramenta dinâmica que permite a visualização combinada de vários parâmetros simulados, por meio de gráficos,

conforme a Figura 3.18.

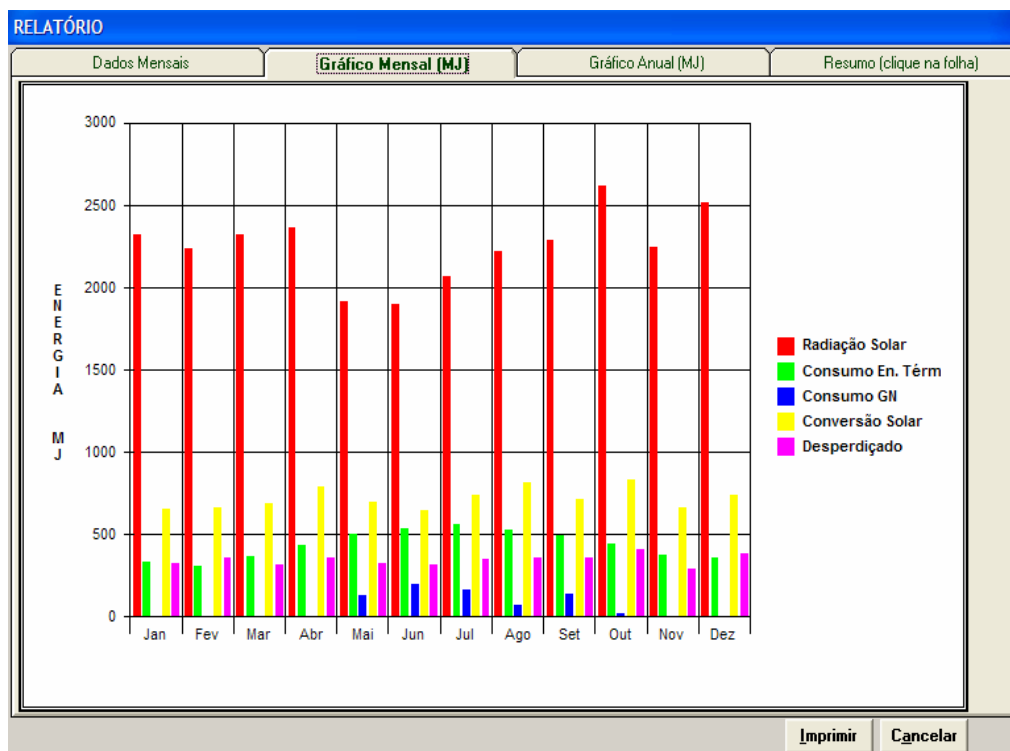


Figura 3.15 – Gráfico mensal das simulações

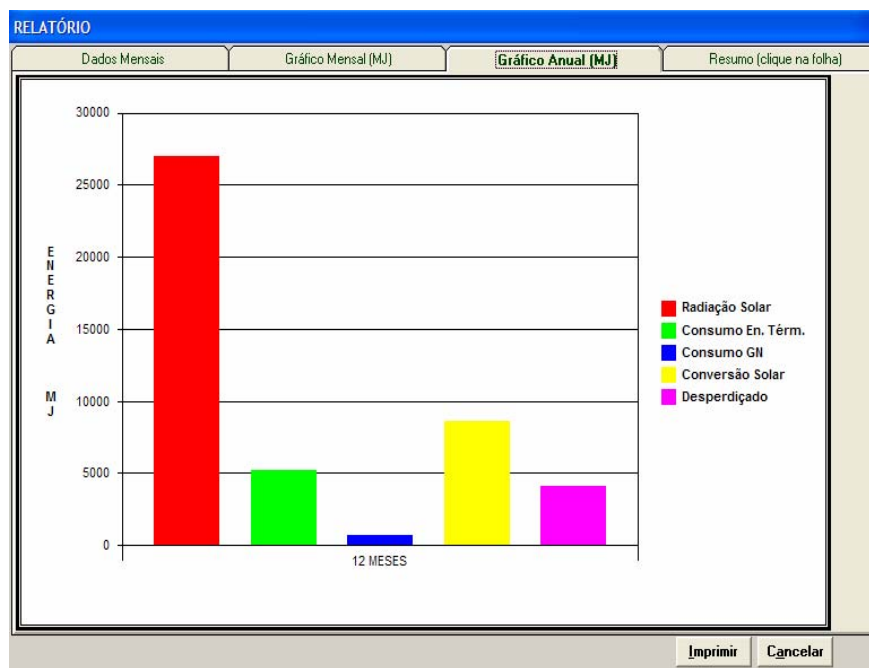


Figura 3.16 – Gráfico anual das simulações

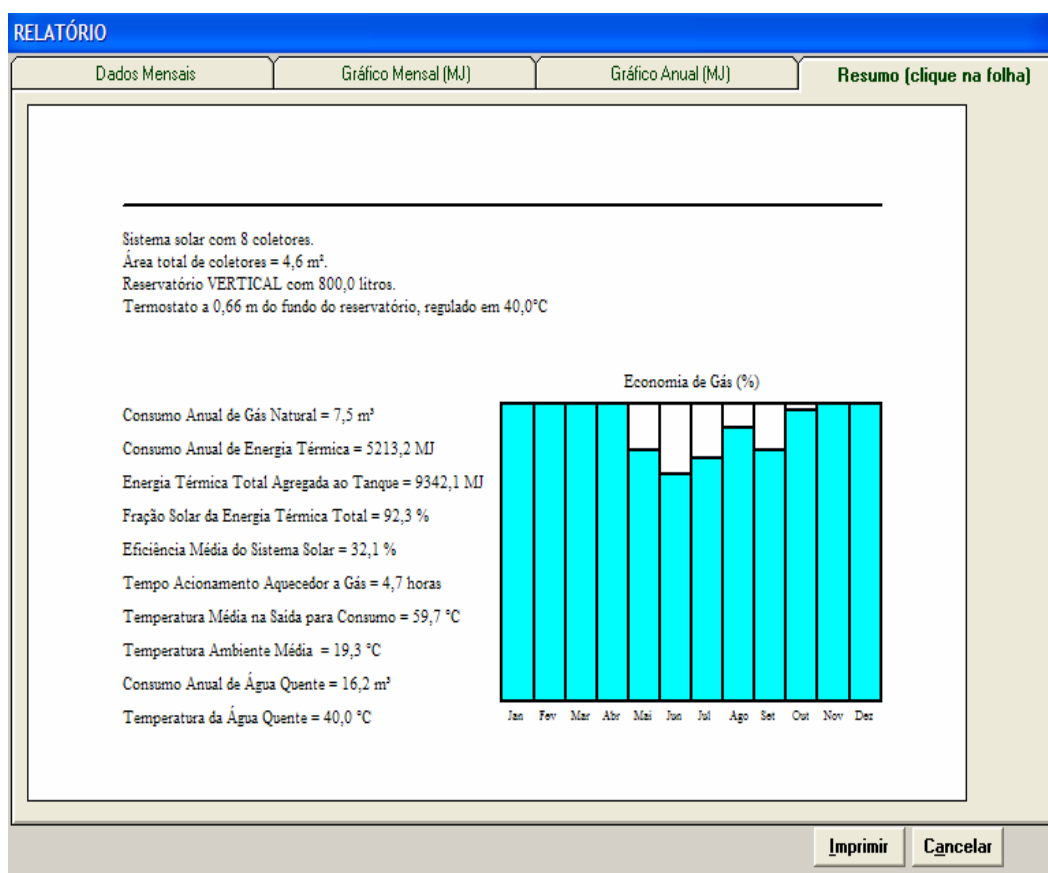


Figura 3.17 – Resumo anual das simulações

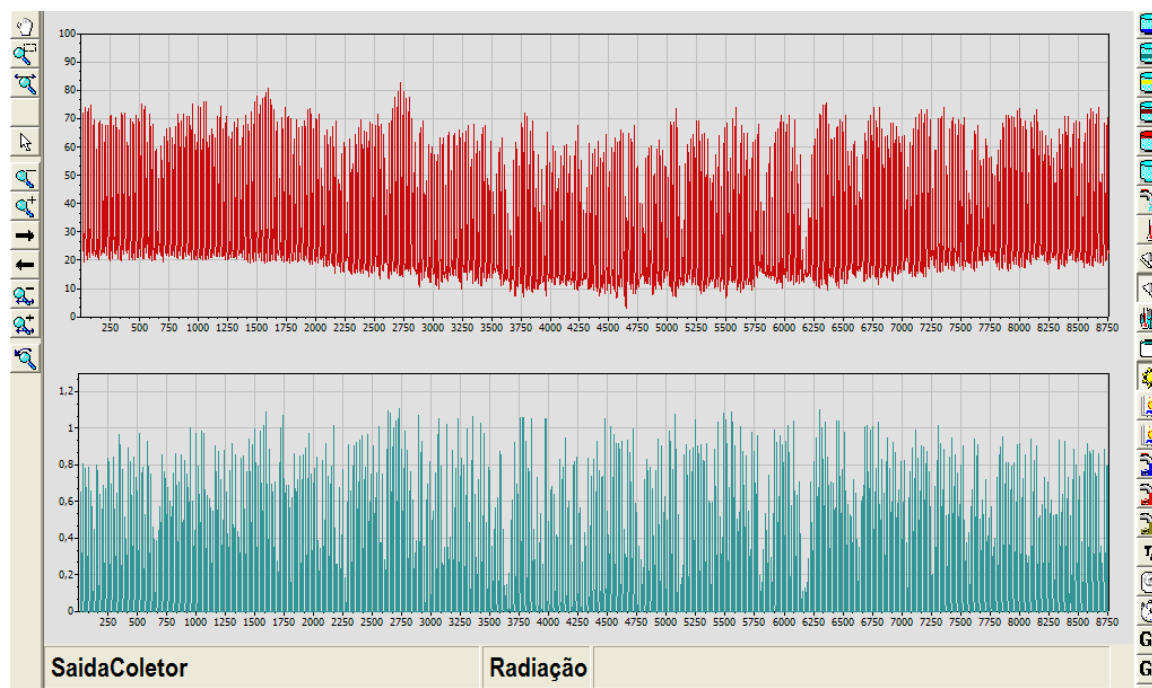


Figura 3.18 – Resultados horários das simulações, nesse exemplo mostrando dados de radiação solar e temperatura de saída do coletor

4. A INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS CONSTRUTIVOS NO DESEMPENHO DE UM SISTEMA

Os sistemas de aquecimento de água por energia solar apresentam sua eficiência afetada por aspectos climáticos (radiação solar e temperatura ambiente), aspectos construtivos (número de coletores, volume do reservatório, altura do termostato e razão de aspecto do reservatório), aspecto de utilização (consumo de água quente) e aspecto qualidade dos materiais (qualidade dos coletores).

Neste capítulo serão estudadas as influências dos aspectos climáticos e construtivos na eficiência do sistema de aquecimento de água.

Para realizar o estudo da influência dos aspectos climáticos, construtivos, aspecto de utilização e qualidade dos materiais foram realizadas várias simulações através do programa TERMOSIM, utilizando como local de estudo a cidade de Porto Alegre – RS, que está situada na Latitude 30,02° S e Longitude 51,22° W.

4.1. Metodologia Utilizada para Realizar as Simulações

Com o objetivo de fazer uma avaliação do comportamento de um sistema de aquecimento de água, para ser utilizado no verão e inverno, foram realizadas simulações para verificar a influência dos aspectos climáticos no desempenho do sistema.

Os dados da instalação utilizados para estas simulações e para todas as outras que serão apresentadas na dissertação se basearam nas informações contidas na Tabela 4.1 e os demais parâmetros que sofrerão variação serão apresentados ao longo do trabalho.

4.2. Sistema de Aquecimento para Inverno e Verão

A energia solar para o aquecimento de água, bem como para outras finalidades é utilizada há muito tempo. Existem alguns relatos de que os sistemas de aquecimento de água por energia solar não funcionam bem, espalhando uma visão errônea a respeito dos mesmos. Isto pode ocorrer se o projeto for mal elaborado, sem o adequado dimensionamento dos componentes (coletores solares, fonte de energia auxiliar, tamanho do reservatório) e devido à qualidade dos mesmos.

Tabela 4.1 – Dados da instalação

Dados da instalação	
Reservatório térmico	
Material	Aço inox
Tipo de isolamento	Lã de vidro
Espessura do isolamento	60 mm
Espessura da chapa	1 mm
Orientação do reservatório	Vertical
Altura entre coletor e tanque	1m
Coefficiente global de perdas térmicas	4 W/°C
Coletor solar	
Distância entre os tubos	50 mm
Espessura do absorvedor	0,3 mm
Diâmetro Interno do Tubo Cabeçote	26 mm
Diâmetro Interno do Tubo Elevador	12 mm
Comprimento do coletor	1200 mm
Largura do coletor	500 mm
Espessura da cobertura de vidro	3 mm
Distância da cobertura de vidro até a placa absorvedora	60 mm
Espessura do isolamento lateral	30 mm
Espessura do isolamento do fundo	60 mm
Aquecedor auxiliar	
Tipo do aquecedor	Passagem conectado em paralelo
Fonte de energia	gás
Vazão a um $\Delta T=20$ °C	8 l/min
Consumo de gás	1,6 m ³ /h
Rendimento	81 %

As estações climáticas apresentam importantes variações no comportamento da radiação solar e da temperatura ambiente. A comparação que se pretende realizar necessita que os dados meteorológicos sejam mantidos invariáveis, de outra forma seria difícil afirmar se a causa da variação de desempenho é construtiva ou meteorológica. Por ser a sede da UFRGS, foi escolhida a cidade de Porto Alegre como referência para os dados meteorológicos.

O programa TERMOSIM está associado ao programa SEQMETBR, o qual produz seqüências horárias de dados de radiação solar incidente em um plano inclinado e dados de temperatura ambiente. Um arquivo somente com dados meteorológicos para Porto Alegre foi gerado e utilizado para todas as simulações da presente dissertação.

Com o objetivo de visualizar as condições utilizadas para a realização das simulações pelo aplicativo, como o comportamento da radiação solar e da temperatura ambiente, são apresentados gráficos mostrando o comportamento de cada um.

O gráfico da Figura 4.1 apresenta os valores horários da radiação solar incidente sobre um plano voltado para o Norte com inclinação de 45° . Observa-se que tanto no verão como no inverno a radiação solar poderá ser mais elevada em algumas horas do dia. Para o arquivo climático utilizado chega-se a atingir valores máximos de $4 \text{ MJ/m}^2\text{hora}$. Na Figura 4.2, os valores da radiação solar são consolidados de forma diária, inferindo-se que a radiação atinge valores máximos e mínimos de $28 \text{ MJ/m}^2\text{dia}$ e $3 \text{ MJ/m}^2\text{dia}$, respectivamente. A Figura 4.3, mostra a radiação solar mensal, que é a mais utilizada para dimensionar os sistemas de aquecimento de água por energia solar, apresentando valor máximo de radiação solar de $540 \text{ MJ/m}^2\text{mês}$ em outubro e mínimo de $390 \text{ MJ/m}^2\text{mês}$ em junho. Neste sentido, constata-se que no período de inverno o valor da radiação solar é aproximadamente 38% menor que no período do verão, resultando em um maior uso da energia térmica auxiliar.

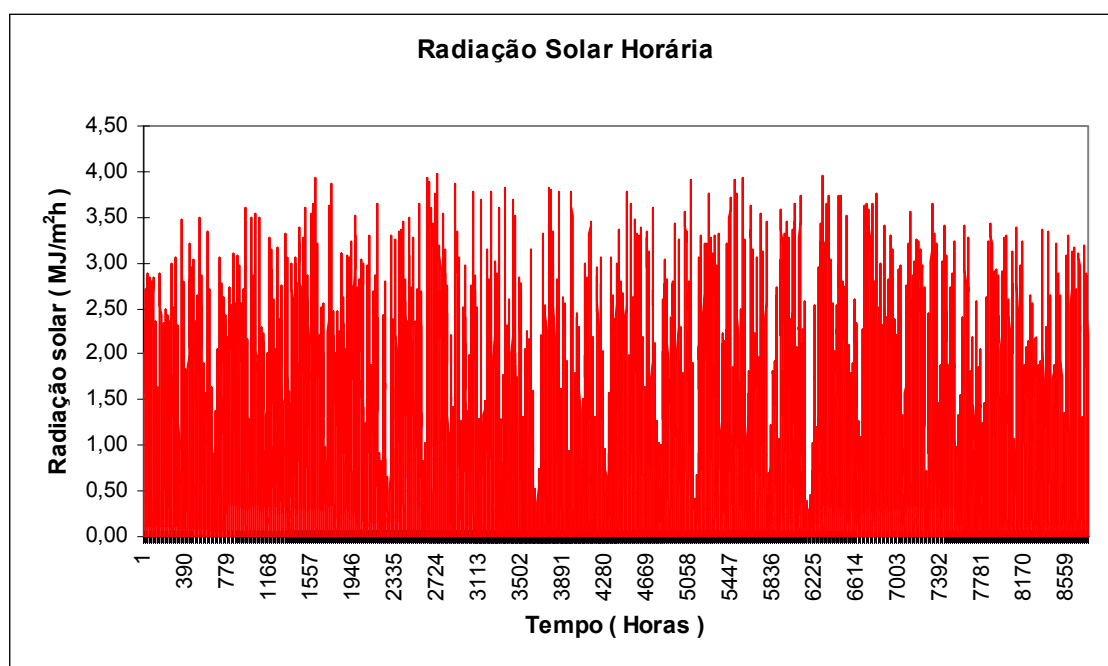


Figura 4.1 – Gráfico da radiação solar horária para a cidade de Porto Alegre–RS, incidente sobre um plano inclinado de 45° em relação à horizontal voltado para a direção Norte

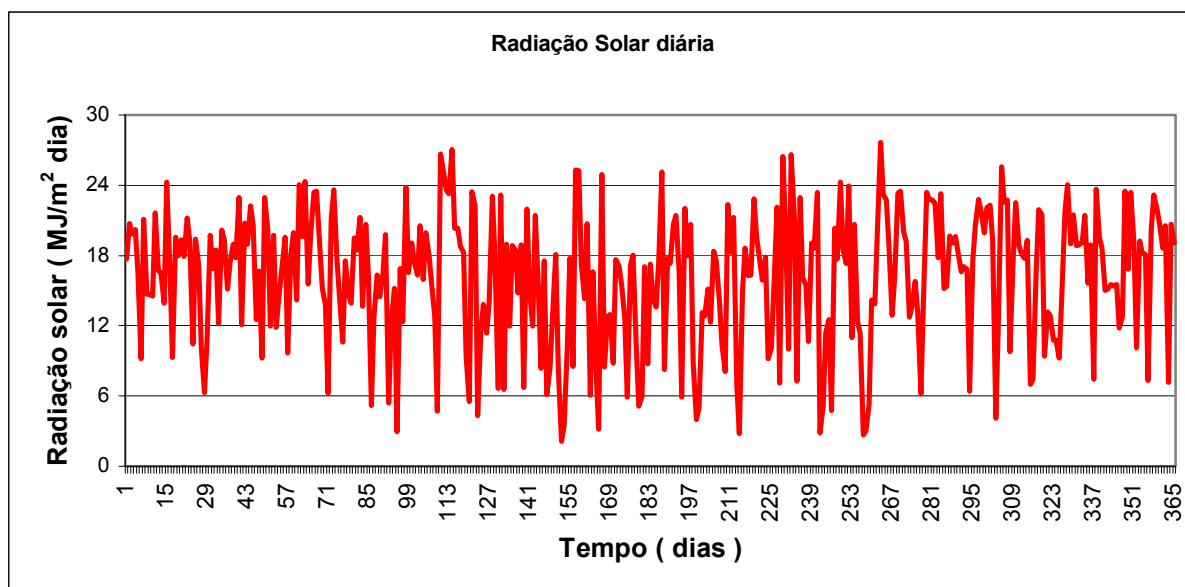


Figura 4.2 – Gráfico da radiação solar diária para a cidade de Porto Alegre-RS, incidente sobre um plano inclinado de 45° em relação à horizontal voltado para a direção Norte

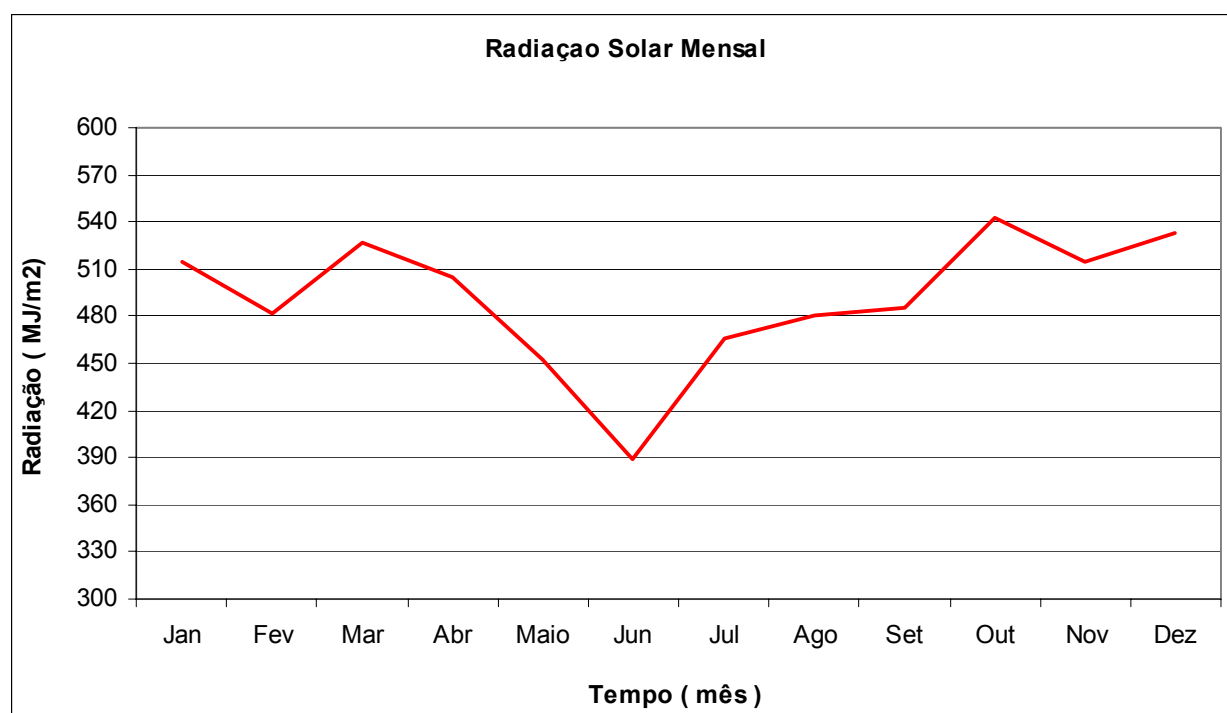


Figura 4.3 – Gráfico da radiação solar média mensal para a cidade de Porto Alegre-RS, incidente sobre um plano inclinado de 45° em relação à horizontal voltado para a direção Norte

Os valores da temperatura ambiente horária são apresentados na Figura 4.4, mostrando que a mesma chega a alcançar valor máximo de 38 °C e mínimo de 4 °C. Na Figura 4.5, a temperatura ambiente média é indicada com valores consolidados por dia, apresentando

valores extremos de 26 °C e 11 °C. A Figura 4.6 exibe o valor da temperatura ambiente média consolidada mensalmente, apresentando valores entre 25 °C em janeiro e 14 °C em julho.

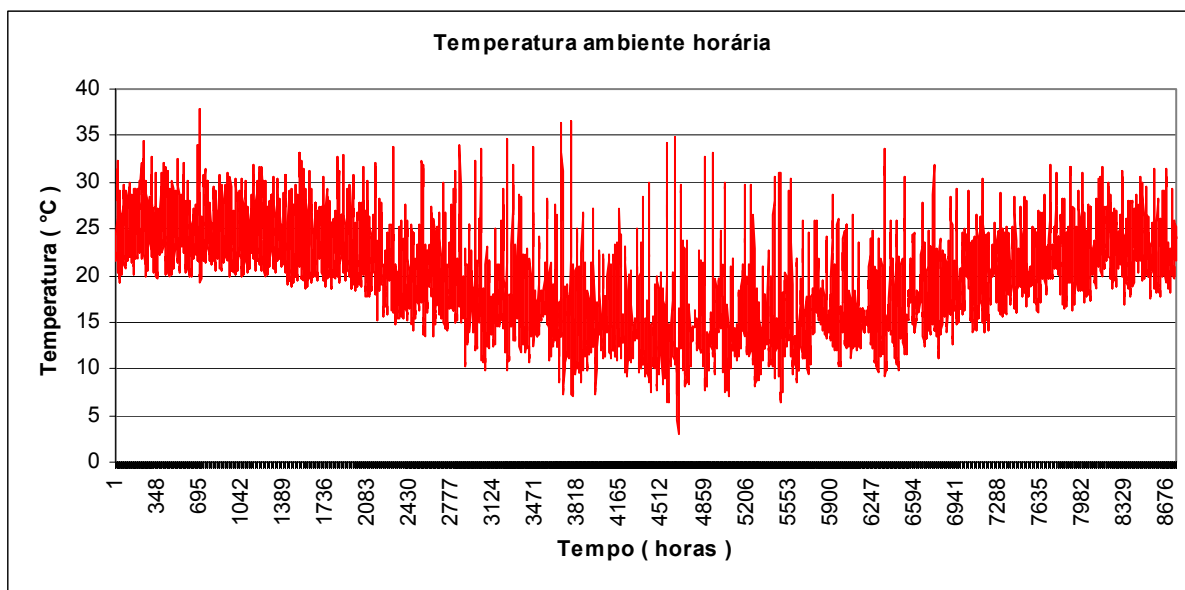


Figura 4.4 – Gráfico da temperatura ambiente horária para a cidade de Porto Alegre-RS

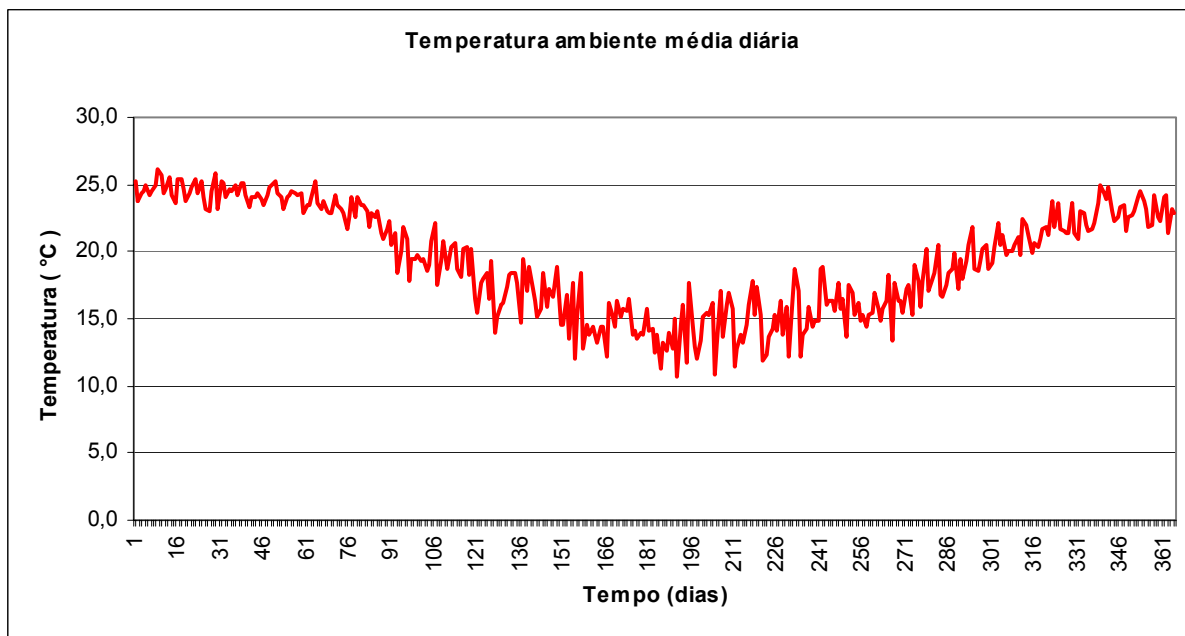


Figura 4.5 – Gráfico da temperatura ambiente média diária para a cidade de Porto Alegre-RS

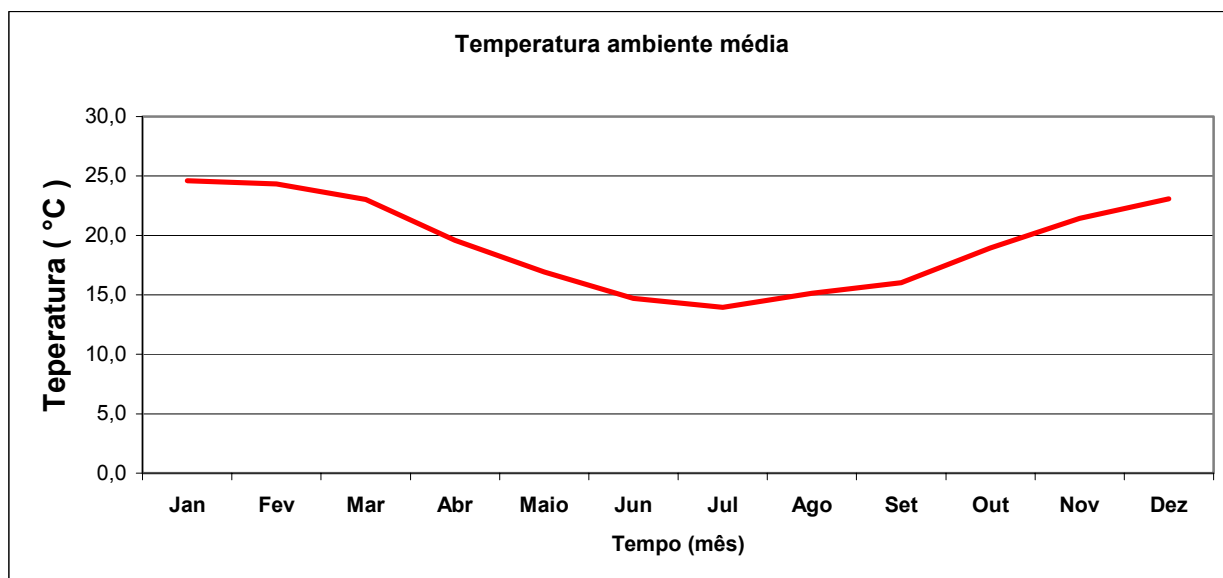


Figura 4.6 – Gráfico da temperatura ambiente média mensal para a cidade de Porto Alegre–RS

A Figura 4.7 e a Figura 4.8 apresentam as curvas de radiação solar horária e de temperatura ambiente relativa à cidade de Porto Alegre, obtidas da sintetização computacional, conforme descrito no Capítulo 3, considerando três dias de verão e inverno.

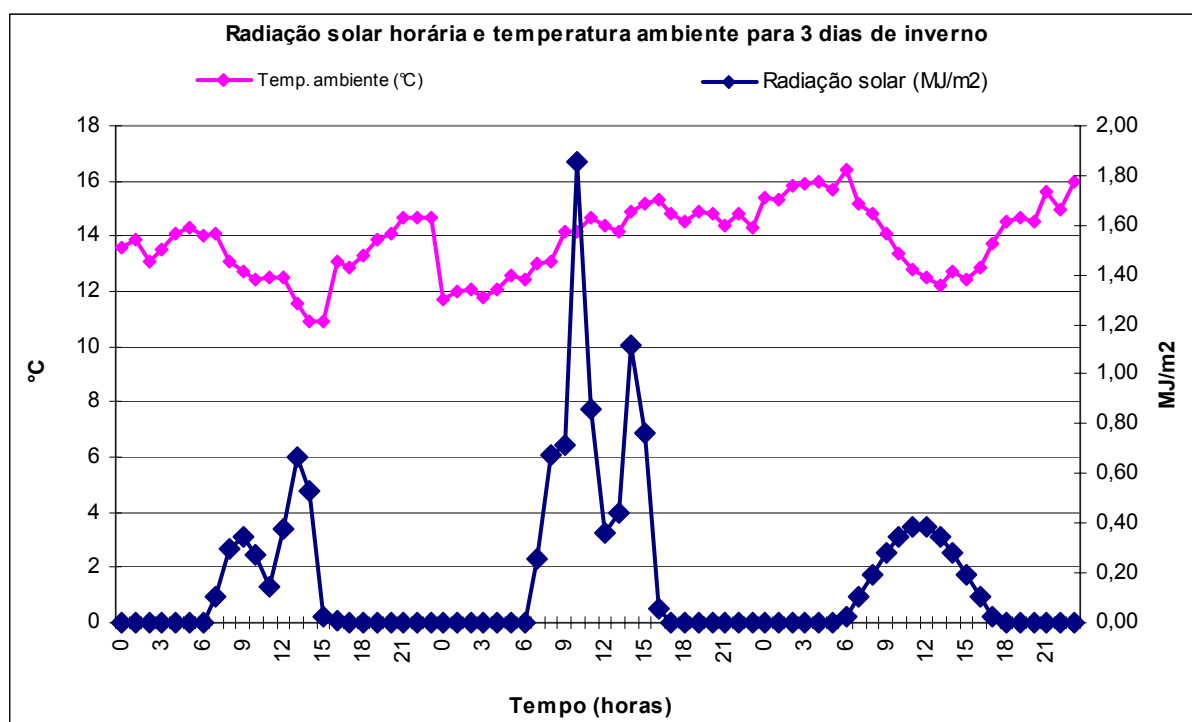


Figura 4.7 – Exemplo de dados de 3 dias de radiação solar incidente e temperatura ambiente para o inverno na cidade de Porto Alegre–RS, obtido do arquivo climático utilizado

Com o objetivo de evidenciar a diferença do rendimento energético de um sistema de aquecimento de água por energia solar por termossifão associado ao uso de energia auxiliar de um aquecedor auxiliar, foram realizadas simulações para o período de inverno (meses de junho a setembro) e verão (meses de dezembro a março), apresentando a energia solar disponível, a energia auxiliar e as perdas térmicas.

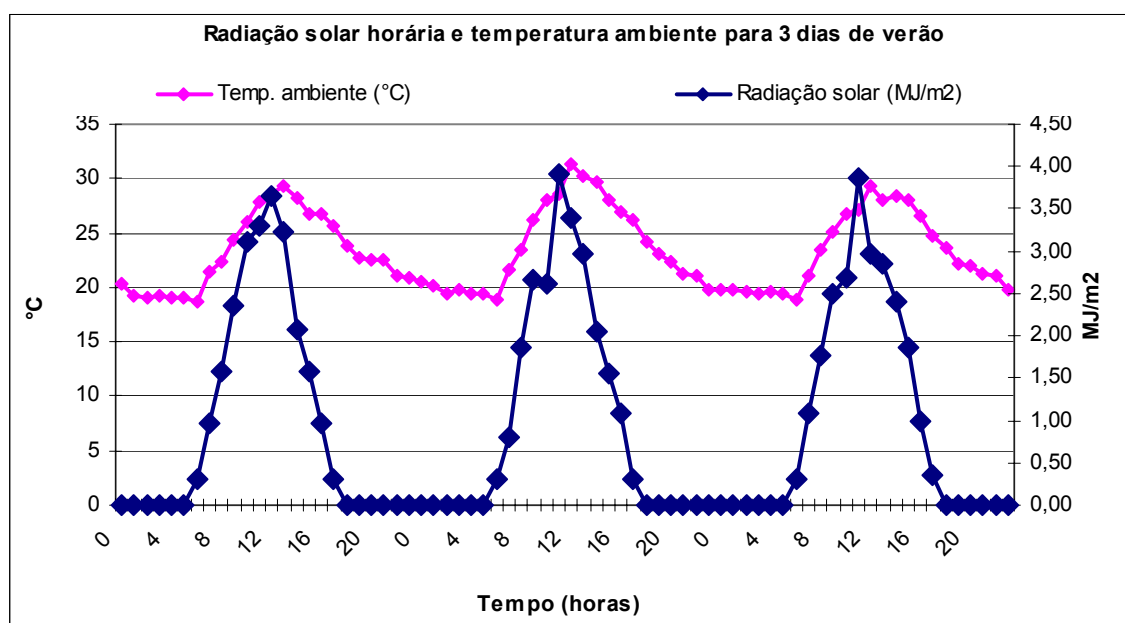


Figura 4.8 – Exemplo de dados de 3 dias de radiação solar incidente e temperatura ambiente para o verão na cidade de Porto Alegre–RS, obtido do arquivo climático utilizado

4.3. Resultado das Simulações para o Inverno e Verão

As simulações realizadas para o período de inverno e verão levaram em consideração os dados constantes na Tabela 4.2. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.3.

Com a finalidade de facilitar o entendimento a respeito das diferentes dimensões utilizadas para realizar as simulações ao longo do trabalho, conforme constantes nas tabelas denominadas “Parâmetros de Simulação”, a Figura 4.9 apresenta as características geométricas utilizadas na instalação, sendo identificadas com as letras A até H. Nas tabelas “Parâmetros de Simulação” cada uma das dimensões está identificada com a mesma letra constante na Figura 4.9.

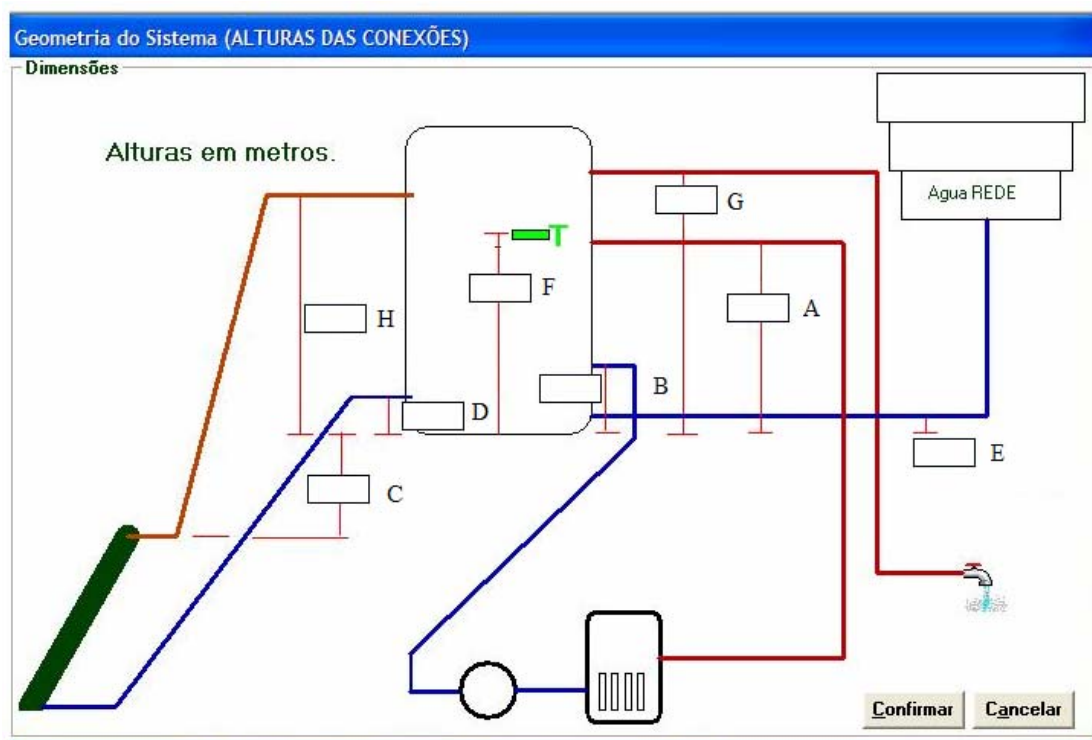


Figura 4.9 – Dados geométricos do sistema

Tabela 4.2 – Parâmetros de simulação para inverno e verão

Parâmetros de simulação			
	Volume do Tanque		0,4 m ³
	Diâmetro do Tanque		0,7 m
	Altura do Tanque		1,05 m
	Razão de aspecto (L/D)		1,5
A	Altura de saída da água do tanque p/ o aquecedor	10 % da altura do tanque	0,11 m
B	Altura da conexão de retorno da água do aquecedor p/ o tanque	80 % da altura do tanque	0,84 m
C	Desnível entre coletor e tanque		1m
D	Altura entre a saída da água do tanque para o coletor		0 m
E	Altura que a água da rede entra no reservatório		0 m
	Qualidade do coletor	$F_R(\tau\alpha) = 0,7$	$F_R U_L = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$
	Temperatura de ajuste do termostato		40 °C
F	Altura do termostato	50 % da altura do tanque	0,525 m
	Consumo de água quente	50 % do volume do tanque	0,2 m ³
G	Altura da saída da água quente do tanque p/ o consumo	80 % da altura do tanque	0,84 m
H	Altura entre saída do coletor e a base do tanque	67 % da altura do tanque	0,71 m
	Número de coletores		8 (4,8 m ²)

Tabela 4.3 – Valores obtidos com a simulação para o inverno e verão

Período	Energia térmica solar	Energia térmica do gás	Energia térmica perdida	Energia solar utilizada	Temperatura mínima da água no tanque
	MJ	MJ	MJ	%	°C
Inverno	2017,90	1974,80	1372,20	51	44,2
Verão	2283,30	468,30	1045,40	83	44,9

Além das tabelas foram elaborados gráficos para apresentar os resultados mensais obtidos com as simulações desenvolvidas no período de inverno e verão, conforme Figura 4.10 e Figura 4.11.

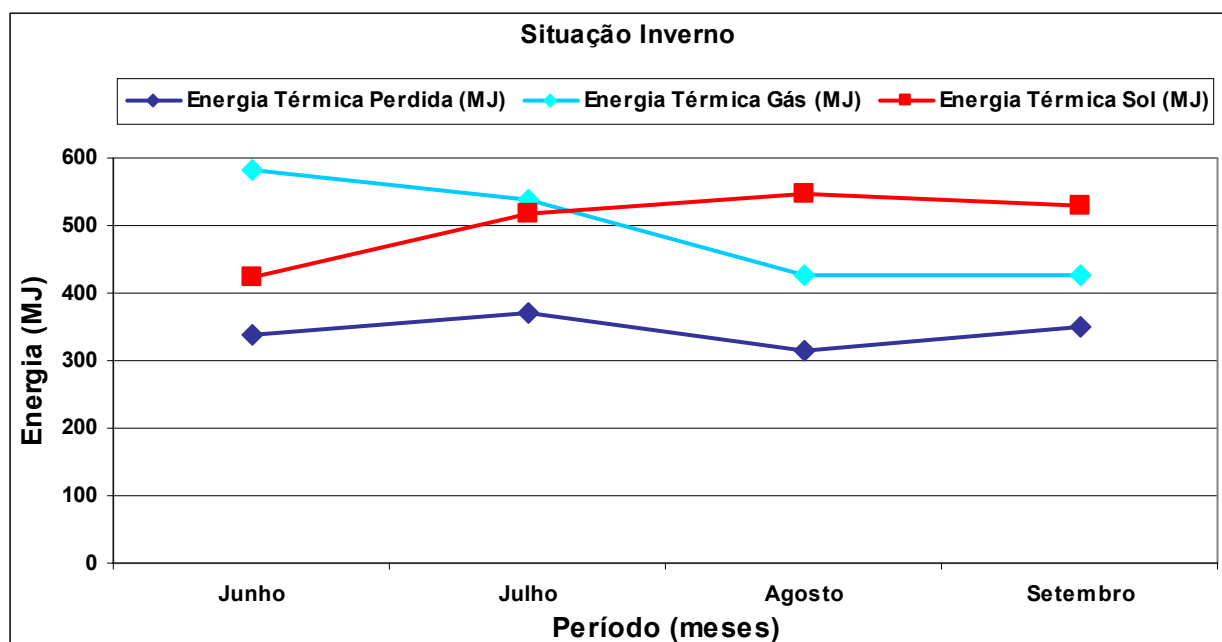


Figura 4.10 – Gráfico da energia térmica convertida a partir da radiação solar, energia térmica obtida do gás e perdas térmicas

Através das simulações realizadas para as duas estações climáticas pode ser observado que para o período de inverno, comparando-se com o de verão, a energia fornecida pelo gás para complementar a energia solar a fim de manter a água contida no reservatório nas condições pré-estabelecidas foi aproximadamente superior a 3 vezes ao da energia solar, conforme mostrado na Figura 4.10 e Figura 4.11, visto que neste período, conforme pode ser verificado na Figura 4.7 e Figura 4.8, a disponibilidade de energia solar no inverno é inferior a do verão.

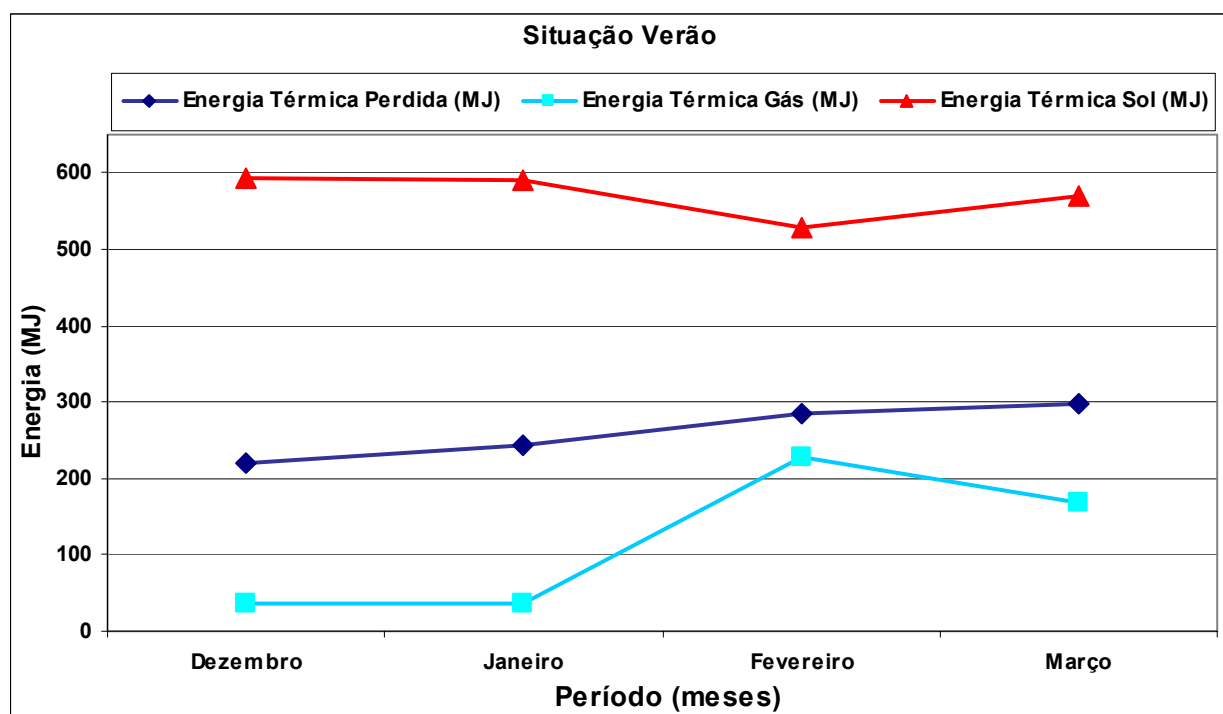


Figura 4.11 – Gráfico da energia térmica convertida a partir da radiação solar, energia térmica obtida do gás e perdas térmicas

4.4. Influência do Número de Coletores

O número de coletores apresenta uma grande importância no desempenho dos sistemas de aquecimento de água por energia solar. Shariah e Löf, 1997, entendem que os sistemas são projetados para suprir entre 50 a 80 % da energia necessária para o aquecimento da água ou mais, dependendo das condições climáticas e das condições de operação.

Para verificar a influência que o número de coletores exerce na eficiência do sistema foram realizadas simulações conforme descrito no Capítulo 3, definindo-se os parâmetros da simulação de acordo com os dados constantes na Tabela 4.4, sendo considerados todos fixos, com exceção do número de coletores, que variou na quantidade.

Como opção modular para realizar as simulações foram escolhidos coletores com área individual de $0,6 \text{ m}^2$. Os parâmetros $F_R(\tau\alpha)$ e $F_R U_L$ representam o efeito das características óticas e térmicas dos coletores solares conforme Duffie e Beckman, 1991.

Tabela 4.4 – Parâmetros de simulação

Parâmetros de simulação			
	Volume do Tanque		0,4 m ³
	Diâmetro do Tanque		0,7 m
	Altura do Tanque		1,05 m
	Razão de aspecto (L/D)		1,5
A	Altura de saída da água do tanque p/ o aquecedor	10 % da altura do tanque	0,11 m
B	Altura da conexão de retorno da água do aquecedor p/ o tanque	80 % da altura do tanque	0,84 m
C	Desnível entre coletor e tanque		1 m
D	Altura entre a saída da água do tanque para o coletor		0 m
E	Altura que a água da rede entra no reservatório		0 m
	Qualidade do coletor	$F_R(\tau\alpha) = 0,7$	$F_R U_L = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$
	Temperatura de ajuste do termostato		40 °C
F	Altura do termostato	50 % da altura do tanque	0,53 m
	Consumo de água quente	50 % do volume do tanque	0,2 m ³
G	Altura da saída da água quente do tanque p/ o consumo	80 % da altura do tanque	0,84 m
H	Altura entre saída do coletor e a base do tanque	67 % da altura do tanque	0,71 m
	Número de coletores		1, 2, 4, 8, 10,12,14

4.4.1. Resultados

Os resultados a seguir apresentados foram obtidos através de simulações e serão ilustrados através de gráficos cuja origem dos dados encontram-se na tabela localizada no Apêndice I e na Tabela 4.5, que apresenta um resumo anual para as condições simuladas. Nesta tabela, a quinta coluna representa a energia térmica (solar + gás) agregada ao sistema e que foi perdida para o ambiente. A sexta coluna mostra o ganho percentual de energia solar do sistema através da adição de mais coletores, representada pela divisão entre o valor constante na coluna referente à energia térmica solar para um determinado número de coletores e pelo valor da energia térmica solar da situação antecessora.

O gráfico mostrado na Figura 4.12 apresenta o desempenho energético do sistema utilizando apenas um coletor solar (0,6 m²). Neste caso, quase toda a energia requerida para o aquecimento da água foi suprida pela fonte de energia auxiliar.

Tabela 4.5 – Resumo anual das simulações utilizando diferentes números de coletores solares

Nº coletores (área)	Volume do reservatório / área de coletor	Energia térmica solar	Energia térmica gás	Energia perdida	Ganho energia solar	Fração solar / Energia total
	l/m^2	MJ	MJ	MJ	%	%
1 (0,6 m ²)	667	1245,3	9901,4	4630,3	-	11,2
2 (1,2 m ²)	333	2281,3	8468,7	4233,4	45,4	21,2
4 (2,4 m ²)	166	4037	6286,3	3806,7	43,5	39,1
8 (4,8 m ²)	84	6618,7	3569,7	3671,8	39,0	65,0
10 (6 m ²)	68	7401,9	2903,8	3789,3	10,6	71,8
12 (7,2 m ²)	56	7994,3	2498,6	3976,8	7,4	76,2
14 (8,4 m ²)	48	8442,5	2260,9	4186,8	5,3	78,9

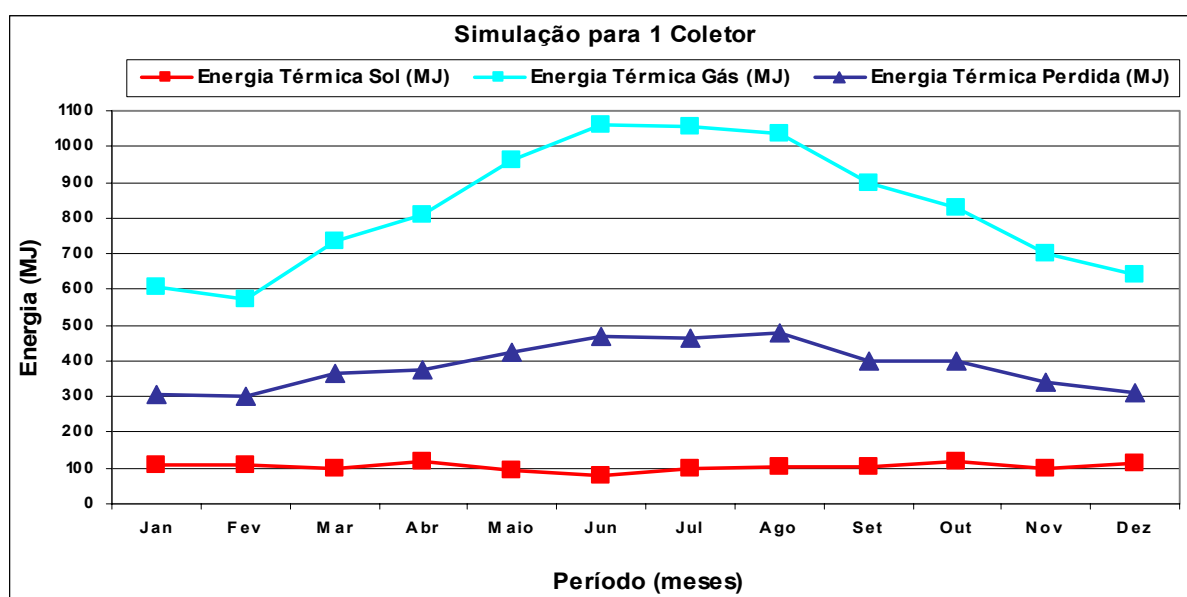


Figura 4.12 – Evolução da conversão de energia utilizando 1 coletor

Com o sistema operando com 4 coletores solares (2,4 m²), conforme a Figura 4.13, a energia necessária para manter a água contida no reservatório nas condições pré-estabelecidas foi ainda fornecida em grande parte pela fonte de energia auxiliar, mas apresentando uma maior participação da energia solar, conforme pode ser observado na Tabela 4.5.

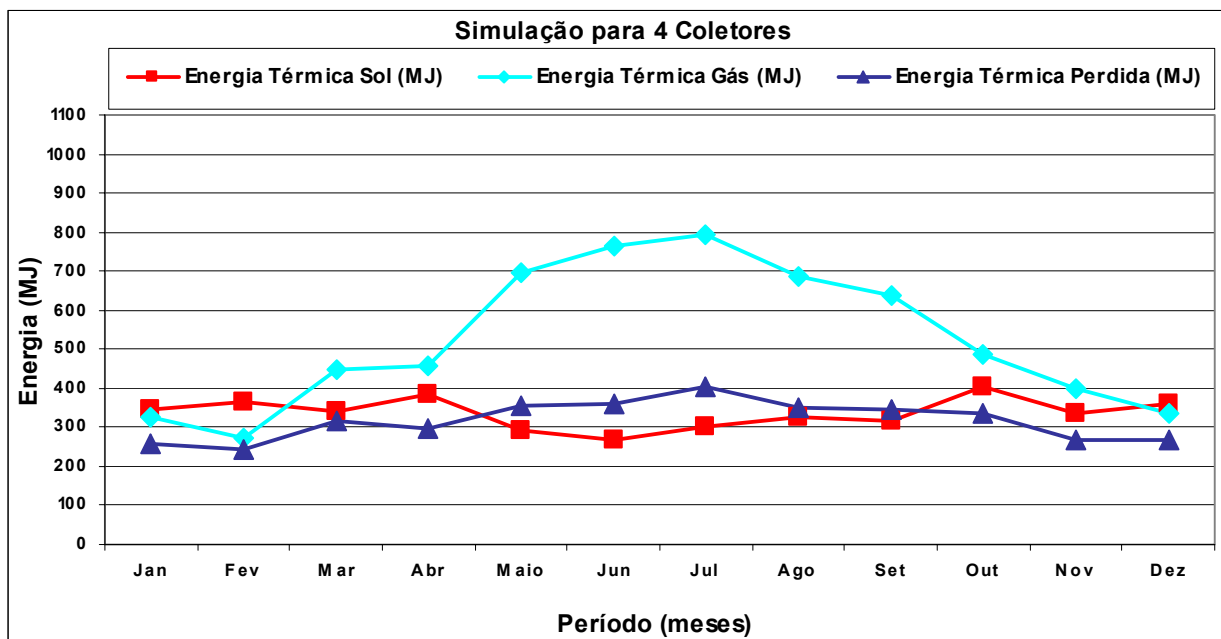


Figura 4.13 – Evolução da conversão de energia utilizando 4 coletores

A energia térmica obtida do sistema solar com 8 coletores ($4,8 \text{ m}^2$), de acordo com o gráfico da Figura 4.14, supera a energia térmica obtida do gás, exceto nos meses de maio, junho e julho, onde o valor da radiação solar disponível é menor, conforme mencionado anteriormente (Figura 4.3). Neste caso, a energia solar representou a maior parcela da energia total necessária ao sistema, segundo a Tabela 4.5.

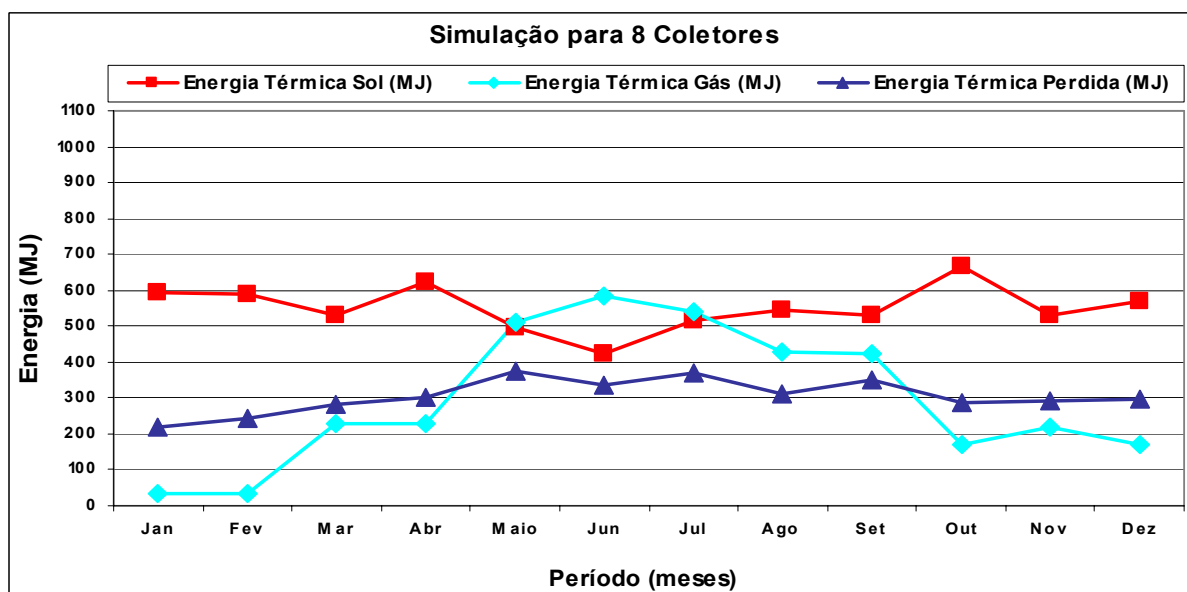


Figura 4.14 – Evolução da conversão de energia utilizando 8 coletores

Na Figura 4.15 onde o sistema possuía 12 coletores ($7,2 \text{ m}^2$), o aumento da área de coleta fez com que a quantidade de energia solar fornecida ao sistema superasse a energia do gás em todo o período.

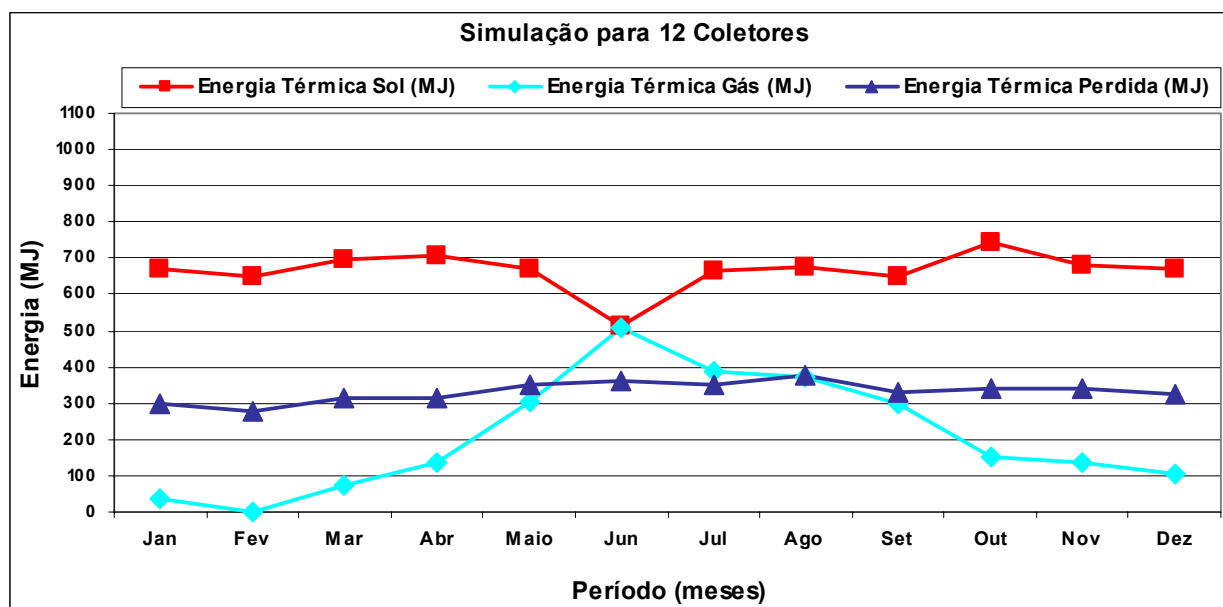


Figura 4.15 – Evolução da conversão de energia utilizando 12 coletores

4.4.2. Análise dos Resultados

Através das simulações realizadas para diversas relações de volume de reservatório e área de coletores, conforme valores constantes na Tabela 4.5, foram possíveis fazer algumas considerações.

A análise da Figura 4.16, que apresenta as curvas relativas à eficiência térmica do sistema solar ao longo do ano, correspondendo à relação entre a quantidade de radiação solar convertida em energia térmica e a radiação solar disponível, permite observar que a instalação que possuía 1 coletor solar ($0,6 \text{ m}^2$) instalado, isto é, a maior relação entre o volume de reservatório e a área de coletores, foi a que apresentou a maior eficiência térmica e em contrapartida, a instalação com a menor relação entre o volume de reservatório e a área de coletores proporcionou a menor eficiência térmica.

De acordo com Duffie e Beckman, 1991, a eficiência dos coletores e por sua vez a do sistema como um todo é afetada pelo valor da temperatura de entrada do fluido no coletor,

sendo que quanto maior o seu valor, menor será a sua eficiência térmica. Isto foi comprovado nas duas situações expostas anteriormente, onde a primeira tinha uma área de coleta de energia solar muito pequena, que por sua vez não conseguiu elevar a temperatura da água do reservatório. Na segunda situação, em razão de possuir uma área de coleta elevada, conseguiu aumentar a temperatura da água do tanque, fazendo com que a água acabasse circulando no coletor com temperatura mais alta.

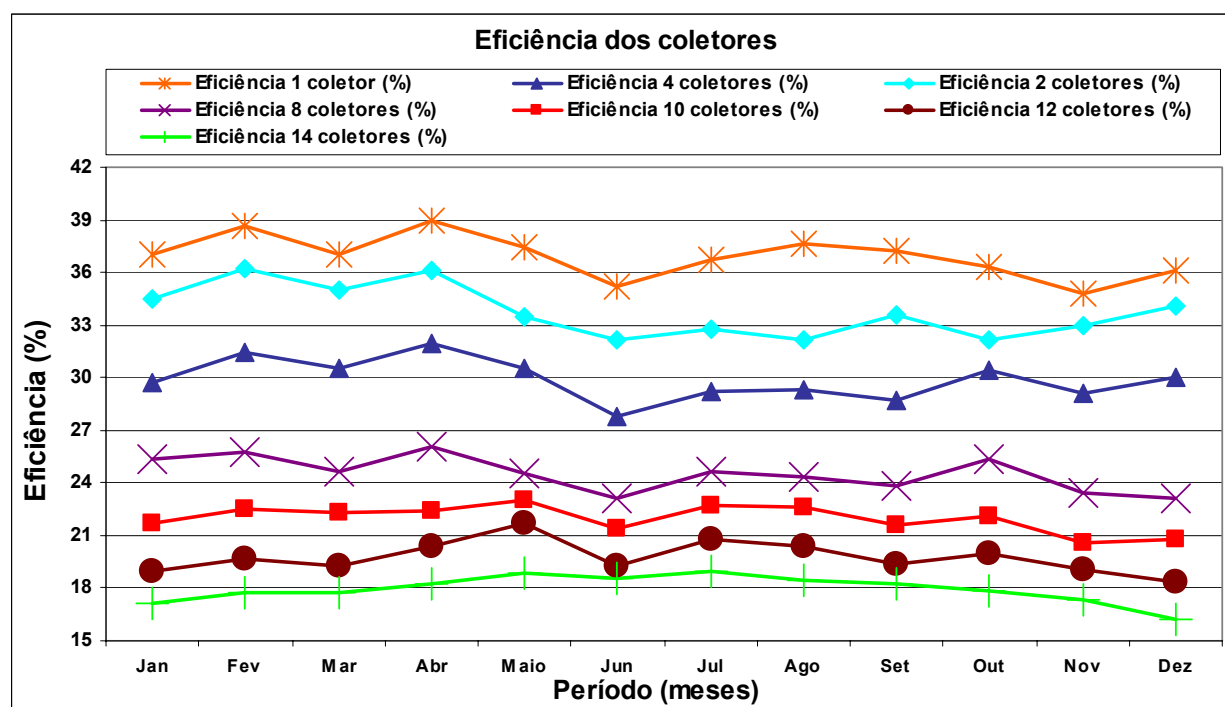


Figura 4.16 – Gráfico da eficiência do sistema

A Figura 4.16 apresenta o gráfico relativo a dependência da energia térmica solar, da energia obtida da combustão do gás e a energia térmica desperdiçada ao ambiente com o número de coletores no sistema. Pode ser observado nesta figura que a variação da energia térmica convertida a partir da radiação solar e a energia térmica obtida do gás demonstraram comportamentos opostos. A primeira apresentou uma elevada taxa de crescimento até o número de 8 coletores ($4,8 \text{ m}^2$), devido ao fato da relação entre o volume do reservatório e a área de coletores começar a atingir valores próximos ao intervalo de 50 a 100 l/m^2 , definidos por Shariah e Löff, 1997; Duffie e Beckmann, 1991 como os valores em que os sistemas de aquecimento solar apresentam a melhor eficiência térmica. A partir deste momento, o crescimento da energia térmica solar não foi tão expressivo devido ao fato do sistema de

aquecimento solar estar dimensionado nas melhores condições de eficiência térmica, ocasionando a redução do consumo de energia térmica do gás.

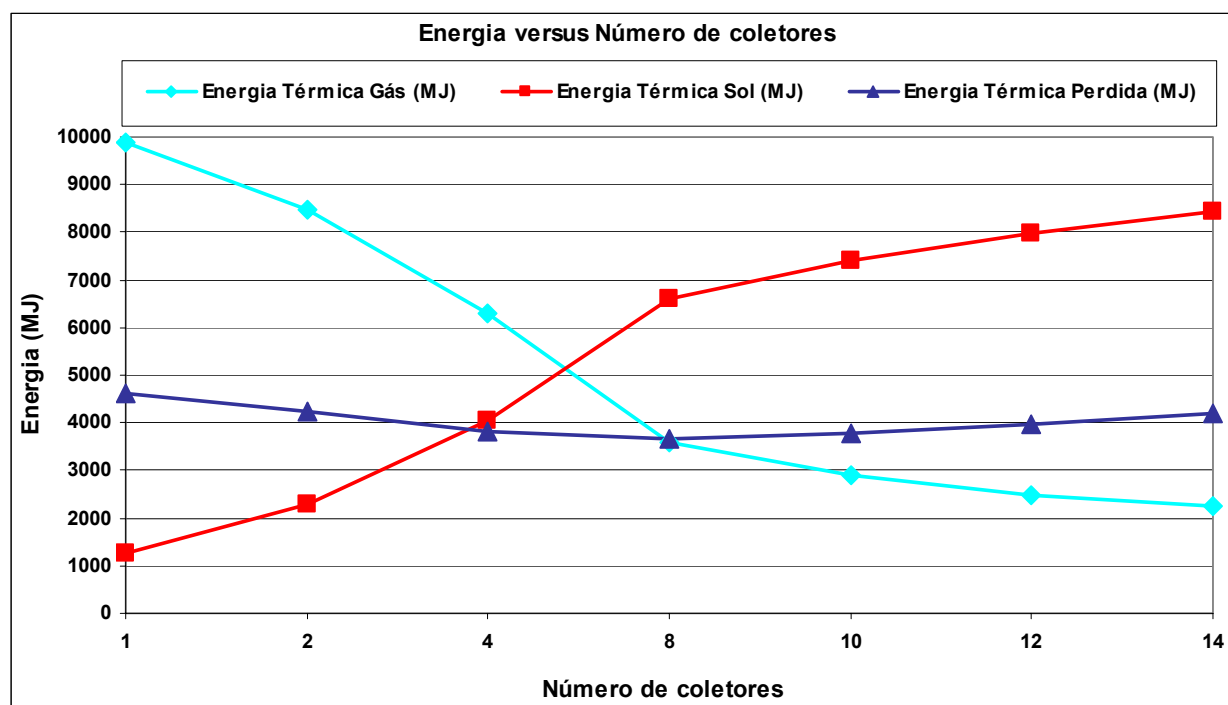


Figura 4.17 – Gráfico da energia versus o número de coletores

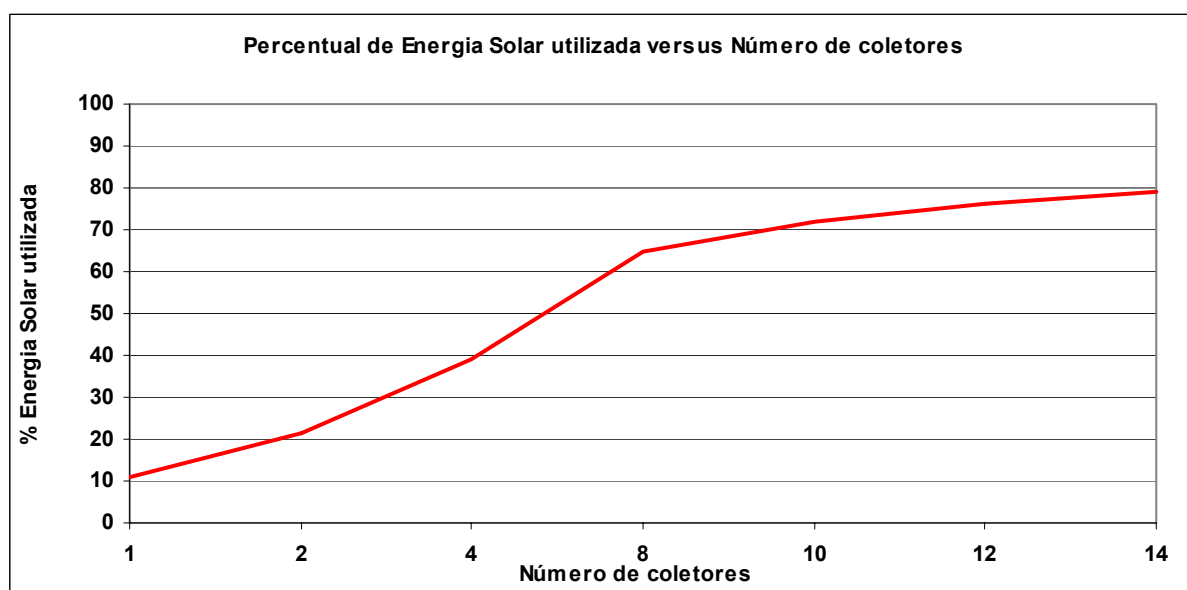


Figura 4.18 – Gráfico do percentual de energia versus o número de coletores

A Figura 4.18 apresenta a evolução da fração solar utilizada no sistema em decorrência do aumento do número de coletores solares instalados, sendo possível verificar que o seu comportamento foi similar ao da energia térmica solar conforme Figura 4.16.

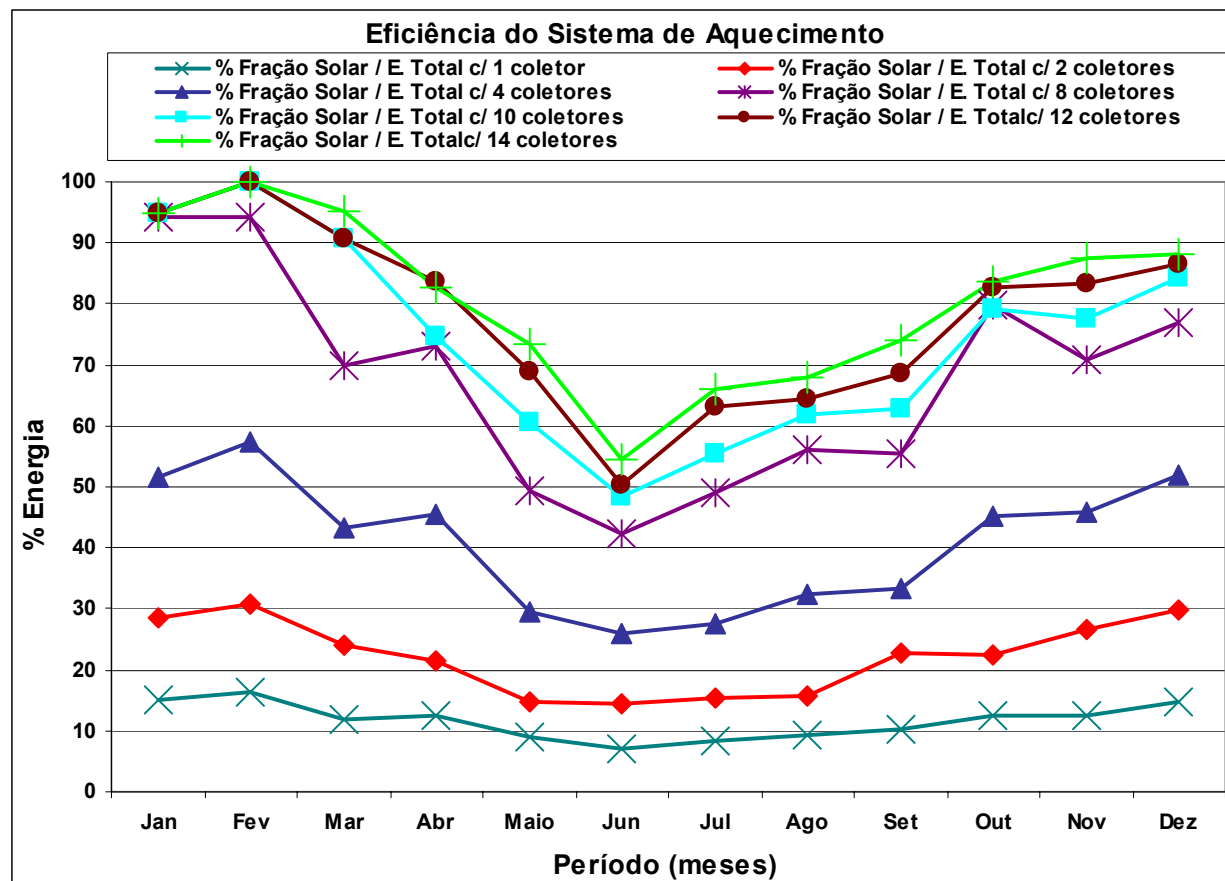


Figura 4.19 – Gráfico da fração solar média mensal do sistema de aquecimento

A Figura 4.18 mostra a fração solar média mensal do sistema de aquecimento para diferentes áreas de coletores. Em cada época do ano a fração solar tende a um valor máximo, isto é, mesmo que o número de coletores seja muito maior do que o recomendável, em determinados meses de inverno haverá tal número de dias nublados que será improdutivo aumentar a área de coletores solares. Isto pode ser percebido na aglomeração das curvas para 10, 12 e 14 coletores.

4.5. Influência do Volume do Reservatório

Conforme mencionado no início do capítulo, o volume do reservatório também exerce influência no desempenho energético do sistema de aquecimento de água.

O sistema de aquecimento opera de forma eficiente quando conseguir captar o máximo de energia solar e utilizar exatamente o necessário da energia auxiliar a fim de manter a água nas condições pré-estabelecidas.

Neste tópico, será analisada a influência que os diferentes volumes de reservatórios associados com um número variado de coletores produzem na eficiência do sistema de aquecimento e também nos valores da energia térmica solar e da energia térmica do gás, através da realização de simulações com os dados constantes na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Parâmetros de simulação

Parâmetros de simulação			
	Volume do Tanque		0,1 / 0,2 / 0,4 / 0,6 / 0,8 / 1 / 1,2 m ³
	Diâmetro do Tanque		Variável
	Altura do Tanque		Variável
	Razão de aspecto (L/D)		1,5
A	Altura de saída da água do tanque p/ o aquecedor	10 % da altura do tanque	Variável
B	Altura da conexão de retorno da água do aquecedor p/ o tanque	80 % da altura do tanque	Variável
C	Desnível entre coletor e tanque		1 m
D	Altura entre a saída da água do tanque para o coletor		0 m
E	Altura que a água da rede entra no reservatório		0 m
	Qualidade do coletor	$F_R(\tau\alpha) = 0,7$	$F_R U_L = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$
	Temperatura de ajuste do termostato		40 °C
F	Altura do termostato	50 % da altura do tanque	Variável
	Consumo de água quente	50 % do volume do tanque	Variável
G	Altura da saída da água quente do tanque p/ o consumo	80 % da altura do tanque	Variável
H	Altura entre saída do coletor e a base do tanque	67 % da altura do tanque	Variável
	Número de coletores		1, 2, 4, 6, 8, 10

4.5.1. Resultados

Os resultados obtidos com as simulações foram organizados em gráficos e tabelas.

A Tabela 4.7 foi elaborada com a finalidade de apresentar um resumo anual das simulações para volume de reservatório e número de coletor variável. Nesta tabela, a sexta coluna representa a relação entre a energia térmica solar de uma instalação com um certo número de coletores e volume de reservatório e a energia térmica solar de outra instalação com o mesmo número de coletores e volume de reservatório térmico igual ao valor imediatamente anterior. A oitava coluna apresenta a relação entre a energia térmica do gás e o somatório da energia térmica solar e do gás para um sistema com mesmo número de coletores.

Na Figura 4.20, Figura 4.21, Figura 4.22 são apresentados gráficos da energia do sistema em função do volume tendo como parâmetro o número de coletores, cuja origem dos dados encontram-se nas tabelas localizadas no APENDICE II. Através destas figuras é possível observar que o aumento do volume do reservatório produz uma elevação tanto nos valores da energia térmica solar (benéfico) como também nos valores da energia térmica do gás (maiores custos). O aumento da energia térmica solar ocorre porque o acréscimo do volume de água no tanque faz com que a água no fundo do mesmo fique mais fria e, conseqüentemente, os coletores tenham maior eficiência. Por sua vez, o aumento da energia do gás ocorre porque o acréscimo de volume de água faz com que também cresça a demanda por energia térmica, sendo o gás o responsável por complementar a energia que não foi fornecida pelo sistema solar.

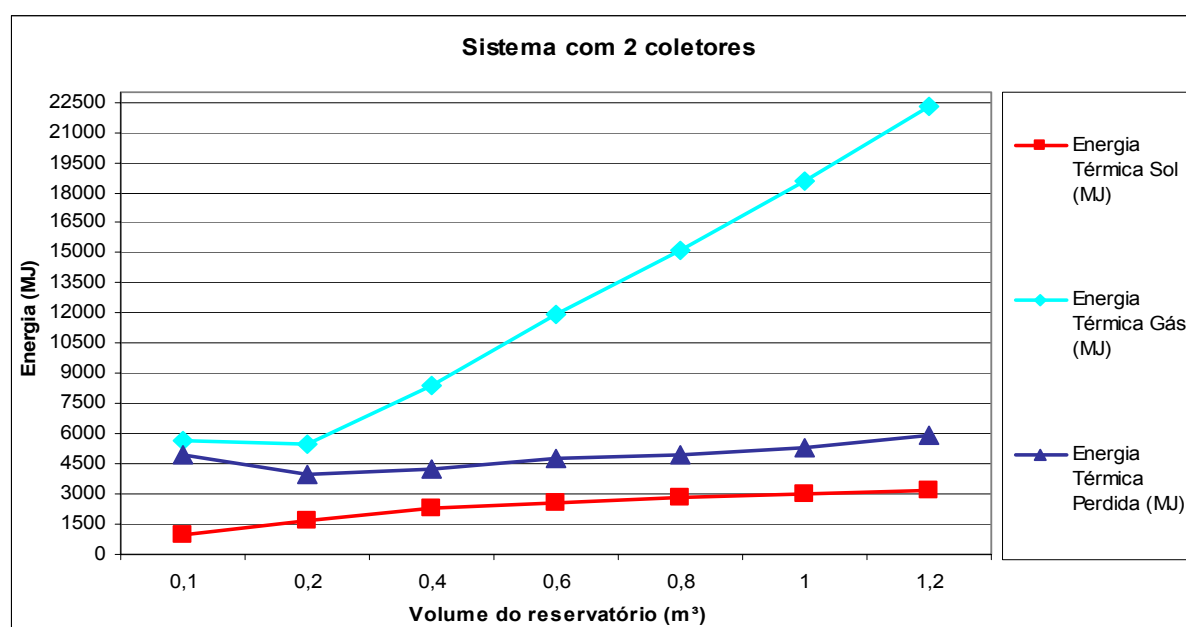


Figura 4.20 – Gráfico de energia em função do volume do reservatório com 2 coletores

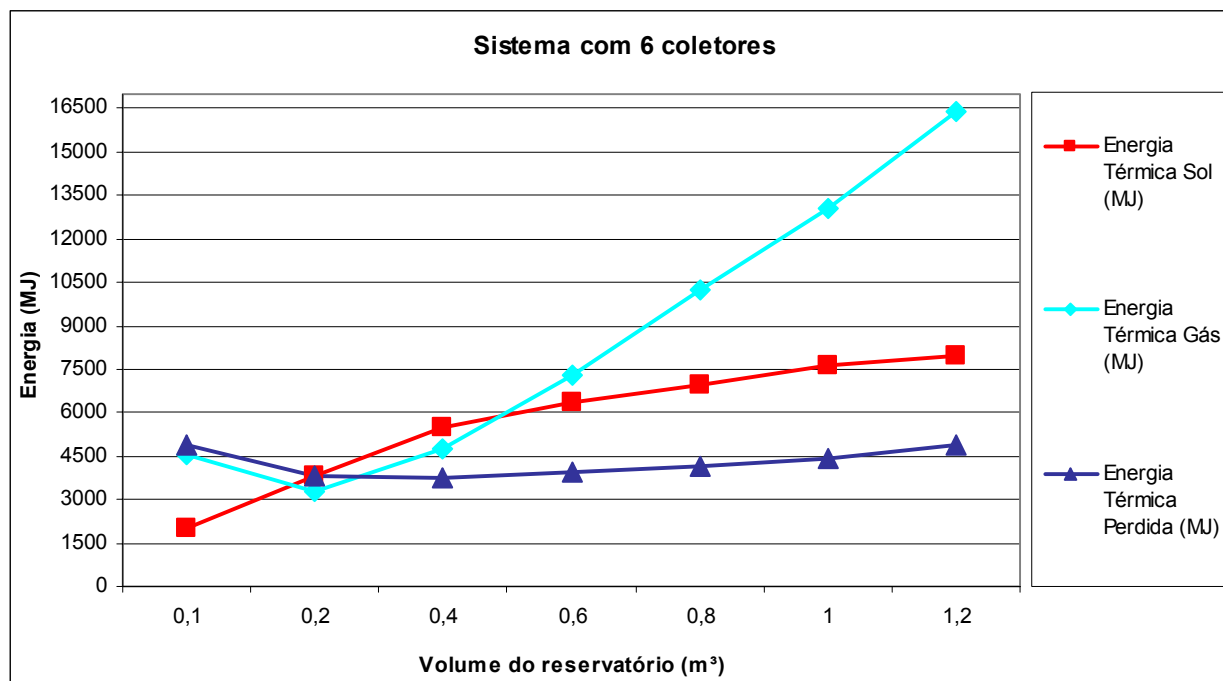


Figura 4.21 – Gráfico de energia em função do volume do reservatório com 6 coletores

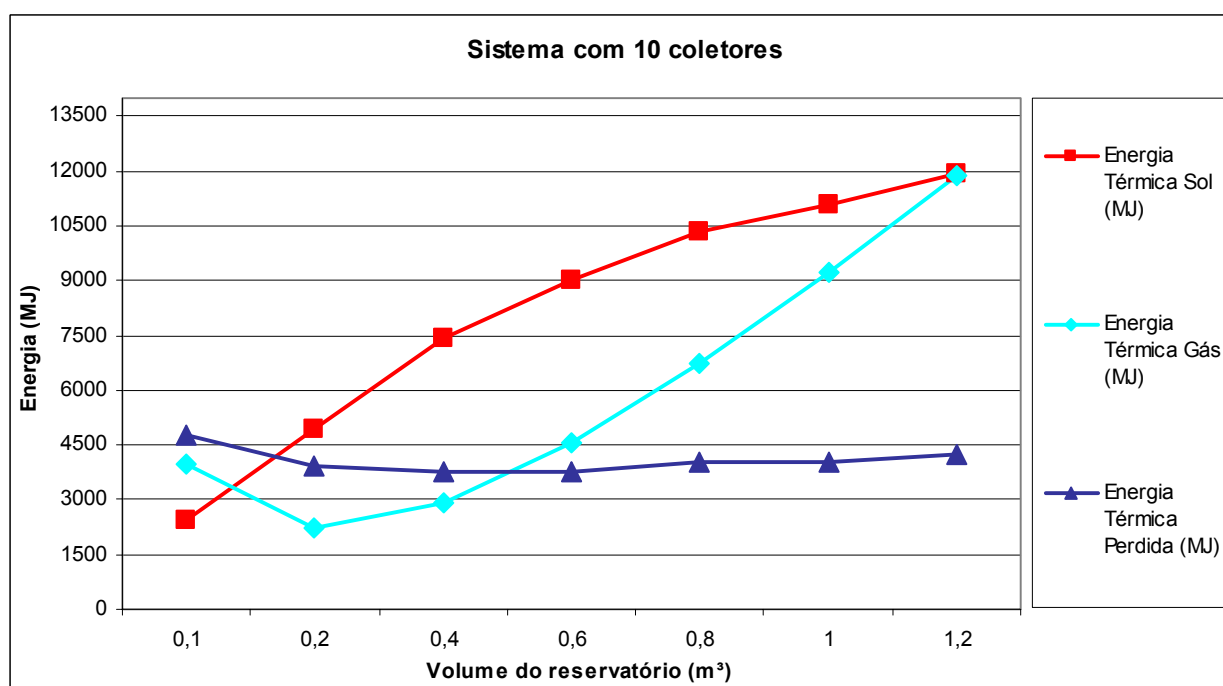


Figura 4.22 – Gráfico de energia em função do volume do reservatório com 10 coletores

Na Figura 4.23 é apresentado o gráfico que mostra a eficiência solar do sistema para diversos volumes de reservatórios, cuja origem dos dados encontram-se nas tabelas localizadas no Apêndice II.

Pode ser observado que o aumento do volume do reservatório produz uma elevação da eficiência solar do sistema, devido ao maior gradiente térmico entre a entrada e saída do coletor. A combinação do aumento do volume do reservatório associada com a diminuição do número de coletores resultará numa maior eficiência solar.

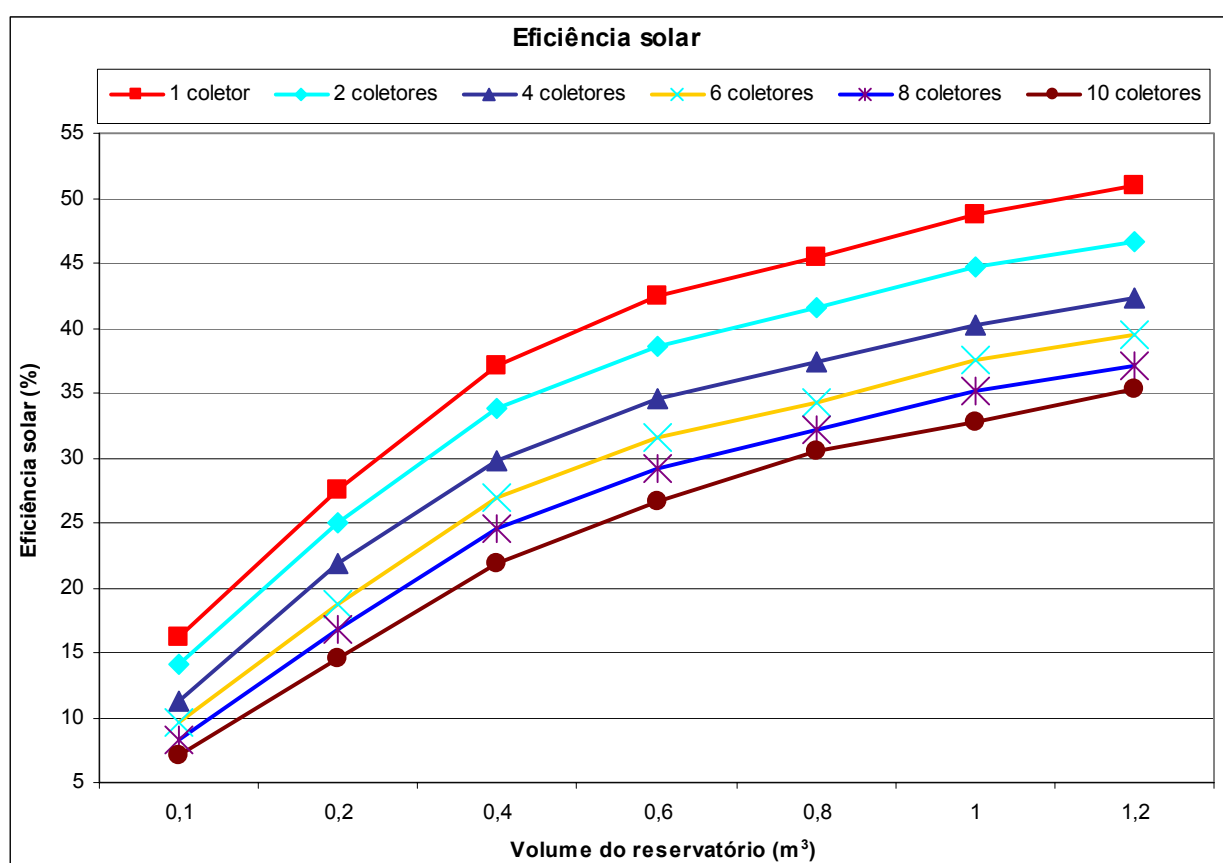


Figura 4.23 – Gráfico da eficiência solar em função do volume do reservatório para diversos coletores

Na Figura 4.24 e Figura 4.25 são apresentados gráficos da energia térmica solar e energia térmica do gás em função do volume do reservatório e do número de coletores instalados. Os dados relativos a estes gráficos encontram-se no Apêndice II.

Analisando o gráfico da Figura 4.24 e Figura 4.25 constata-se que a energia térmica solar cresce de forma mais rápida para instalações com oito e dez coletores em razão destas apresentarem a relação entre do volume do reservatório e área de coletores próxima aos valores

recomendados pela literatura. (50 a 100 l/m²). Em reservatórios com volumes maiores ocorre uma melhor estratificação das camadas internas, gerando um maior gradiente de temperatura, que por sua vez provocará um aumento na vazão mássica dos coletores, ocasionando maior eficiência. Além disso, a utilização de um número maior de coletores só é justificada com o aumento do volume do reservatório, pois a partir de um determinado momento a necessidade de energia térmica do gás aumenta mesmo quando a energia térmica solar continua em elevação.

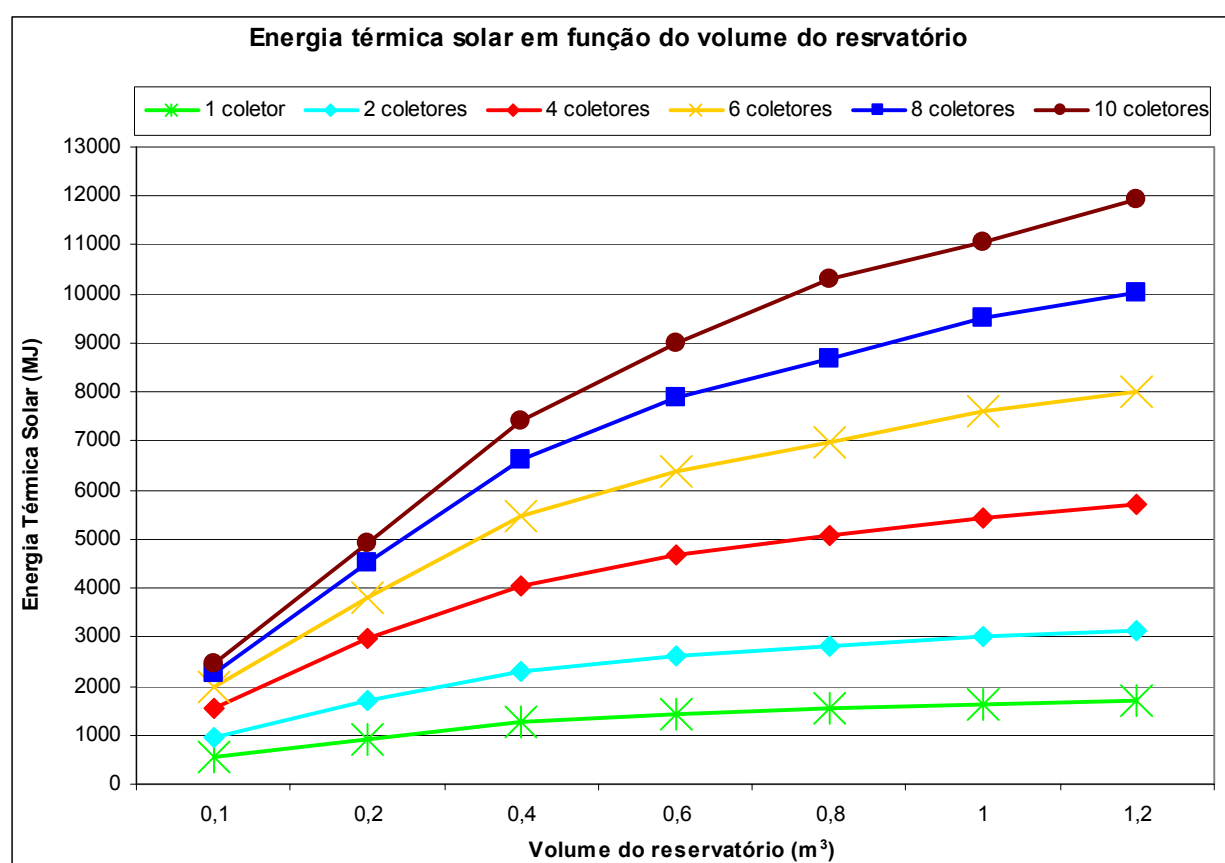


Figura 4.24 – Gráfico da energia térmica solar em função do volume do reservatório

4.5.2. Análise dos Resultados

De acordo com as simulações realizadas neste item, cujos resultados resumidos estão apresentados na Tabela 4.7, verifica-se que o aumento da capacidade volumétrica de armazenamento acarreta a elevação do percentual de participação da energia térmica solar no sistema, em razão dos coletores solares trabalharem a temperaturas mais baixas, configurando-se um efeito positivo na eficiência do sistema de aquecimento, como também constata-se um

efeito negativo: o aumento da energia térmica do gás.

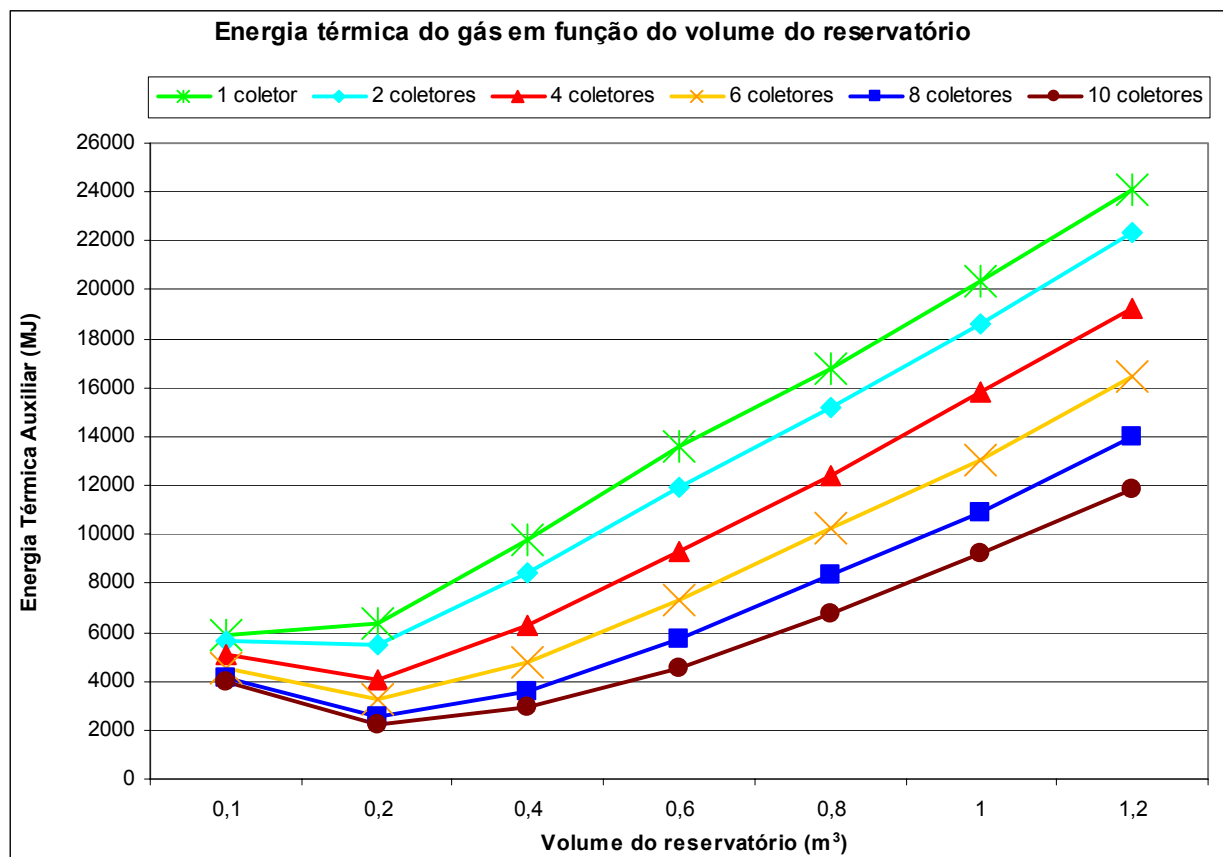


Figura 4.25 – Gráfico da energia térmica gás em função do volume do reservatório

Para poder melhor comparar os dados foram calculadas as relações entre "Energia térmica do gás" e "Energia térmica consumida", cujos resultados encontram-se na coluna 9. Esta razão representa de certa forma um índice de consumo efetivo do gás. Quanto menor o índice, menos gás foi consumido para suprir aquele consumo, às custas, provavelmente, de uma maior participação solar. Observando os resultados apresentados nesta coluna, verifica-se que os maiores reservatórios correspondem a um melhor emprego do gás consumido. Evidentemente, uma maior área de coletores também representa menor consumo de gás.

Os resultados das simulações podem ajudar a escolher o tamanho mais adequado do reservatório. Furbo et al, 2005, demonstraram que o uso dos sistemas de aquecimento com o volume do reservatório, ajustado ao consumo de água quente, consiste numa vantagem para obter um maior desempenho térmico da instalação.

Tabela 4.7 – Resumo anual das simulações para volume e número de coletores variável

Nº Coletores	Área do coletor (m ²)	Volume tanque (m ³)	Volume do reservatório / área de coletor (l/m ²)	Energia térmica sol (MJ)	Ganho energia térmica solar (%)	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica gás/ Energia total	Energia térmica do gás / Energia térmica consumida (MJ/m ³)	Eficiência solar (%)
1	0,6	0,1	167	548,3	-	5903,9	91,5	323,5	16,2
		0,2	333	941,9	71,8	6299	87,0	172,5	27,9
		0,4	667	1245,3	32,2	9901,4	88,8	135,6	36,9
		0,6	1000	1431,6	14,9	13597,8	90,5	124,2	42,5
		0,8	1333	1538	23,5	16704,2	91,6	114,4	45,7
		1	1666	1583,4	3,0	16706,5	91,3	91,5	47
		1,2	2000	1716,8	8,4	24053,7	93,3	109,8	51
2	1,2	0,1	83,3	959,3	-	5623	85,4	308,1	14,1
		0,2	167	1694,2	76,6	5481,1	76,4	150,1	25,1
		0,4	333	2281,3	34,7	8468,7	78,8	116,0	33,8
		0,6	500	2605,4	14,2	11904	82,0	108,7	38,6
		0,8	666	2815	23,4	15131,7	84,3	103,6	41,8
		1	833	2910,2	3,4	15078,8	83,8	82,6	43,2
		1,2	1000	3145,2	8,1	22314,2	87,6	101,9	46,7
4	2,4	0,1	42	1539,6	-	5083,8	76,8	278,5	11,3
		0,2	83	2979,4	93,5	3987,3	57,2	109,2	21,9
		0,4	166	4037	35,5	6286,3	60,9	86,1	29,8
		0,6	250	4672,3	15,7	9270,9	66,5	84,7	34,6
		0,8	333	5028	24,5	12554,8	71,4	85,9	37,3
		1	417	5280,6	5,0	12197,5	69,8	66,8	39,1
		1,2	500	5707,4	8,1	19218	77,1	87,7	42,3
6	3,6	0,1	27	1978,8	-	4536,6	69,6	248,6	9,7
		0,2	55,5	3800,4	92,1	3263,3	46,2	89,4	18,7
		0,4	111,1	5469,1	43,9	4767	46,6	65,3	26,9
		0,6	166,7	6380,1	16,7	7311,6	53,4	109,5	31,5
		0,8	222,2	6956,7	9,0	10245,7	59,5	70,2	34,3
		1	277,7	7607,3	9,3	13071,2	63,2	71,6	37,6
		1,2	333,3	7989,3	5,0	16420,6	67,3	75,0	39,5
8	4,8	0,1	21	2268,9	-	4126,6	64,5	226,1	8,3
		0,2	42	4534	99,8	2529,3	35,8	69,2	16,8
		0,4	84	6618,7	46,0	3569,7	35,0	48,9	24,5
		0,6	125	7881	19,1	5719	42,0	52,2	29,2
		0,8	167	8711	10,5	8245,8	48,6	56,4	32,3
		1	208	9234,3	6,0	7752	45,6	42,4	34,2
		1,2	250	10019,2	8,5	14033,1	93,3	64,1	37,1
10	6,0	0,1	17	2447,1	-	3936,8	61,7	215,7	7,2
		0,2	34	4932,8	101,6	2240,5	31,2	61,3	14,6
		0,4	68	7399,1	50,0	2903,8	28,2	39,7	21,9
		0,6	100	8991,5	21,5	4536,9	33,5	41,4	26,6
		0,8	134	10316,9	14,7	6724	39,5	46,0	30,5
		1	167	10724,2	3,9	6053,3	36,1	33,1	31,8
		1,2	200	11936,1	11,3	11871,1	49,8	54,2	35,3

4.6. Influência da Altura do Termostato

A eficiência dos sistemas de aquecimento de água por energia solar também apresenta o desempenho modificado pela altura em que é instalado o termostato no interior do

reservatório, conforme relatado no início do Capítulo.

Os dados utilizados para realizar as simulações constam na Tabela 4.8. Com a finalidade de verificar a influência exercida em razão da posição do termostato dentro do reservatório, foram utilizados dois parâmetros de altura do termostato, sendo o termostato colocado em uma posição que correspondia a 50% da altura do tanque e também em outra posição correspondente a 75% da altura do reservatório.

Tabela 4.8 – Parâmetros de simulação

Parâmetros de simulação			
	Volume do Tanque		0,1 / 0,2 / 0,4 / 0,8 / 1 m ³
	Diâmetro do Tanque		Variável
	Altura do Tanque		Variável
	Razão de aspecto (L/D)		1,5
A	Altura de saída da água do tanque p/ o aquecedor	10 % da altura do tanque	variável
B	Altura da conexão de retorno da água do aquecedor p/ o tanque	80 % da altura do tanque	variável
C	Desnível entre coletor e tanque		1 m
D	Altura entre a saída da água do tanque para o coletor		0 m
E	Altura que a água da rede entra no reservatório		0 m
	Qualidade do coletor	$F_R(\tau\alpha)$ 0,7	$F_R U_L = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$
	Temperatura de ajuste do termostato		40 °C
F	Altura do termostato	50 e 75 % da altura do tanque	variável
	Consumo de água quente	50 % do volume do tanque	0,05/0,1/0,2/0,4/0,5 m ³
G	Altura da saída da água quente do tanque p/ o consumo	80 % da altura do tanque	variável
H	Altura entre saída do coletor e a base do tanque	67 % da altura do tanque	variável
	Número de coletores		1,2,4,8,10

4.6.1. Resultados

Os resultados são apresentados através de gráficos, cuja origem dos dados encontra-se nas tabelas localizadas no Apêndice III.

Para expressar o comportamento da variação da energia térmica solar, em função da altura do termostato no reservatório, foram elaborados gráficos constantes na Figura 4.26, Figura 4.27 e Figura 4.28.

A colocação do termostato mais próximo do fundo do reservatório faz com que a captação de energia solar pelo coletor seja restringida, devido ao fato de ocasionar no fundo do

tanque uma região com água a uma temperatura mais elevada. Esta situação provoca uma redução na circulação da água pelo efeito termossifão, porque o aumento da temperatura da água de entrada nos coletores reduz a sua eficiência.

Além disso, o aumento do volume do reservatório, com a manutenção da altura do termostato em 50% da altura do reservatório, ocasionou um ganho de energia térmica solar superior a 50%, para instalações com quatro ou mais coletores.

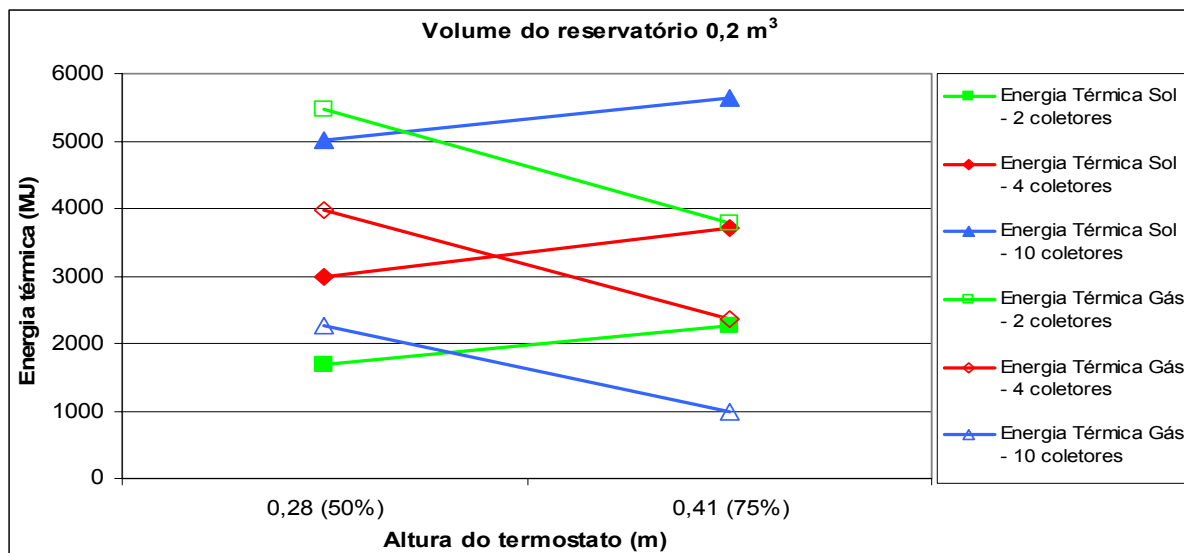


Figura 4.26 – Evolução da conversão de energia térmica solar e gás em função da altura do termostato para volume do reservatório igual a 0,2 m³ e vários coletores

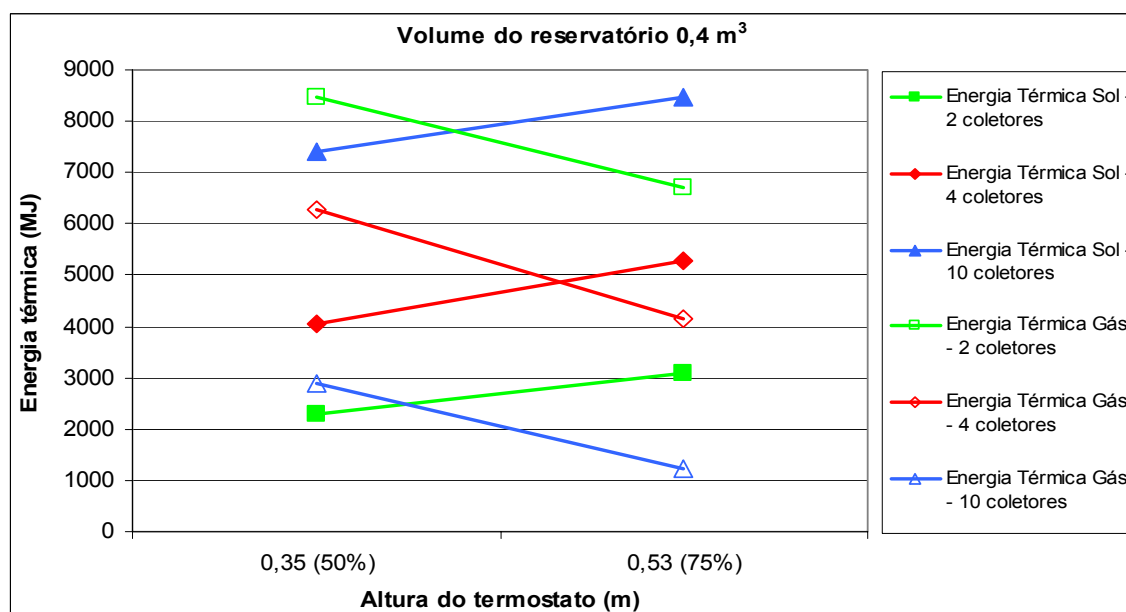


Figura 4.27 – Evolução da conversão de energia térmica solar e gás em função da altura do termostato para volume do reservatório igual a 0,4 m³ e vários coletores

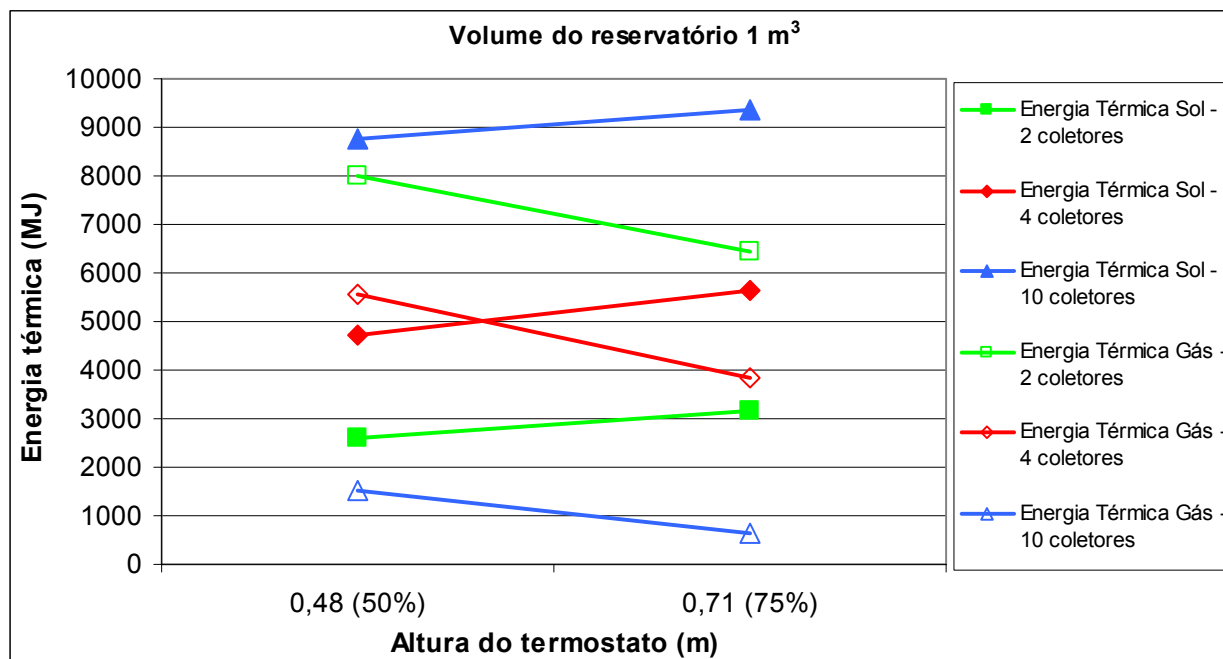


Figura 4.28 – Evolução da conversão de energia térmica solar e gás em função da altura do termostato para volume do reservatório igual a 1 m³ e vários coletores

A localização do termostato no interior do reservatório influencia na utilização da energia térmica do gás, pois quanto mais alto estiver o termostato menor será a necessidade do uso desta energia. Assim, o sistema de aquecimento solar irá trabalhar com uma temperatura menor no fundo do tanque, aumentando a eficiência do sistema. Neste sentido, de acordo com a situação acima descrita não é aconselhável que o termostato seja instalado no topo do reservatório, uma vez que somente a água localizada na parte superior do tanque seria aquecida, sendo este volume insuficiente para atender a demanda de água quente.

O comportamento da eficiência do sistema em função da altura do termostato para vários volumes de reservatórios é apresentado no gráfico da Figura 4.29, Figura 4.30 e Figura 4.31. Essas figuras comprovam o que foi constatado anteriormente a respeito da eficiência do sistema, ou seja, que ela aumenta com a elevação da altura do termostato em relação ao fundo do tanque e também com o aumento do volume do mesmo.

Com a finalidade de auxiliar na análise do efeito da altura do termostato no interior do tanque foi elaborada a Tabela 4.9, Tabela 4.10, Tabela 4.11, Tabela 4.12 e Tabela 4.13, onde a quarta coluna representa a relação entre a energia térmica solar de uma instalação com um certo número de coletores e volume de reservatório e com altura do termostato igual 75% da altura do reservatório e a energia térmica solar de outra instalação com o mesmo número de coletores e volume de reservatório térmico e com altura do termostato igual 50% da altura do

reservatório. A quinta coluna apresenta a relação entre a energia térmica do gás e o somatório da energia térmica solar e do gás para um sistema com mesmo número de coletores.

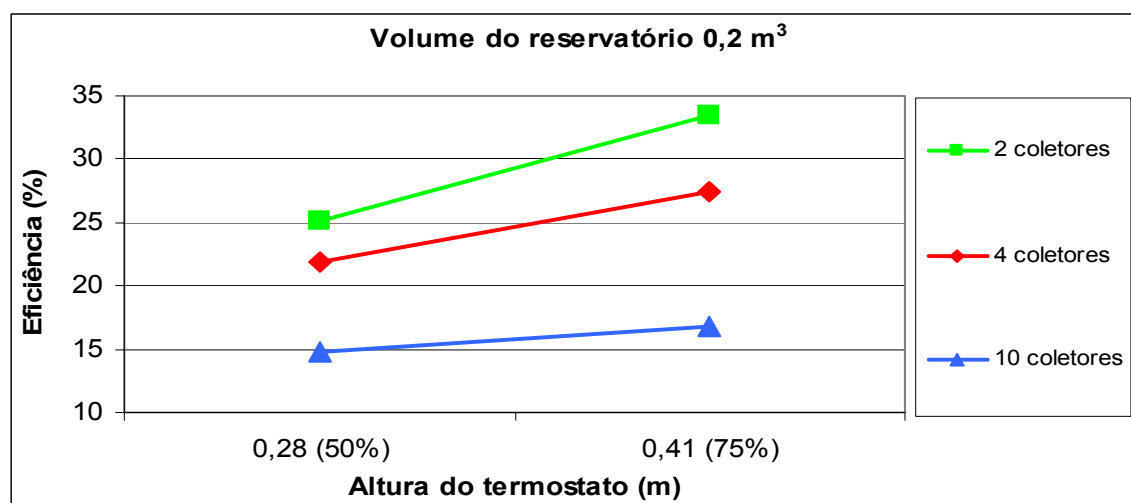


Figura 4.29 – Eficiência do sistema em função da altura do termostato para volume do reservatório igual a 0,2 m³ e vários coletores

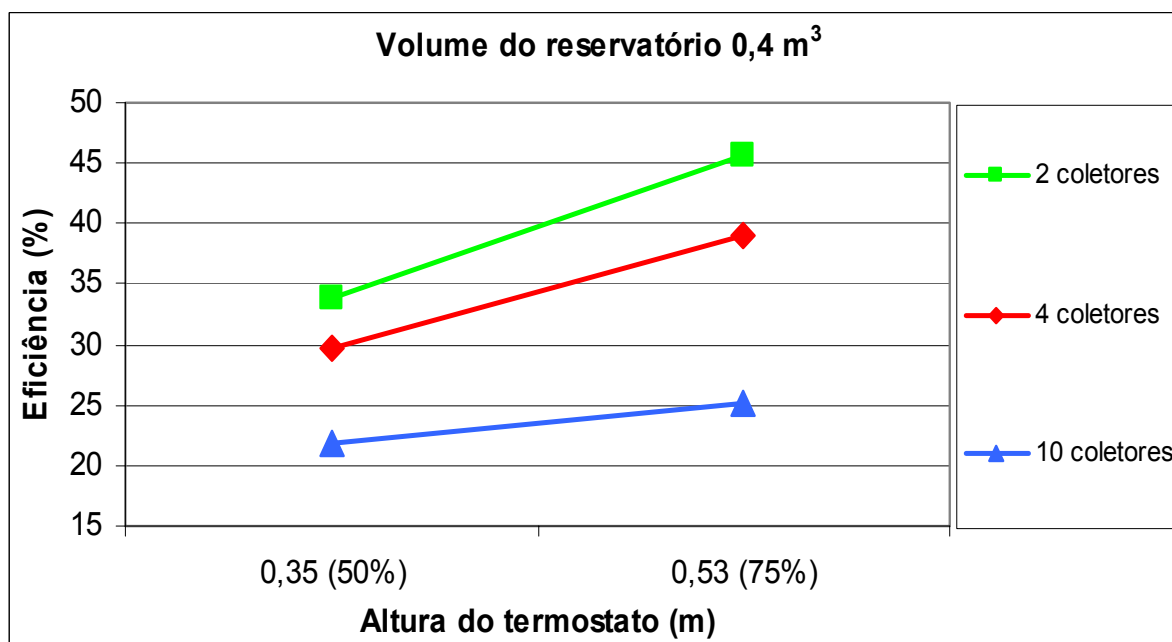


Figura 4.30 – Eficiência do sistema em função da altura do termostato para volume do reservatório igual a 0,4 m³ e vários coletores

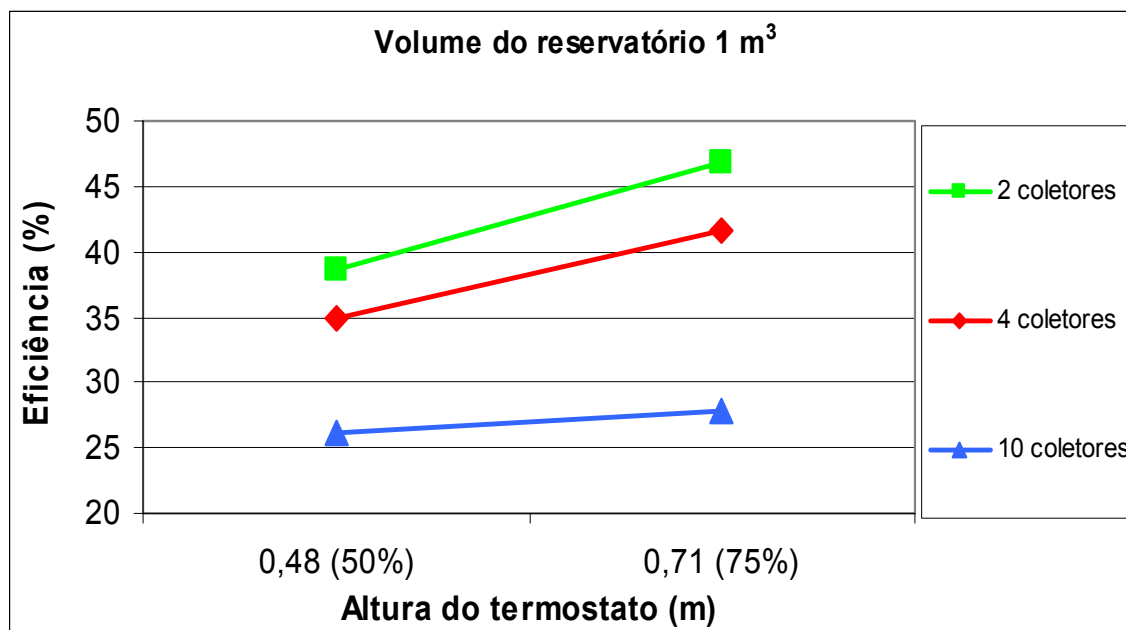


Figura 4.31 – Eficiência do sistema em função da altura do termostato para volume do reservatório igual a 1 m³ e vários coletores

Tabela 4.9 – Simulações para volume do reservatório igual a 0,1 m³

Volume do reservatório 0,1 m ³						
Nº Coletores	Altura termostato (% altura do tanque)	Energia térmica solar (MJ)	Ganho Energia térmica solar (%)	Energia térmica gás/ Energia total (%)	Energia térmica perdida (MJ)	Eficiência solar (%)
1	50	548,3	-	91,5	4823	16,2
	75	993,4	81,2	80,0	3349	29,5
2	50	959,3	-	85,4	4953	14,1
	75	1595,9	66,4	67,9	3342	23,7
4	50	1539,6	-	76,8	4994	11,3
	75	2409,7	56,5	52,3	3426	17,8
8	50	2268,9	-	64,5	4766	8,3
	75	3242,7	42,9	36,3	3462	11,9
10	50	2447,6	-	61,7	4755	7,2
	75	3368,1	37,6	33,9	3468	9,9

Tabela 4.10 – Simulações para volume do reservatório igual a 0,2 m³

Volume do reservatório 0,2 m ³						
Nº Coletores	Altura termostato (% altura do tanque)	Energia térmica solar (MJ)	Ganho Energia térmica solar (%)	Energia térmica gás/ Energia total (%)	Energia térmica perdida (MJ)	Eficiência solar (%)
1	50	941,9	-	87,0	3982,5	27,9
	75	1319,1	40,0	79,2	3086,2	39,1
2	50	1694,2	-	76,4	3917	25,1
	75	2266,1	33,8	62,5	2782,7	33,5
4	50	2979,4	-	57,2	3708,6	21,9
	75	3715,7	24,7	38,8	2809,3	27,5
8	50	4534	-	35,8	3804,9	16,8
	75	5215,6	15,0	19,1	3185,4	19,3
10	50	5009,1	-	31,0	4004,2	14,8
	75	5629,9	12,4	15,0	3364,1	16,8

Tabela 4.11 – Simulações para volume do reservatório igual a 0,4 m³

Volume do reservatório 0,4 m ³						
Nº Coletores	Altura termostato (% altura do tanque)	Energia térmica solar (MJ)	Ganho Energia térmica solar (%)	Energia térmica gás/ Energia total (%)	Energia térmica perdida (MJ)	Eficiência solar (%)
1	50	1245,3		88,8	4630,3	36,9
	75	1743,7	40,0	83,0	3728,6	51,8
2	50	2281,3		78,8	4233,4	33,8
	75	3078,3	34,9	68,6	3273,3	45,7
4	50	4037		60,9	3806,7	29,8
	75	5264,2	30,4	44,1	2897,1	39
8	50	6618,7		35,0	3671,8	24,5
	75	7738,4	16,9	18,9	3019,4	28,8
10	50	7396,2		28,2	3783,5	21,9
	75	8458,1	14,4	12,7	3176,9	25,2

Tabela 4.12 – Simulações para volume do reservatório igual a 0,8 m³

Volume do reservatório 0,8 m ³						
Nº Coletores	Altura termostato (% altura do tanque)	Energia térmica solar (MJ)	Ganho Energia térmica solar (%)	Energia térmica gás/ Energia total (%)	Energia térmica perdida (MJ)	Eficiência solar (%)
1	50	1538		91,6	5209,1	45,7
	75	1927,8	25,3	89,0	4426,9	57,3
2	50	2815		84,3	4914,1	41,8
	75	3494	24,1	79,7	4187,9	51,8
4	50	5028		71,4	4549,8	37,3
	75	6266	24,6	62,6	3719,5	46,5
8	50	8711		48,6	3923,7	32,3
	75	10643,3	22,2	34,7	3266,1	39,5
10	50	10311,2		39,5	4000,2	30,5
	75	12095,2	17,3	25,6	3229,1	35,9

Tabela 4.13 – Simulações para volume do reservatório igual a 1 m³

Volume do reservatório 1 m ³						
Nº Coletores	Altura termostato (% altura do tanque)	Energia térmica solar (MJ)	Ganho Energia térmica solar (%)	Energia térmica gás/ Energia total (%)	Energia térmica perdida (MJ)	Eficiência solar (%)
1	50	1432,9		86,9	4358,6	42,4
	75	1746,5	21,9	82,2	3198,7	51,8
2	50	2612,4		75,4	4001,5	38,7
	75	3148,3	20,5	67,2	2972,9	46,8
4	50	4731		54,1	3691,9	35
	75	5620,6	18,8	40,6	2852,5	41,7
8	50	7840,1		22,8	3548	29
	75	8631,4	10,1	11,0	3086,2	32,1
10	50	8768,8		14,7	3669,2	26,1
	75	9365,7	6,8	6,4	3392,6	27,9

4.6.2. Análise dos Resultados

Nesta seção foram apresentados os resultados de um conjunto de simulações, cuja finalidade é avaliar a influência que a altura do termostato no interior do reservatório causa na eficiência energética do sistema de aquecimento de água, para um número variado de coletores e volume de reservatório.

Pode ser constatado que a elevação do termostato no interior do tanque gera um acréscimo da energia térmica solar fornecida pelo coletor, devido a água estar com uma temperatura menor no fundo do reservatório, em relação ao restante do sistema. Observa-se que o ganho de energia térmica solar ocorreu de forma acentuada para reservatórios com volume de até $0,8\text{m}^3$.

Já em relação a energia térmica do gás, o aumento da altura do termostato ocasionou uma redução no aquecimento da água, em razão do sistema operar de maneira mais eficiente.

Neste trabalho foram utilizados dois valores de altura para o termostato: 50 % e 75% da altura do reservatório. Considera-se que é correto utilizar uma aproximação linear para interpolar resultados obtidos para outras alturas. Esta linearidade está em consonância com os resultados alcançados por Vieira, 2001, que utilizou como altura do termostato os valores de 11%, 22%, 32%, 43% e 53% da altura do reservatório.

4.7. Influência da Razão de Aspecto (Comprimento/Diâmetro)

Neste tópico será abordada a influência da razão de aspecto no desempenho energético do sistema de aquecimento de água.

Os reservatórios verticais apresentam um desempenho térmico superior em relação aos reservatórios horizontais, devido ao fato de apresentarem um maior grau de estratificação. Inúmeros trabalhos experimentais mostram que os reservatórios horizontais não mantêm uma estratificação térmica igual a dos verticais.

Para demonstrar a influência da razão de aspecto de um reservatório vertical foram realizadas simulações, com base nos dados constantes na Tabela 4.14, considerando o valor da razão de aspecto igual a 0,5; 1; 1,5 e 2.

4.7.1. Resultados

As simulações foram realizadas considerando o que volume do reservatório era de 0,1; 0,2; 0,4; 0,8 e 1m^3 e o número de coletores 1, 2, 4, 8 e 10 e a razão de aspecto 0,5, 1, 1,5 e 2. Porém, os valores obtidos por meio das simulações com o programa TERMOSIM, para a energia térmica solar, energia térmica do gás e para a eficiência solar, não sofreram influência significativa da razão de aspecto, conforme se constata na Figura 4.32, Figura 4.33 e Figura 4.34. Esta conclusão contraria a expectativa sobre a influência da razão de aspecto no

comportamento do sistema e, portanto, este item deverá ser mais explorado em trabalhos futuros.

Tabela 4.14 – Parâmetros de simulação

Parâmetros de simulação			
	Volume do Tanque		0,1/0,2/0,4/0,8/1 m ³
	Diâmetro do Tanque		Variável
	Altura do Tanque		Variável
	Razão de aspecto (L/D)		0,5
			1
			1,5
			2
A	Altura de saída da água do tanque p/ o aquecedor	10 % da altura do tanque	Variável
B	Altura da conexão de retorno da água do aquecedor p/ o tanque	80 % da altura do tanque	Variável
C	Desnível entre coletor e tanque		1m
D	Altura entre a saída da água do tanque para o coletor		0 m
E	Altura que a água da rede entra no reservatório		0 m
	Qualidade do coletor	$F_R(\tau\alpha) = 0,7$	$F_R U_L = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$
	Temperatura de ajuste do termostato		40 °C
F	Altura do termostato	50 % da altura do tanque	Variável
	Consumo de água quente	50 % do volume do tanque	Variável
G	Altura da saída da água quente do tanque p/ o consumo	80 % da altura do tanque	Variável
H	Altura entre saída do coletor e a base do tanque	67 % da altura do tanque	Variável
	Número de coletores		1,2,4,8,10

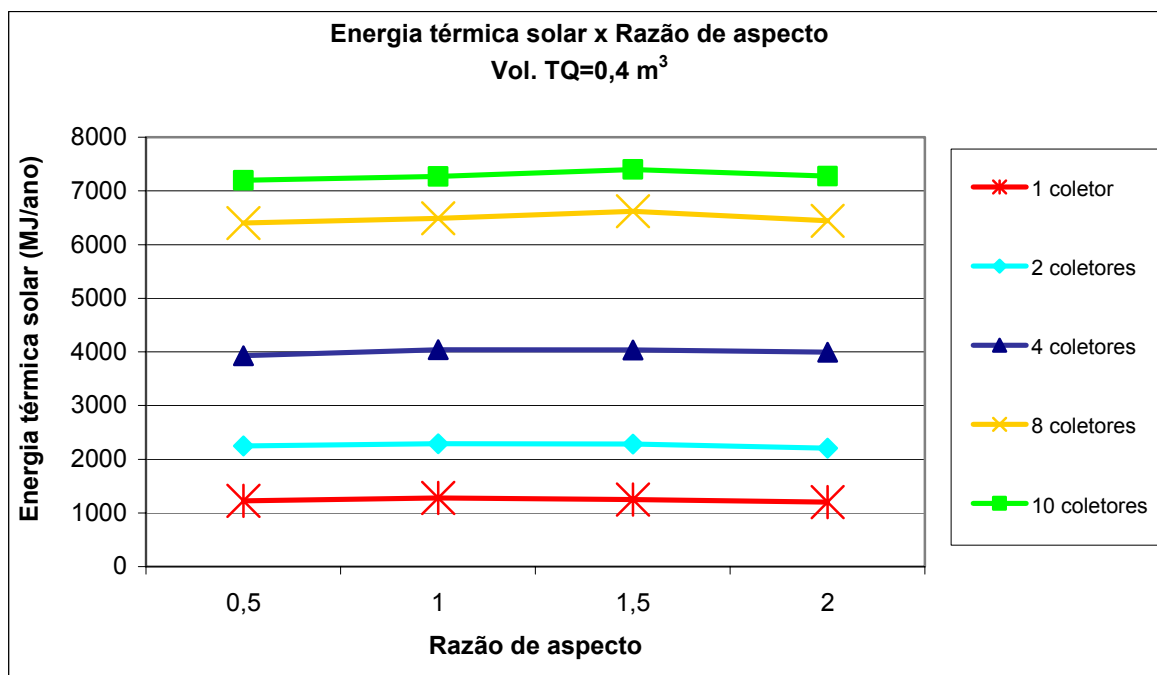


Figura 4.32 – Evolução da energia térmica solar em função da razão de aspecto para o volume do reservatório igual a 0,4 m³

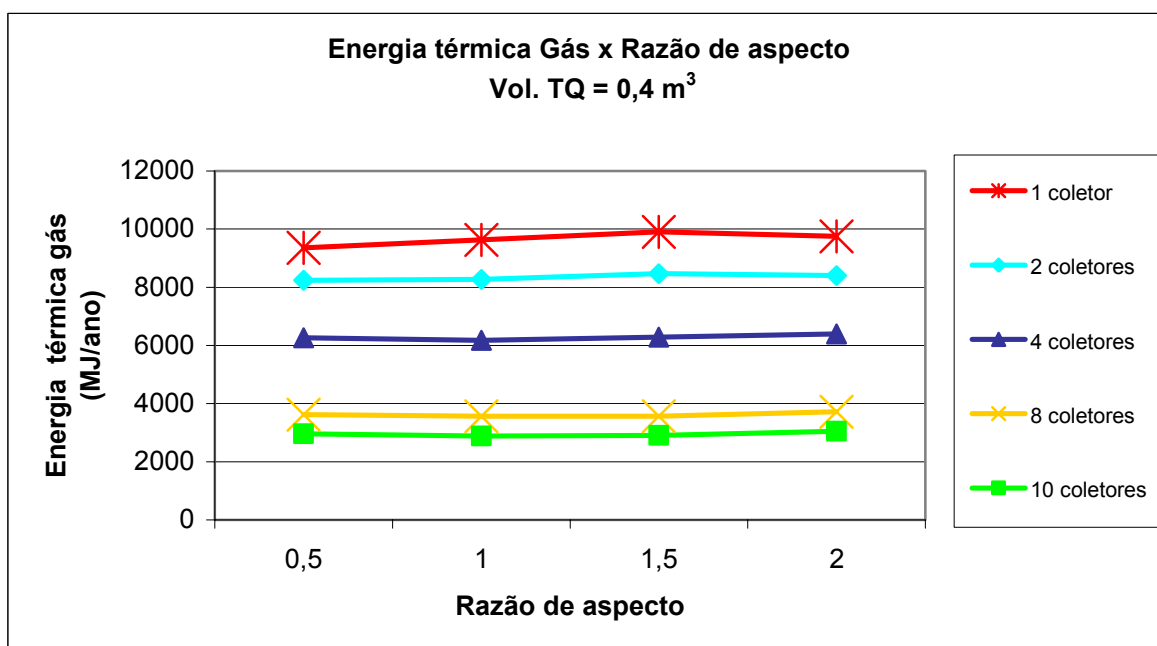


Figura 4.33 – Evolução da energia térmica gás em função da razão de aspecto para o volume do reservatório igual a 0,4 m³

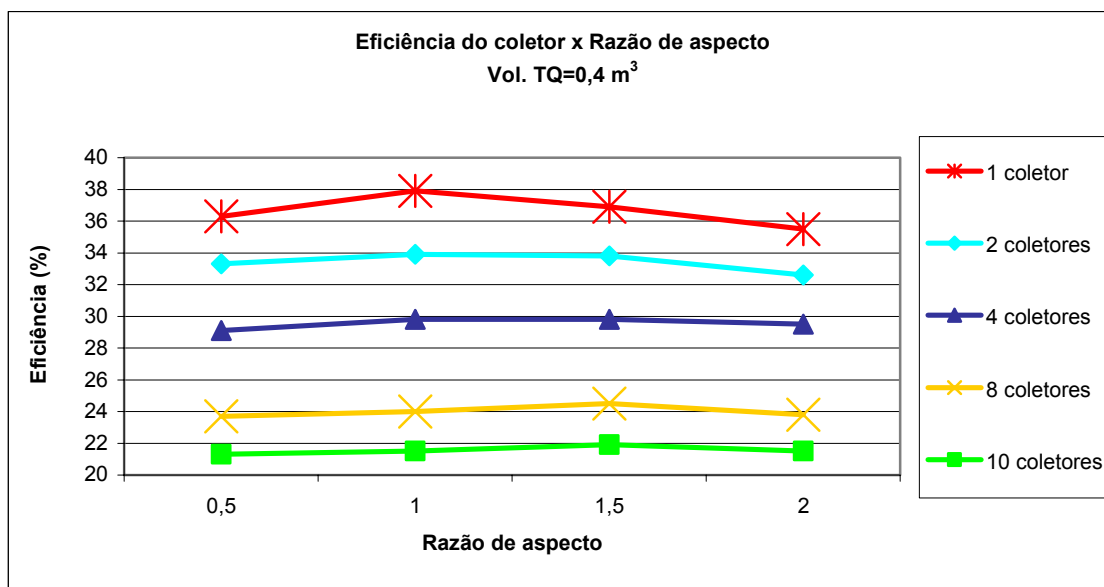


Figura 4.34 – Evolução da eficiência solar em função da razão de aspecto para o volume do reservatório igual a 0,4 m³

5. O EFEITO DO CONSUMO DE ÁGUA QUENTE E DA QUALIDADE DOS COLETORES

Neste capítulo será abordada a influência causada na eficiência do sistema de aquecimento de água por energia solar levando-se em consideração o consumo de água quente adotado e também a qualidade dos coletores utilizada.

5.1. Consumo de Água Quente

A determinação da demanda de água quente de um sistema de aquecimento de água por energia solar é uma variável muito complexa para ser determinada com exatidão, pois depende de uma série de fatores como: hábito de consumo, nível sócio-econômico e também das condições climáticas.

Conforme Siqueira, 2003, a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) em 1987 realizou um estudo a fim de obter a demanda média de água quente para várias utilizações residenciais. A CEMIG realizou avaliações do consumo de água quente em residências enquadradas nas classes sociais com médio e alto poder aquisitivo. No horário compreendido entre as 7 e 10 horas o consumo de água quente representou 30% do consumo total, ao passo que os 70% restantes do consumo de água, considerando-se somente o uso para o banho, foram consumidos entre as 18 e 21 horas.

Segundo Knudsen, 2002, Buckler e Klein estudaram a influência da fração solar nos diferentes perfis de consumo de água quente, tendo concluído que o horário mais desfavorável para o consumo de água quente está compreendido entre as 2 e 6 horas. O período entre 14 e 18 horas foi considerado o mais favorável.

Os sistemas de aquecimento por termossifão são os que mais sofrem com a variação do perfil de consumo de água quente, pois a distribuição da temperatura no interior do reservatório influencia na circulação do fluido.

Shariah e Löf, 1997, mostraram que a fração solar possui valores distintos com a utilização de diferentes perfis de consumo, em condições idênticas de operação, através da análise de 4 tipos de perfis: a) perfil distribuído ao longo do dia (desenvolvido por J.J Mutch), b) pela manhã, c) pela noite e d) contínuo (das 7 h às 17 h). O primeiro perfil apresentou a maior fração solar, seguido pelo terceiro, depois pelo quarto e por último o segundo. O baixo desempenho do segundo perfil decorre do fato da energia térmica utilizada para aquecer a água

ter sido fornecida no dia anterior, continuando as perdas térmicas no reservatório durante a noite.

Por isso, com o objetivo de verificar a contribuição dos diferentes volumes de consumo, associados a um número variado de coletores e de volume de reservatório no desempenho energético do sistema, foram realizadas simulações com os dados constantes na Tabela 5.1, considerando, principalmente, os volumes de consumo correspondente a 20%, 50% e 80% do volume do reservatório. O perfil de consumo foi constante, sendo o consumo da água do reservatório realizado em dois períodos de uma hora, às 7 h da manhã e às 19 h.

Tabela 5.1 – Parâmetros de simulação

Parâmetros de simulação			
	Volume do Tanque		0,1/0,2/0,4/0,8/1 m ³
	Diâmetro do Tanque		Variável
	Altura do Tanque		Variável
	Razão de aspecto (L/D)		1,5
A	Altura de saída da água do tanque p/ o aquecedor	10 % da altura do tanque	Variável
B	Altura da conexão de retorno da água do aquecedor p/ o tanque	80 % da altura do tanque	Variável
C	Desnível entre coletor e tanque		1 m
D	Altura entre a saída da água do tanque para o coletor		0 m
E	Altura que a água da rede entra no reservatório		0 m
	Qualidade do coletor	$F_R(\tau\alpha) = 0,7$	$F_R U_L = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$
	Temperatura de ajuste do termostato		40 °C
F	Altura do termostato	50 % da altura do tanque	Variável
	Consumo de água quente	20 % do volume do tanque	Variável
		50 % do volume do tanque	Variável
		80 % do volume do tanque	Variável
G	Altura da saída da água quente do tanque p/ o consumo	80 % da altura do tanque	Variável
H	Altura entre saída do coletor e a base do tanque	67 % da altura do tanque	Variável
	Número de coletores		1,2,4,8,10

5.1.1. Resultados

Os resultados serão ilustrados através de gráficos cuja origem dos dados encontram-se nas tabelas localizadas no Apêndice IV, que apresenta um resumo anual para as condições simuladas.

A Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3 apresentam o desempenho do sistema de aquecimento com o volume do reservatório igual a $0,2 \text{ m}^3$ e com 2, 4 e 10 coletores instalados, correspondendo a 167, 83 e 34 l/m^2 , respectivamente.

A energia térmica necessária para o aquecimento da água foi suprida em sua maior parte pela energia do gás. Nos sistemas que possuíam valores de 167 e 83 l/m^2 , para a relação entre o volume do reservatório e área de coletores, a energia térmica solar manteve-se praticamente constante e a energia auxiliar cresceu rapidamente com o aumento do consumo de água.

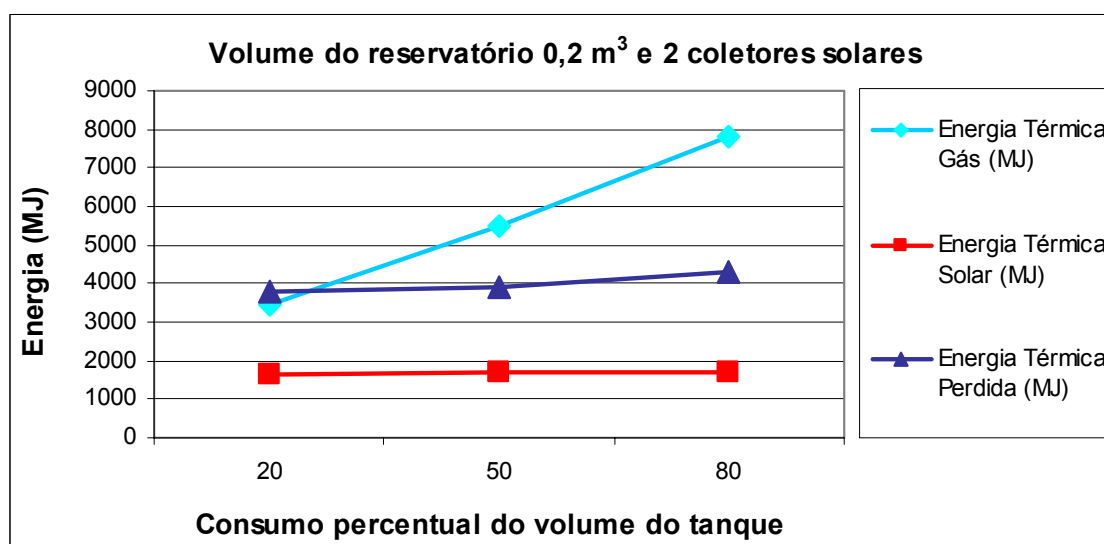


Figura 5.1 – Gráfico de energia em função do consumo percentual do volume do reservatório para 2 coletores solares

A Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6 demonstram o desempenho do sistema de aquecimento com o volume do reservatório igual a $0,4 \text{ m}^3$ e com 2, 4 e 10 coletores instalados, correspondendo a 333, 166 e 68 l/m^2 , respectivamente. Os dados que deram origem a estes gráficos estão localizados no Apêndice IV.

O aumento do volume do reservatório gerou um acréscimo na eficiência do sistema de aquecimento comparando-se com o volume anteriormente analisado, mas por outro lado o consumo de energia térmica do gás apresentou um crescimento elevado devido ao fato das

instalações estarem dimensionadas com valores de relação entre o volume de reservatório e área de coletores muito acima dos recomendados.

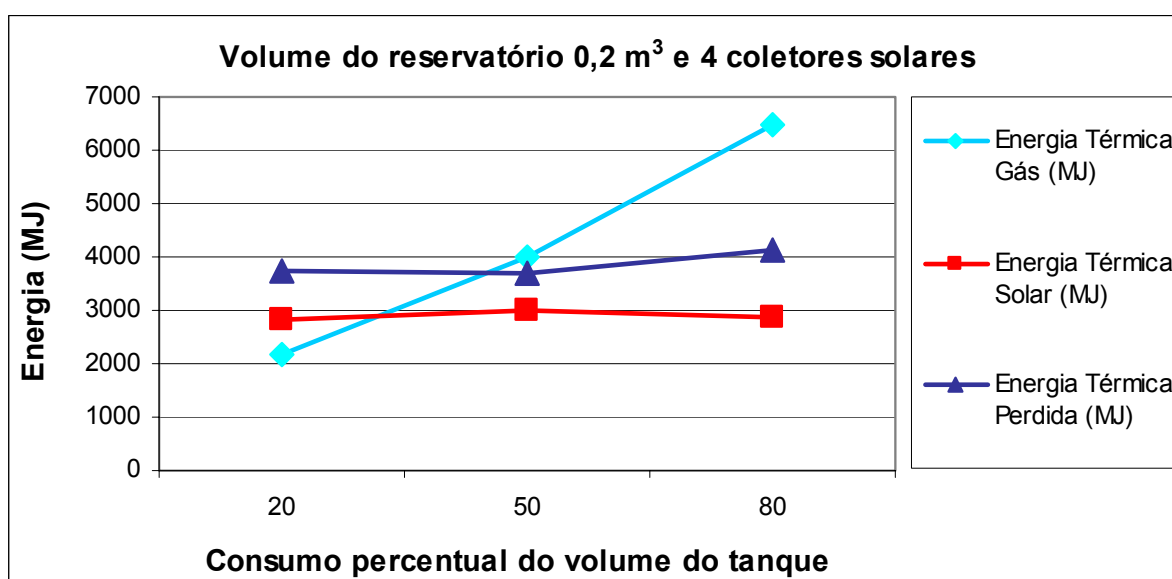


Figura 5.2 – Gráfico de energia em função do consumo percentual do volume do reservatório para 4 coletores solares

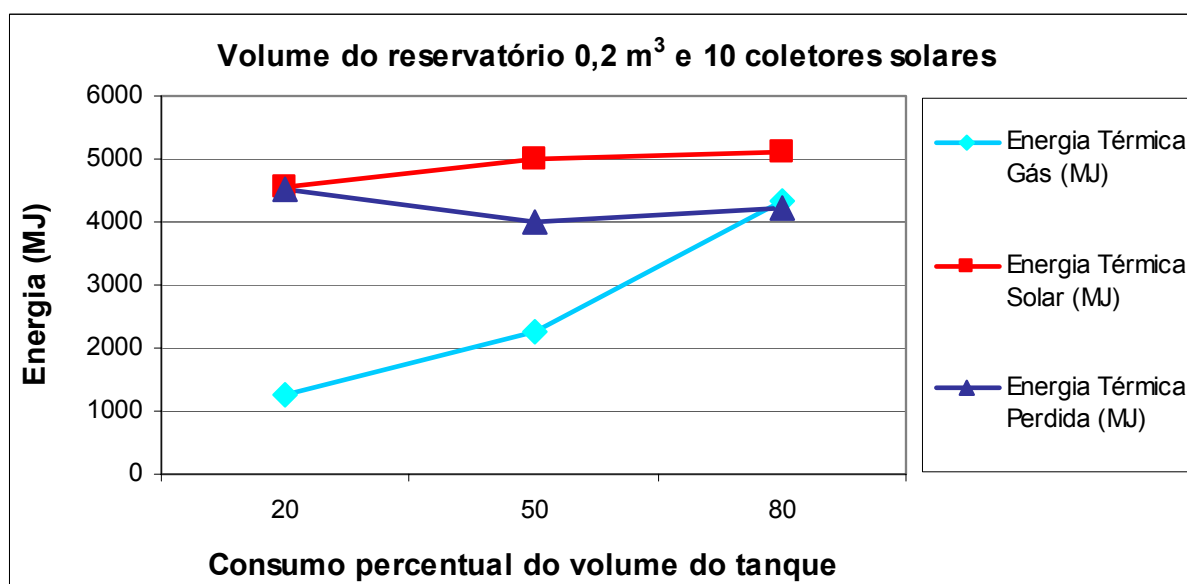


Figura 5.3 – Gráfico de energia em função do consumo percentual do volume do reservatório para 10 coletores solares

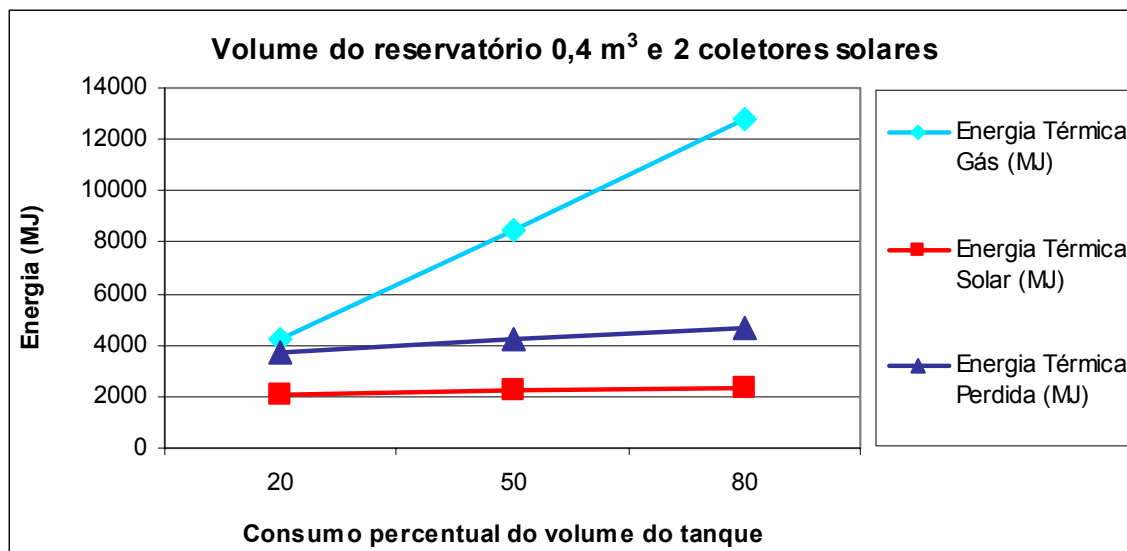


Figura 5.4 – Gráfico de energia em função do consumo percentual do volume do reservatório para 2 coletores solares

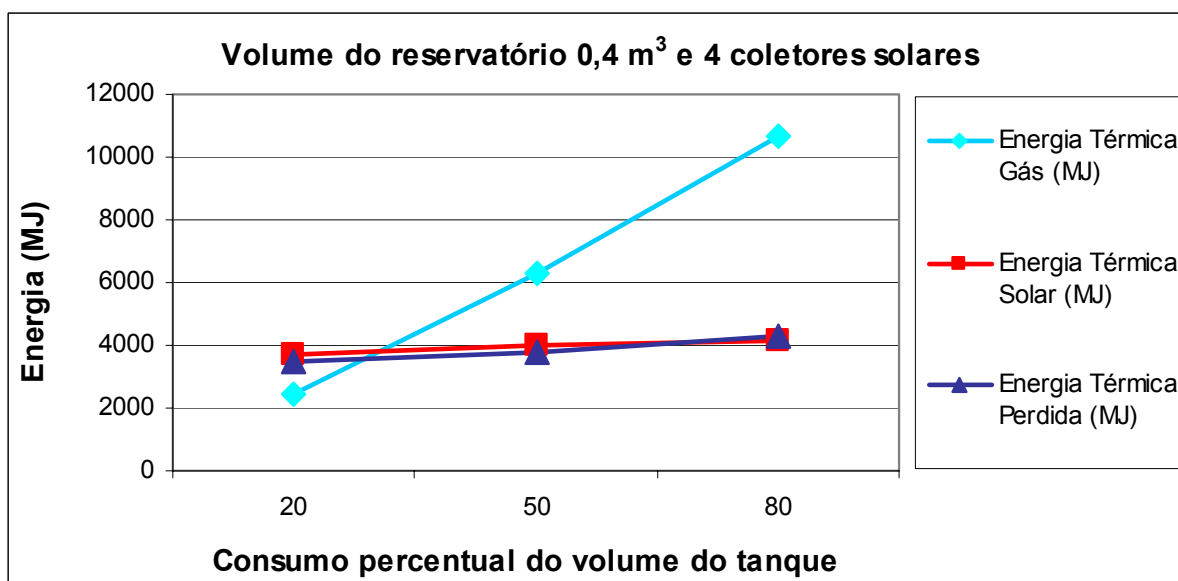


Figura 5.5 – Gráfico de energia em função do consumo percentual do volume do reservatório para 4 coletores solares

Na Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9 são apresentados os desempenhos do sistema de aquecimento com o volume do reservatório igual a 1 m³ e com 2, 4 e 10 coletores instalados, correspondendo a 833, 417 e 167 l/m², respectivamente. Os dados que deram origem a estes gráficos estão localizados no Apêndice IV.

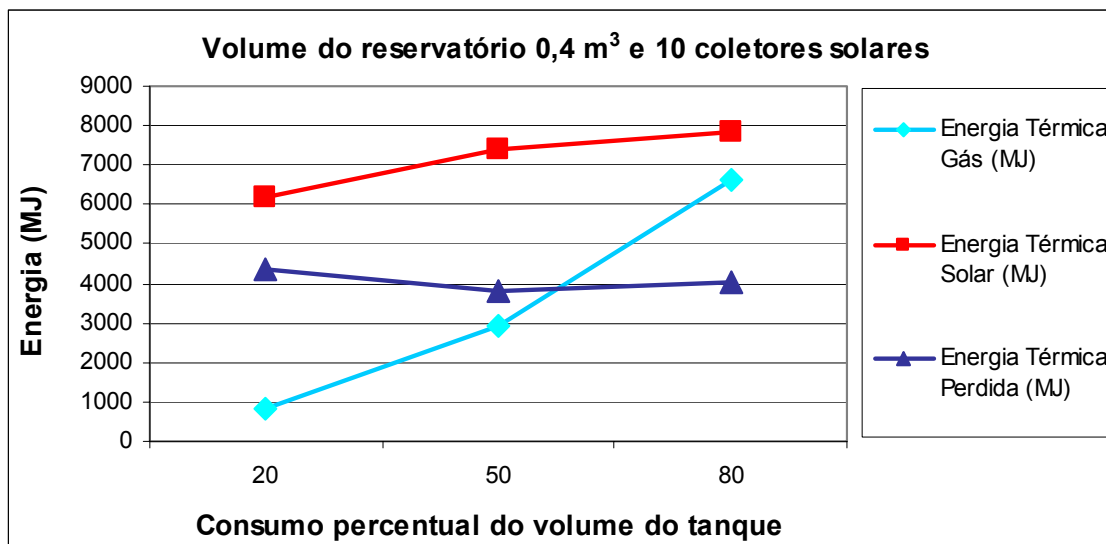


Figura 5.6 – Gráfico de energia em função do consumo do volume do reservatório para 10 coletores solares

Nas instalações, onde a relação entre o volume do reservatório e área de coletores apresentou valores de 833 e 417 l/m², a energia térmica do gás chegou a representar 75 e 54% da energia necessária para manter a água nas condições pré-estabelecidas, apresentando um comportamento oposto com o valor da relação igual a 167 l/m², pois a energia térmica do gás representou somente 15% da energia necessária.

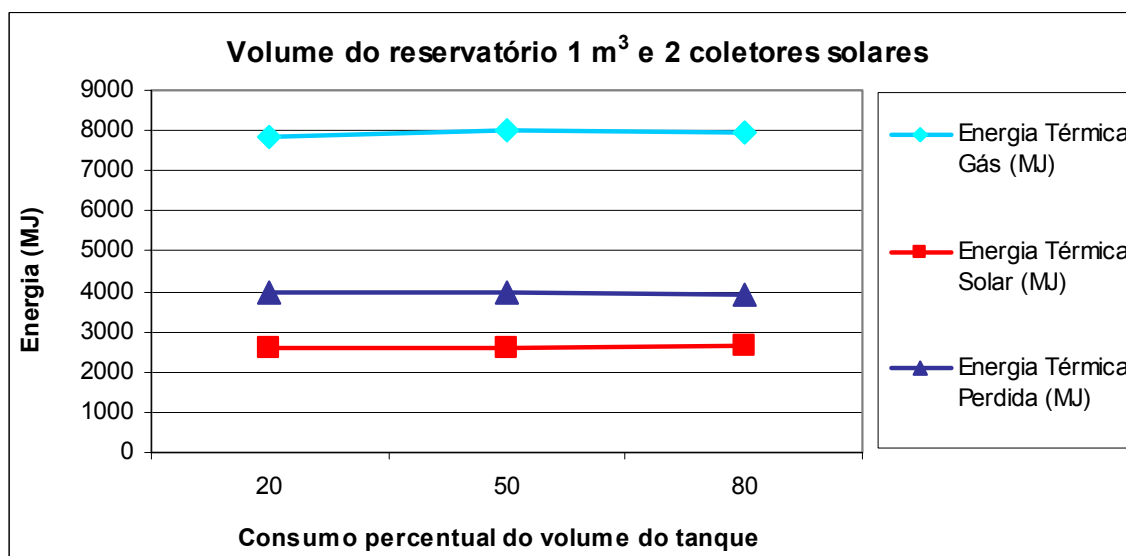


Figura 5.7 – Gráfico de energia em função do consumo percentual do volume do tanque para 2 coletores solares

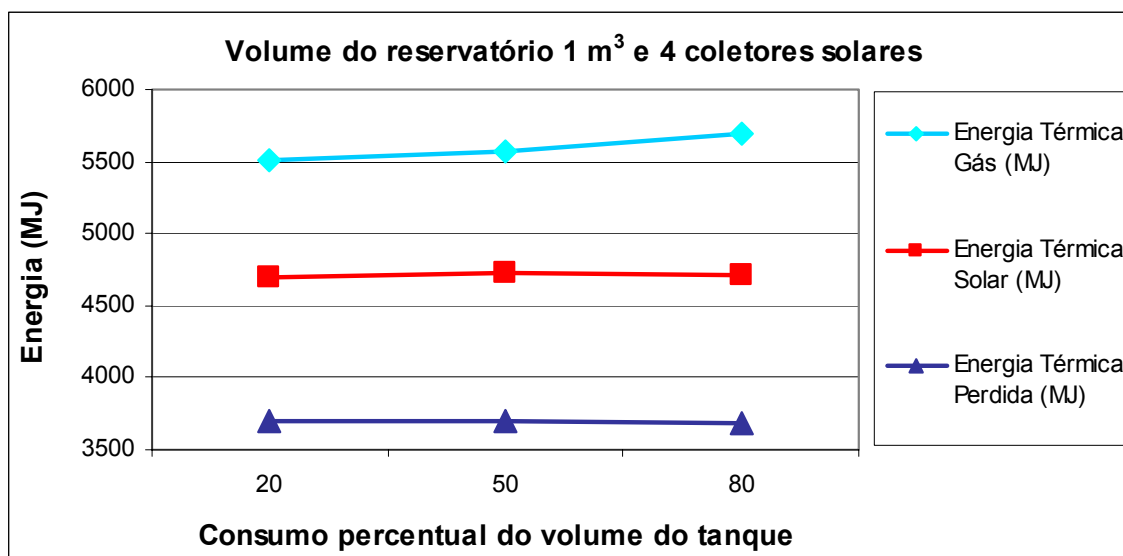


Figura 5.8 – Gráfico de energia em função do consumo percentual do volume do tanque para 4 coletores solares

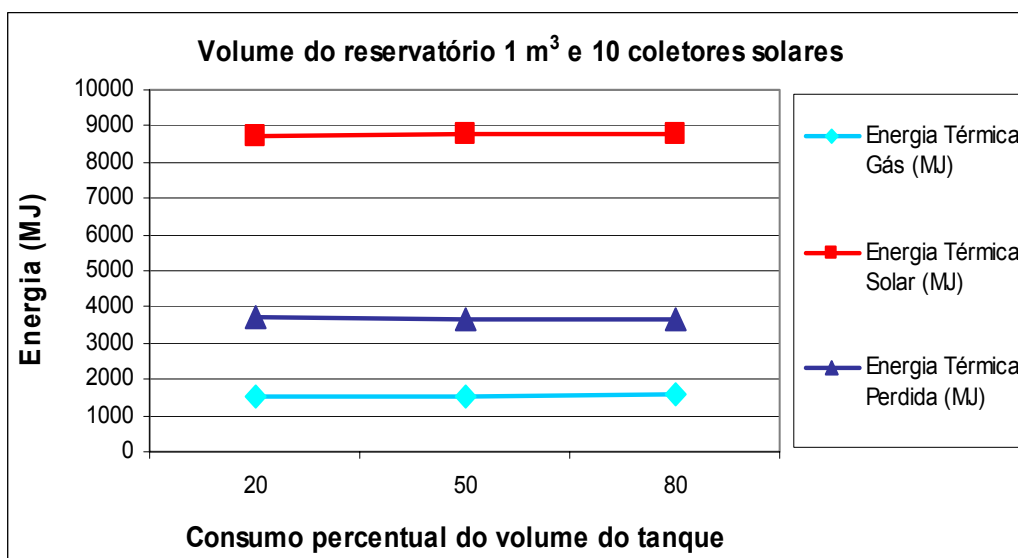


Figura 5.9 – Gráfico de energia em função do consumo de 80% do volume do tanque para 10 coletores solares

Na Figura 5.10 é apresentada a variação da eficiência do sistema em função dos consumo de 20%, 50% e 80% do volume do tanque para instalação com 2,4 e 10 coletores e volume do reservatório igual a 0,2; 0,4 e 1 m³. O aumento da eficiência do sistema está relacionado com a elevação do consumo e do volume do reservatório e, também, com a

diminuição do número de coletores utilizados, pois com isso a temperatura da água contida no reservatório será menor.

A eficiência do sistema para instalação com 2, 4 e 10 coletores e volume do reservatório igual a $0,4 \text{ m}^3$ apresentou um aumento superior em relação à instalação com volume de reservatório igual a $0,2 \text{ m}^3$ devido ao maior volume do reservatório.

Pode ser observado ainda na Figura 5.10 que a eficiência do sistema atingiu o seu maior valor para todas as configurações de instalação onde o volume foi de 1 m^3 , pois como o volume do reservatório era elevado, a temperatura da água que entrava nos coletores era menor, propiciando um aumento no rendimento dos mesmos. Outro ponto a destacar é a ausência de variação da eficiência do sistema nesta condição.

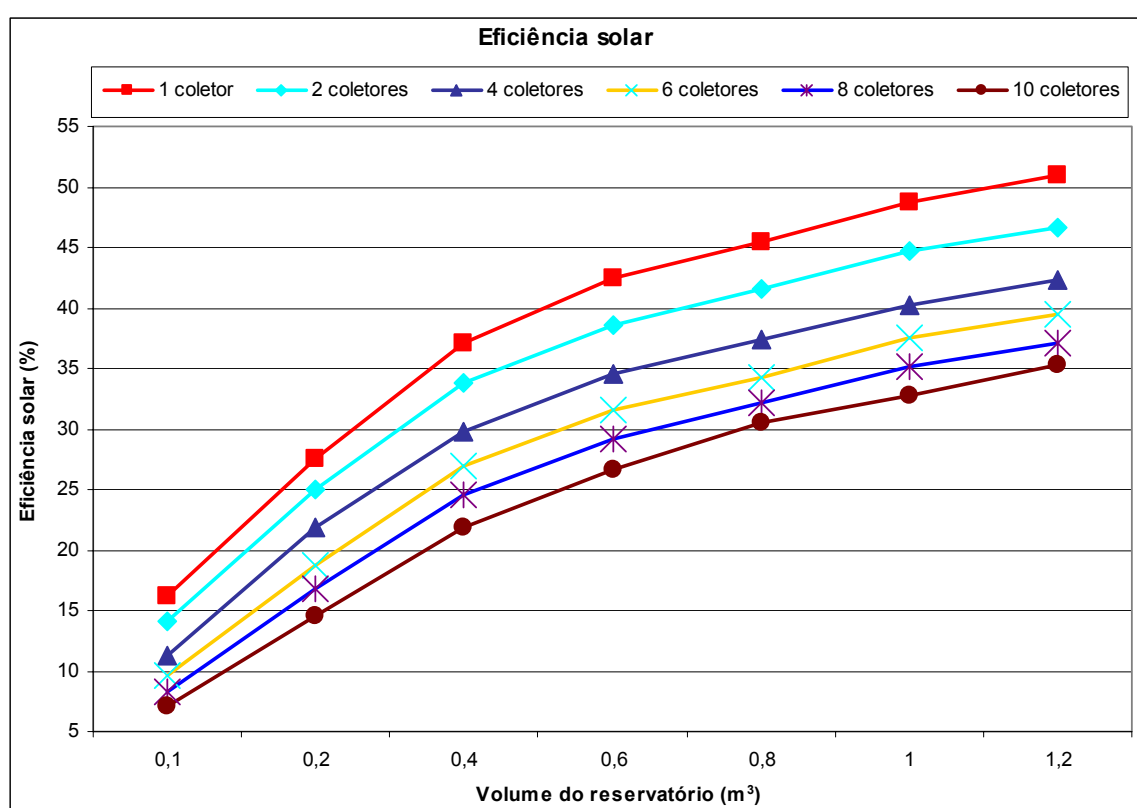


Figura 5.10 – Eficiência do sistema em função do consumo percentual do volume do reservatório para diversos coletores

5.1.2. Análise dos Resultados

Com o objetivo de analisar a influência que o consumo exerce no sistema de aquecimento de água foram elaboradas tabelas que consolidaram os resultados das simulações, classificando-os por volume do reservatório.

As simulações demonstram que a utilização de um mesmo consumo, agregado ao aumento do volume do reservatório, ocasiona o aumento da eficiência do sistema. A variação do consumo de 20% para 50%, considerando o mesmo número de coletores, produz a elevação da energia térmica solar, enquanto que o aumento do consumo de 50% para 80% ocasiona o decréscimo da mesma.

A energia térmica do gás diminuiu com o aumento do volume do reservatório nas instalações onde o consumo representou 20% e 50% do volume do tanque. Nas instalações com consumo igual a 20%, a energia do gás começou a aumentar após atingir o volume de 0,4 m³, enquanto que para o perfil de consumo igual a 50%, a energia do gás aumentou a partir do volume de 0,2 m³, voltando a decair novamente ao atingir o volume de 1 m³.

O consumo referente a 80% do volume do reservatório apresentou comportamento similar ao perfil de 50%, porém a queda da energia térmica do gás foi superior àquela apresentada no consumo correspondente a 50%.

Nas tabelas que serão apresentadas a seguir, a quarta coluna representa o ganho de energia térmica solar que foi adicionada ao sistema através do aumento do consumo de água do reservatório. A quinta coluna apresenta a relação entre a energia térmica do gás e o somatório da energia térmica solar e do gás para um sistema com mesmo número de coletores. Nesta mesma coluna foram mantidos os valores pequenos (insignificantes) para preservar o procedimento matemático, apesar de seu questionável significado físico.

Tabela 5.2 – Resumo dos casos simulados para volume de reservatório igual a 0,1 m³

		Volume do tanque 0,1 m ³			
Nº Coletores	Consumo de água quente (% do volume do tanque)	Energia térmica solar (MJ)	Ganho energia térmica solar (%)	Energia térmica gás/ Energia total (%)	Eficiência solar (%)
1	20	550	0	90.3	16.1
1	50	548.3	-0.3	91.5	16.2
1	80	610.9	11.4	91.8	18
2	20	984.9	0	82.7	14.4
2	50	959.3	-2.6	85.4	14.1
2	80	1064.8	11.0	86.2	15.7
4	20	1695.5	0	69.7	12.4
4	50	1539.6	-9.2	76.8	11.3
4	80	1596.4	3.7	79.5	11.8
8	20	2491	0	54.1	9.1
8	50	2268.9	-8.9	64.5	8.3
8	80	2279	0.4	70.1	8.3
10	20	2633.6	0	51.7	7.7
10	50	2447.6	-7.1	61.7	7.2
10	80	2373.9	-3.0	68.8	7

Tabela 5.3 – Resumo dos casos simulados para volume de reservatório igual a 0,2 m³

		Volume do tanque 0,2 m ³			
Nº Coletores	Consumo de água quente (% do volume do tanque)	Energia térmica solar (MJ)	Ganho energia térmica solar (%)	Energia térmica gás/ Energia total (%)	Eficiência solar (%)
1	20	883.6	0	82.8	26.1
	50	941.9	6.6	87.0	27.9
	80	956.7	1.6	90.0	28.3
2	20	1620.6	0	68.0	23.9
	50	1694.2	4.5	76.4	25.1
	80	1685.1	-0.5	82.3	24.8
4	20	2840.3	0	43.5	20.9
	50	2979.4	4.9	57.2	21.9
	80	2867.5	-3.8	69.4	21.1
8	20	4170	0	24.6	15.4
	50	4534	8.7	35.8	16.8
	80	4538.8	0.1	51.2	16.8
10	20	4562.4	0	21.5	13.5
	50	5009.1	9.8	31.0	14.8
	80	5120.9	2.2	45.8	15.1

Tabela 5.4 – Resumo dos casos simulados para volume de reservatório igual a 0,4 m³

		Volume do tanque 0,4 m ³			
Nº Coletores	Consumo de água quente (% do volume do tanque)	Energia térmica solar (MJ)	Ganho energia térmica solar (%)	Energia térmica gás/ Energia total (%)	Eficiência solar (%)
1	20	1126.1	0	82.6	33.3
	50	1245.3	10.6	88.8	36.9
	80	1306	4.9	91.6	38.7
2	20	2075.5	0	67.2	30.7
	50	2281.3	9.9	78.8	33.8
	80	2340.2	2.6	84.5	34.6
4	20	3697.8	0	39.6	27.3
	50	4037	9.2	60.9	29.8
	80	4119	2.0	72.1	30.4
8	20	5573.8	0	15.7	20.7
	50	6618.7	18.7	35.0	24.5
	80	6787.9	2.6	53.3	25.1
10	20	6159.9	0	11.8	18.3
	50	7396.2	20.1	28.2	21.9
	80	7845.5	6.1	45.8	23.2

Tabela 5.5 – Resumo dos casos simulados para volume de reservatório igual a 0,8 m³

		Volume do tanque 0,8 m ³			
Nº Coletores	Consumo de água quente (% do volume do tanque)	Energia térmica solar (MJ)	Ganho energia térmica solar (%)	Energia térmica gás/ Energia total (%)	Eficiência solar (%)
1	20	1347.6	0	85.5	39.9
	50	1538	14.1	91.6	45.7
	80	1611.4	4.8	94.0	47.8
2	20	2504.1	0	72.7	37.1
	50	2815	12.4	84.3	41.8
	80	2944.9	4.6	89.0	43.7
4	20	4526.6	0	48.8	33.4
	50	5028	11.1	71.4	37.3
	80	5253.8	4.5	80.0	38.9
8	20	7195.5	0	19.5	26.7
	50	8711	21.1	48.6	32.3
	80	8982.8	3.1	64.5	33.3
10	20	8019.7	0	13.0	23.8
	50	10311.2	28.6	39.5	30.5
	80	10596.8	2.8	57.8	31.3

Tabela 5.6 – Resumo dos casos simulados para volume de reservatório igual a 1 m³

		Volume do tanque 1 m ³			
Nº Coletores	Consumo de água quente (% do volume do tanque)	Energia térmica solar (MJ)	Ganho energia térmica solar (%)	Energia térmica gás/ Energia total (%)	Eficiência solar (%)
1	20	1428.6	0	86.8	42.3
	50	1432.9	0.3	86.9	42.4
	80	1443.2	0.7	86.9	42.8
2	20	2614.7	0	75.0	38.8
	50	2612.4	-0.1	75.4	38.7
	80	2645.3	1.3	75.1	39.2
4	20	4698.8	0	54.0	34.8
	50	4731	0.7	54.1	35
	80	4715.4	-0.3	54.7	34.9
8	20	7814.7	0	22.3	28.9
	50	7840.1	0.3	22.8	29
	80	7931.9	1.2	22.6	29.3
10	20	8710.9	0	14.8	25.9
	50	8768.8	0.7	14.7	26.1
	80	8788.8	0.2	15.3	26.1

5.2. Influência da Qualidade do Coletor

A eficiência dos sistemas de aquecimento de água também pode ser afetada pela qualidade dos coletores utilizados, em razão da sua forma construtiva e dos materiais empregados.

Os coletores solares possuem dois parâmetros de qualidade que são: $F_R(\tau\alpha)$, que representa as propriedades óticas e o F_RU_L , que representa as propriedades térmicas do coletor. Quando não possuem estes parâmetros, os mesmos podem ser determinados por meio da especificação das dimensões geométricas, óticas e térmicas dos coletores a serem utilizados, conforme descrito no Capítulo 2.

O parâmetro F_R representa a razão entre a energia útil instantânea captada pelo coletor e a energia útil captada quando a superfície de absorção do coletor estiver na temperatura de entrada do fluido (ASHRAE Standard 93-77, 1977).

$\tau\alpha$ é afetado pelo valor do ângulo de incidência da radiação solar direta sobre o coletor solar, dependendo fortemente da qualidade do vidro e da pintura do absorvedor.

U_L é uma função da temperatura do coletor e das condições climáticas do ambiente, que depende de como o coletor foi isolado.

As simulações foram realizadas de acordo com os parâmetros constante na Tabela 5.7. Com o objetivo de analisar a influência causada pela qualidade do coletor no sistema de aquecimento, foram utilizados coletores com diversas qualidades.

5.2.1. Resultados

Na Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13 são apresentados gráficos relativos ao sistema de aquecimento de água utilizando coletores com diversos valores de $F_R(\tau\alpha)$ e F_RU_L , com o objetivo de mostrar as diferenças no desempenho energético do sistema relativo a estas propriedades.

A base de dados para a elaboração dos gráficos está contida na Tabela 5.8. A terceira coluna apresenta o ganho de energia térmica solar percentual, mantendo fixo o parâmetro $F_R(\tau\alpha)$ e variando o parâmetro F_RU_L . A quarta coluna o ganho de energia térmica solar percentual mantendo fixo o parâmetro F_RU_L e variando o parâmetro $F_R(\tau\alpha)$.

Tabela 5.7 – Parâmetros de simulação

Parâmetros de simulação			
	Volume do Tanque		0,4 m ³
	Diâmetro do Tanque		0,7 m
	Altura do Tanque		1,05 m
	Razão de aspecto (L/D)		1,5
A	Altura de saída da água do tanque p/ o aquecedor	10 % da altura do tanque	0,11 m
B	Altura da conexão de retorno da água do aquecedor p/ o tanque	80 % da altura do tanque	0,84 m
C	Desnível entre coletor e tanque		1 m
D	Altura entre a saída da água do tanque para o coletor		0 m
E	Altura que a água da rede entra no reservatório		0 m
	Qualidade do coletor	$F_R(\tau\alpha) = 0,5$	$F_R U_L = 6 \text{ W/m}^2\text{°C}$
		$F_R(\tau\alpha) = 0,7$	$F_R U_L = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$
		$F_R(\tau\alpha) = 0,85$	$F_R U_L = 10 \text{ W/m}^2\text{°C}$
	Temperatura de ajuste do termostato		40 °C
F	Altura do termostato	50 % da altura do tanque	0,53 m
	Consumo de Água quente	50 % do volume do tanque	0,2 m ³
G	Altura da saída da água quente do tanque p/ o consumo	80 % da altura do tanque	0,84 m
H	Altura entre saída do coletor e a base do tanque	67 % da altura do tanque	0,71 m
	Número de coletores		1,2,4,8,10

Com base na Tabela 5.8 é possível tecer as seguintes considerações:

- Mantendo-se o valor de $F_R(\tau\alpha)$ constante em 0,5 e variando-se o valor de $F_R U_L$ de 10 para 8, o ganho de energia térmica solar variou de 7,15% até 24,06%, respectivamente para sistemas com um coletor e oito coletores. Variando-se $F_R U_L$ de 8 para 6, o ganho de energia solar variou de 7,99% a 22,69%, respectivamente para sistemas com um coletor e dez coletores.

- Mantendo-se o valor de $F_R(\tau\alpha)$ em 0,7 e variando-se $F_R U_L$ de 10 para 8, o ganho de energia térmica solar variou de 6,12% até 16,25%, respectivamente, para sistemas com um coletor e oito coletores. Variando-se $F_R U_L$ de 8 para 6, o ganho de energia térmica solar variou de 6,54% até 13,82%, respectivamente, para sistemas com um coletor e dez coletores.

- Mantendo-se o valor de $F_R(\tau\alpha)$ em 0,85 e variando-se $F_R U_L$ de 10 para 8, o ganho de energia térmica solar variou de 5,96% a 11,09%, respectivamente, para sistemas com um coletor e quatro coletores. Variando-se $F_R U_L$ de 8 para 6, o ganho de energia térmica solar variou de 5,21% a 11,49%, respectivamente, para sistemas com um coletor e quatro coletores.

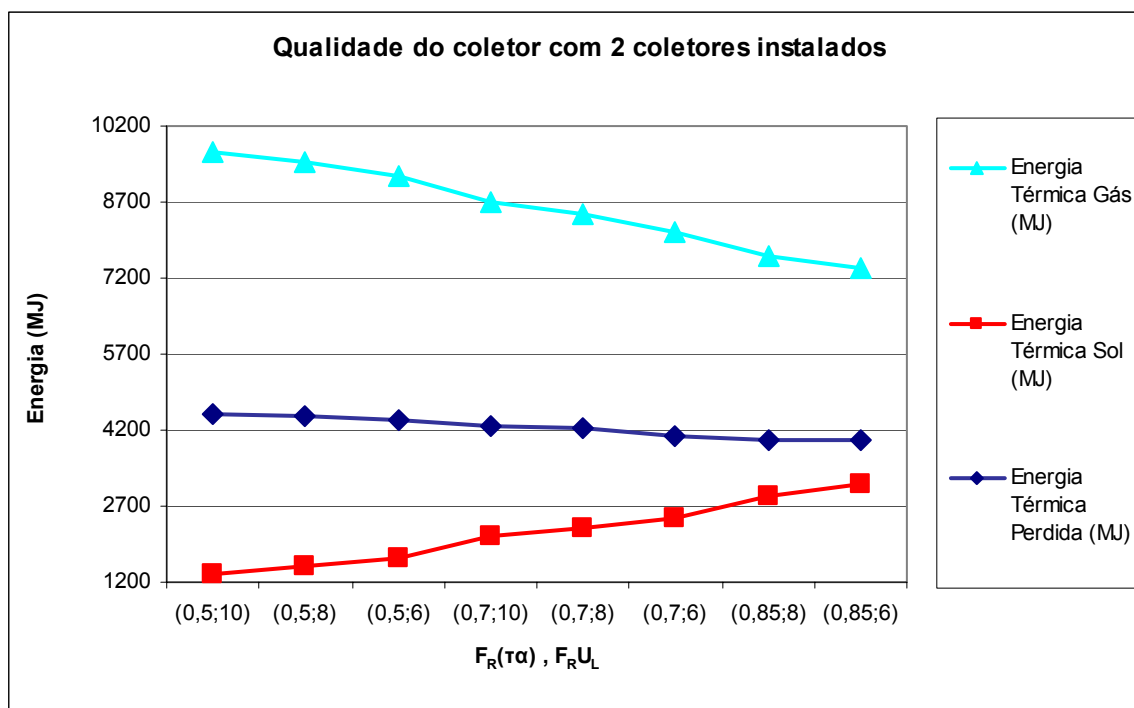


Figura 5.11– Evolução da energia em função da qualidade do coletor com 2 coletores

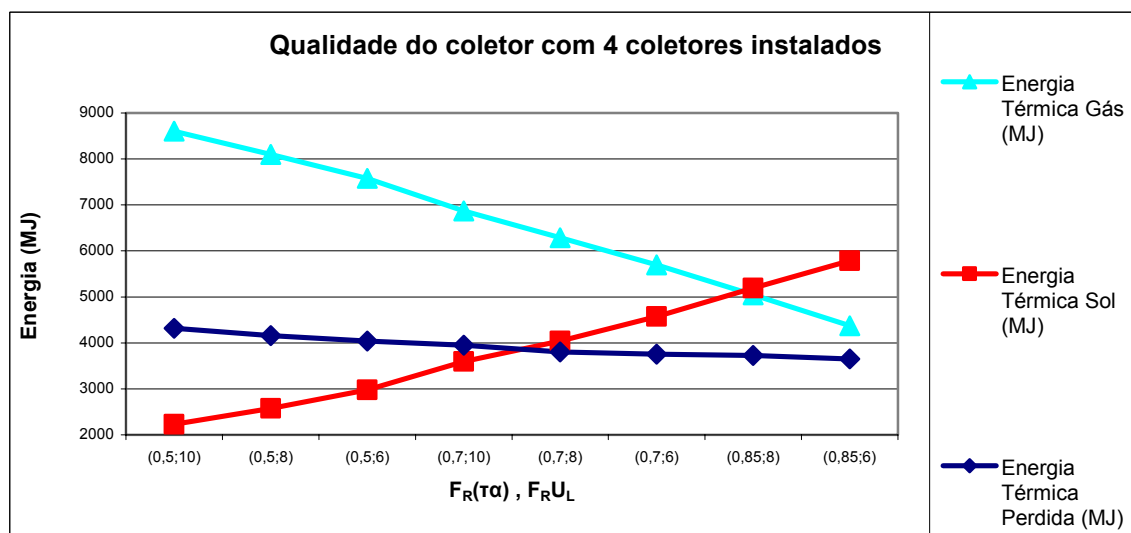


Figura 5.12– Evolução da energia em função da qualidade do coletor com 4 coletores

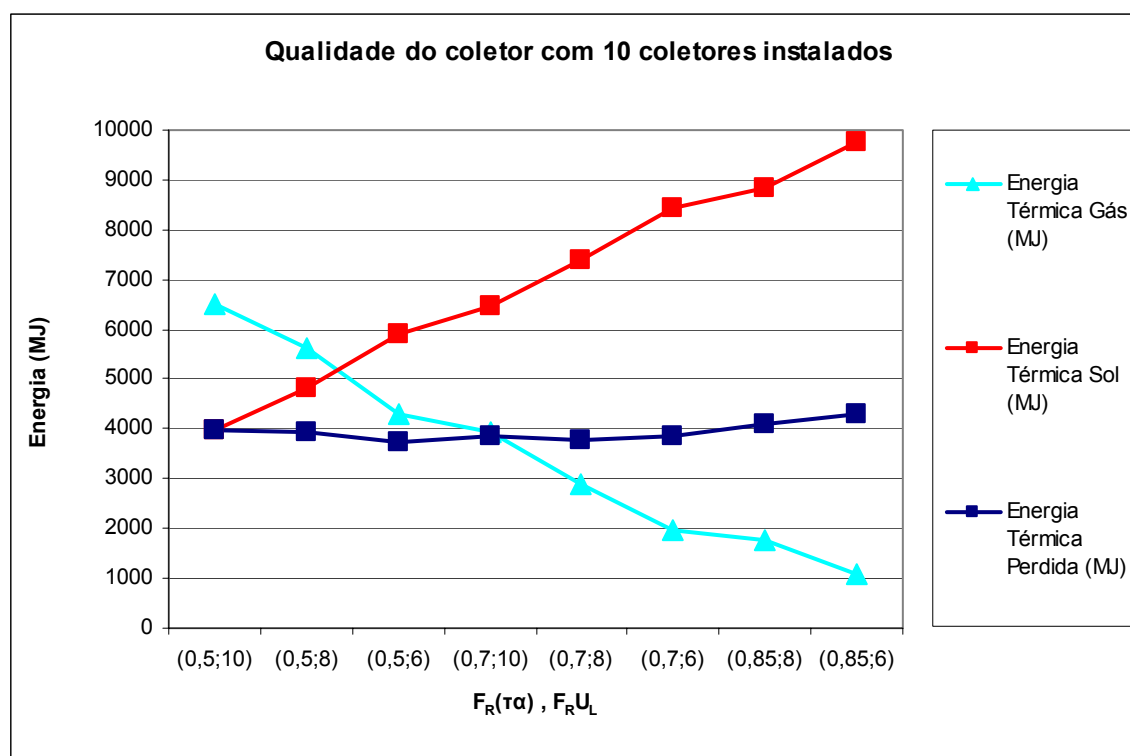


Figura 5.13– Evolução da energia em função da qualidade do coletor com 10 coletores

- Mantendo-se o valor $F_R U_L$ em 10 e variando-se $F_R(\tau_\alpha)$ de 0,5 para 0,7, o ganho de energia térmica solar variou de 50,14% a 66,32%, respectivamente, para sistemas com um coletor e oito coletores. Variando-se $F_R(\tau_\alpha)$ de 0,7 para 0,85, o ganho de energia térmica solar variou de 26,37% até 30,10%, respectivamente, para sistemas com um coletor e quatro coletores. Com a variação de 0,5 para 0,85, o ganho de energia térmica solar variou de 89,73% para 109,91%, respectivamente para sistemas com um coletor e oito coletores.

- Mantendo-se o valor $F_R U_L$ em 8 e variando-se $F_R(\tau_\alpha)$ de 0,5 para 0,7, o ganho de energia térmica solar variou de 48,69% para 56,94%, respectivamente, para sistemas com um coletor e quatro coletores. Variando-se $F_R(\tau_\alpha)$ de 0,7 para 0,85, o ganho de energia térmica solar variou de 26,18% a 28,65%, respectivamente, para sistemas com um coletor e quatro coletores. Com a variação de 0,5 para 0,85, o ganho de energia térmica solar variou de 87,62% a 101,89%, respectivamente para sistemas de um coletor e quatro coletores.

- Mantendo-se o valor de $F_R U_L$ em 6 e variando-se $F_R(\tau_\alpha)$ de 0,5 para 0,7, o ganho de energia térmica solar variou de 46,7% para 53,76%, respectivamente, para sistemas de um coletor e quatro coletores. Variando-se $F_R(\tau_\alpha)$ de 0,7 para 0,85, o ganho de energia térmica solar variou de 24,60% a 27,25%, respectivamente, para sistemas com um e dois coletores.

Variando-se de 0,5 para 0,85, o ganho de energia térmica solar variou de 82,8% a 94,51%, respectivamente para sistemas com um coletor e quatro coletores.

Tabela 5.8 – Comparativo do ganho de energia para várias qualidades de coletores

Nº coletor	Energia térmica solar (MJ)	Ganho energia solar comparativo % $F_R U_L$	Ganho energia solar comparativo % $F_R(\tau\alpha)$	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	Eficiência solar (%)
1	781.6		50.14	10425.6	4690.5	0,5	10	23.1
	837.5	7.15	48.69	10430.6	4751.5		8	24.8
	904.4	7.99	46.70	10400.1	4787.9		6	26.8
	1173.5		26.37	9855.8	4513	0,7	10	34.8
	1245.3	6.12	26.18	9901.4	4630.3		8	36.9
	1326.8	6.54	24.60	9681.4	4491.4		6	39.3
	1482.9		89.73	9478.5	4445.2	0,85	10	43.9
	1571.3	5.96	87.62	9443.3	4498		8	46.6
	1653.2	5.21	82.80	9293.9	4430.5		6	49
2	1346.6		55.61	9681.2	4511.2	0,5	10	19.9
	1508.5	12.02	51.23	9504	4495.9		8	22.3
	1664.1	10.31	48.24	9230.7	4378.2		6	24.7
	2095.4		28.09	8711.7	4290.3	0,7	10	31
	2281.3	8.87	27.14	8468.7	4233.4		8	33.8
	2466.9	8.14	27.25	8119.2	4069.5		6	36.5
	2683.9		99.31	7891.4	4058.5	0,85	10	39.8
	2900.4	8.07	92.27	7633.1	4016.8		8	42.9
	3139.2	8.23	88.64	7379.9	4002.7		6	46.4
4	2228.3		61.27	8605.3	4317.1	0,5	10	16.5
	2572.4	15.44	56.94	8101.5	4157.3		8	19
	2976.8	15.72	53.76	7577.3	4037.6		6	22
	3593.6		30.10	6870.8	3947.9	0,7	10	26.6
	4037	12.34	28.65	6286.3	3806.7		8	29.8
	4577.2	13.38	26.50	5696.3	3756.9		6	33.8
	4675.1		109.81	5648.4	3806.9	0,85	10	34.6
	5193.4	11.09	101.89	5048.3	3725.2		8	38.3
	5790.1	11.49	94.51	4374.8	3648.5		6	42.8
8	3423.3		66.32	7136.8	4043.5	0,5	10	12.6
	4246.8	24.06	55.85	6164.7	3895		8	15.7
	5108.2	20.28	46.13	5151.8	3743.7		6	18.8
	5693.5		26.21	4612.7	3789.9	0,7	10	21
	6618.7	16.25	20.51	3569.7	3671.8		8	24.5
	7464.5	12.78	18.02	2762	3710.1		6	27.6
	7185.9		109.91	3129.2	3798.5	0,85	10	26.6
	7976	11.00	87.81	2420.3	3879.9		8	29.6
	8809.4	10.45	72.46	1686.1	3979.2		6	32.8
10	3970.9		62.53	6511.5	3966	0,5	10	11.8
	4825	21.51	53.26	5640.6	3949.1		8	14.3
	5919.7	22.69	42.18	4314.1	3717.3		6	17.5
	6454		23.23	3934.3	3871.8	0,7	10	19.1
	7394.6	14.57	19.26	2903.8	3781.9		8	21.9
	8416.9	13.82	15.72	1969.8	3870.2		6	25
	7953.4		100.29	2521.6	3958.6	0,85	10	23.6
	8818.9	10.88	82.78	1774.7	4077.4		8	26.3
	9739.7	10.44	64.53	1091.1	4314.4		6	29

5.2.2. Análise da Eficiência dos Coletores na Condição de Referência

Além das simulações efetuadas com diferentes qualidades de coletores, foram também confrontadas as eficiências dos sistemas com diferentes coletores e diferentes condições com a eficiência dos mesmos coletores na condição “de referência”. A condição de referência foi definida como: radiação solar de 800 W/m^2 , com a temperatura de entrada da água no coletor igual a $50 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura ambiente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo a eficiência calculada de acordo com a equação 5.1:

$$\eta = F_R \left[(\tau\alpha) - \frac{U_L(T_e - T_a)}{G_T} \right] \quad (5.1)$$

onde η é a eficiência, G_T é a radiação solar incidente no plano do coletor, T_e é a temperatura de entrada da água e T_a é a temperatura ambiente, F_R é o fator de remoção de calor, representando a capacidade do coletor transferir calor da placa para a água; $(\tau\alpha)$ é o produto da transmitância-absortância efetiva; U_L é o coeficiente global de perdas, que reúne todas as perdas térmicas do coletor.

Neste sentido, o gráfico da Figura 5.14 apresenta o valor da eficiência calculada para os coletores nas condições especificadas, tendo sido verificado que o aumento do parâmetro $F_R(\tau\alpha)$ provoca a elevação da eficiência do coletor. Observa-se, ainda, que o valor da eficiência foi o mesmo para o conjunto de pontos de $(F_R(\tau\alpha), F_R U_L)$ igual a $(0,7;6)$ e $(0,85;10)$. Para os gráficos das seções que seguem, a eficiência correspondente à combinação $(F_R(\tau\alpha), F_R U_L)$ igual a $(0,85;10)$ foi suprimida.

Na Figura 5.15 é apresentado um gráfico relacionando a eficiência do sistema solar com a eficiência do coletor de referência, sendo que a primeira foi obtida por meio das simulações realizadas com o programa TERMOSIM. A comparação entre as eficiências foi realizada com um, dois, quatro, oito e dez coletores instalados.

A figura demonstra, como era esperado, que o aumento na qualidade dos coletores beneficia diretamente o desempenho do sistema. A eficiência do sistema, que envolve perdas térmicas nas tubulações e conexões hidráulicas é sensivelmente menor que a eficiência dos coletores, também porque as condições efetivas ao longo do ano são menos favoráveis do que as condições de referência.

A tabela com os referidos valores encontra-se no Apêndice V.

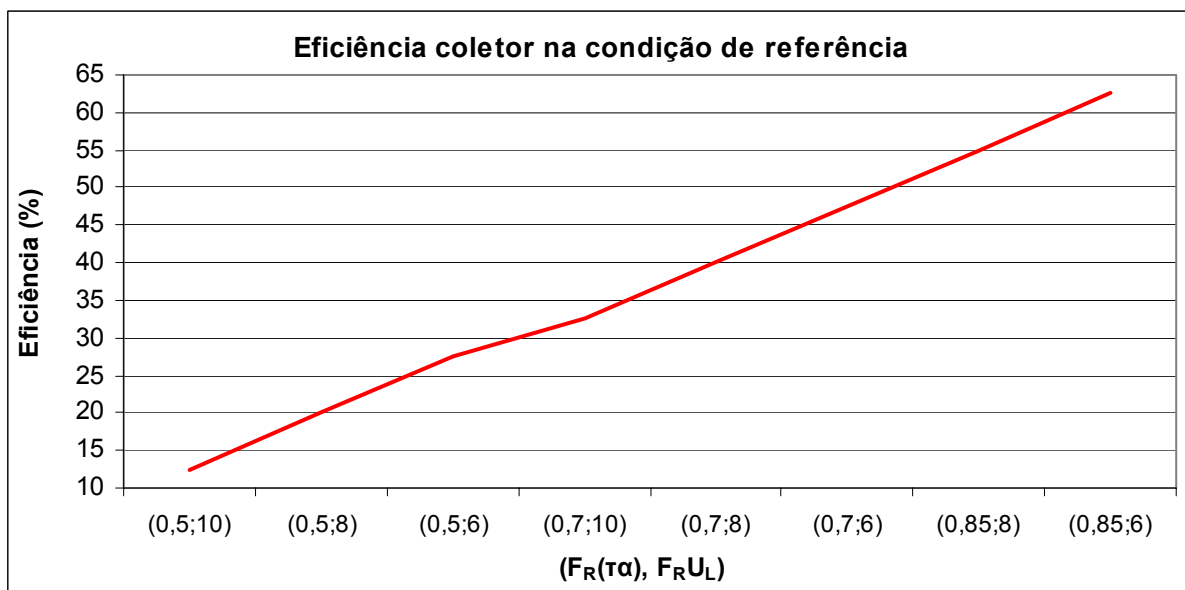


Figura 5.14 – Gráfico de eficiência do coletor na condição de referência

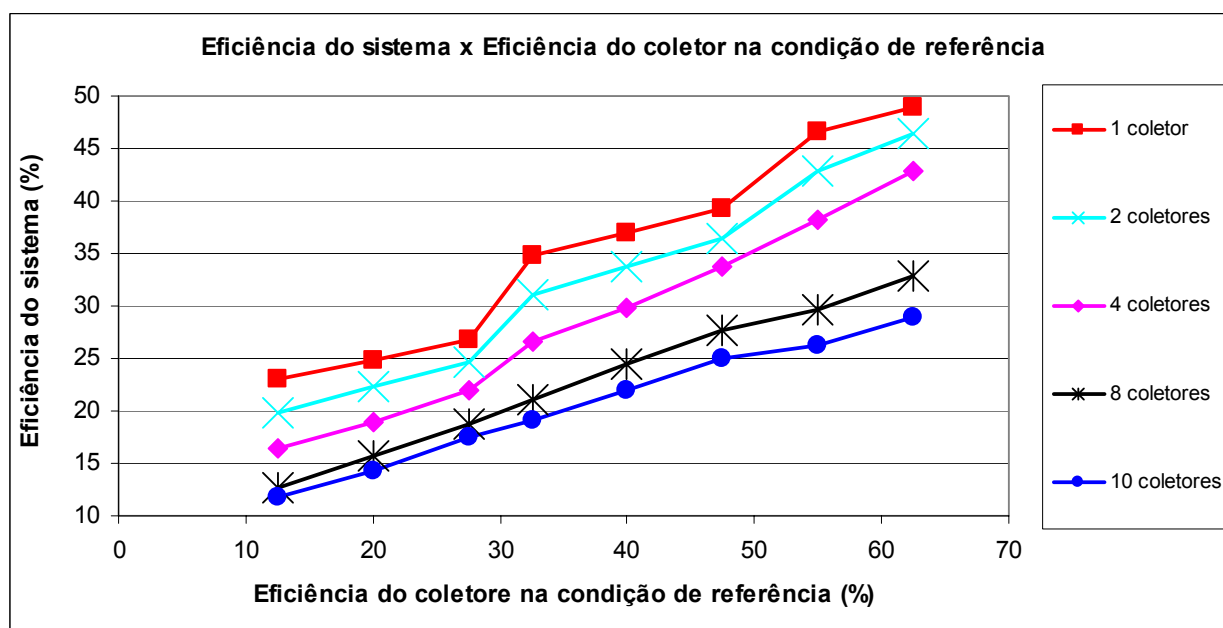


Figura 5.15 – Gráfico de eficiência do sistema em função da eficiência do coletor nas condições de referência

5.2.3. Análise dos Resultados

O parâmetro $F_R(\tau)$ tem uma influência relevante no desempenho energético dos sistemas de aquecimento, em comparação ao parâmetro F_{RU_L} , pois a quantidade de energia

térmica solar apresentou acentuado crescimento com aumento de $F_R(\tau\alpha)$ e com a manutenção do parâmetro $F_R U_L$. Por outro lado, variando-se o parâmetro $F_R U_L$ e mantendo-se constante o parâmetro $F_R(\tau\alpha)$, a quantidade de energia térmica solar não apresentou um avanço tão significativo quanto o que aconteceu com o parâmetro $F_R(\tau\alpha)$.

Shariah e Löf, 1997, constaram que ocorrendo a redução do parâmetro $F_R(\tau\alpha)$ e o aumento do parâmetro $F_R U_L$, a eficiência do coletor e a fração solar do sistema diminuíram entre 25% e 50% para todos os volumes de reservatórios, confirmando o que foi demonstrado ao longo deste item, ou seja, que o aumento do parâmetro $F_R(\tau\alpha)$ resulta em um ganho de energia muito significativo para o sistema.

5.3. Correlação para a Eficiência Térmica

Um dos objetivos desta dissertação é obter uma equação geral que revele o valor da eficiência solar média sem a necessidade de efetuar várias simulações. Para formular tal equação foi feita a suposição de que alguns parâmetros interferem na eficiência mensal de forma independente e o efeito de cada um deles pode ser considerado como um fator. Este fator teria o valor unitário sempre que o sistema coincidissem com os parâmetros de um caso definido como “típico”, cuja eficiência mensal pudesse ser considerada como um valor de referência. O produto desta eficiência mensal de referência com todos os fatores resultaria na eficiência mensal procurada.

Esta equação assume, assim, a forma apresentada em 5.2.

$$\eta = \eta_{CT} \times P_1 \times P_2 \times \dots \times P_N \quad (5.2)$$

onde:

η = eficiência da correlação

η_{CT} = eficiência média mensal do sistema solar para o caso típico

P_1 = fator do parâmetro 1

P_2 = fator do parâmetro 2

P_N = fator do parâmetro N.

Foram realizadas 3456 simulações para a cidade de Porto Alegre – RS, que produziram mais de 41000 dados mensais de eficiência térmica para diversas configurações de sistemas com os diferentes parâmetros listados a seguir:

Tabela 5.9 – Parâmetros das simulações

Volume de reservatório	0,1;0,2;0,4 e 0,8 m ³
Altura do termostato	50 e 75% da altura do reservatório
Número de coletores	1,2,4 e 8
Demanda de água quente	20%, 50% e 80% do volume do reservatório
Qualidade do coletor	$F_R(\tau\alpha)$: 0,5;0,7 e 0,85
	F_RU_L : 6,8 e 10 W/m ² °C

Definiu-se o caso típico da instalação, que foi utilizado como base para a obtenção da equação de correlação com as características mostradas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Parâmetros do caso típico

Número de Coletores	4
Volume do Reservatório	0,4 m ³
Altura do Termostato	75% da altura do reservatório
Volume de Demanda de Água Quente	50% do volume do reservatório
Qualidade do Coletor	$F_R(\tau\alpha) = 0,7$
	$F_RU_L = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$

Na Tabela 5.11 é apresentada a eficiência do sistema solar do caso típico para os diversos meses do ano, em valor médio mensal.

Através do caso típico foram definidos quais os parâmetros que seriam modificados, a fim de obter as equações representativas dos mesmos. Os parâmetros escolhidos estão listados a seguir:

- P1 = Volume do Reservatório / Área de Coletor;
- P2 = Volume de Demanda / Área de Coletor;
- P3 = Índice de Qualidade do Coletor;
- P4 = Altura do termostato.

Na correlação não foi considerada a influência da razão de aspecto, temperatura do termostato e altura das tubulações.

O procedimento realizado consistiu em variar apenas um dos parâmetros listados por vez do caso típico e obter a eficiência do mesmo. De posse desta eficiência, a mesma foi normalizada em relação ao caso típico, elaborando um gráfico para posterior obtenção da equação de ajuste dos pontos. Esta equação foi obtida através do uso do programa Excel.

Para o parâmetro P1 foi obtida a equação 5.3, sendo o fator resultante denominado θ , obtido através da variação da relação entre o volume do reservatório e a área de coletor. O fator de Correlação para os pontos ajustados pela equação 5.3 foi de 0,974.

$$\theta = \left(0,2957 \times \ln \left(\frac{\text{Volume Reservatório}}{\text{Área Coletor}} \right) \right) + 1,4169 \quad (5.3)$$

onde o volume de reservatório é dado em m³ e a área de coletores é dada em m².

Tabela 5.11 – Eficiência média mensal do sistema solar para o caso típico

Mês	Eficiência (%)
Janeiro	38
Fevereiro	38,8
Março	40,1
Abril	40,5
Maio	40,8
Junho	39,7
Julho	39,7
Agosto	40
Setembro	38,4
Outubro	38,2
Novembro	37,5
Dezembro	37,1

Para o parâmetro P2 foi obtida a equação 5.4, cujo fator foi denominado Φ , sendo este resultante da variação da relação entre a demanda de água quente e a área de coletor. O fator de Correlação para os pontos ajustados pela equação 5.4 foi de 0,936.

$$\phi = 1,8823 \times \left(\frac{\text{Demanda Água Quente}}{\text{Área Coletor}} \right)^{0,3238} \quad (5.4)$$

onde a demanda de água quente é o volume de água quente a ser consumida em m³ e a área de coletores é expressa em m².

Para o parâmetro P3 foi obtida a equação 5.5, cujo fator foi denominado δ , em razão da variação da qualidade do coletor. O fator de Correlação para os pontos ajustados pela equação 5.5 foi de 0,986.

$$\delta = (0,0137 \times \text{Indice.Qualidade.Coletor}) + 0,44471 \quad (5.5)$$

onde o índice de qualidade do coletor é a eficiência do coletor determinada utilizando a Equação 2.3 utilizando G = radiação solar (= 800 W/m²), T_e = temperatura de entrada da água no coletor (= 50 °C), T_a = temperatura ambiente (= 20 °C), $F_R(\tau\alpha)$ e $F_R U_L$ de acordo com o coletor utilizado.

Para o último parâmetro P4 foi obtida a equação 5.6, cujo fator foi ω , sendo este influenciado pela altura do termostato, número de coletores, volume do reservatório e demanda de água quente. O fator de Correlação para os pontos ajustados pela equação 5.6 foi de 0,879.

$$\omega = 0,707904464 \times (1,009041)^{\text{Alt.Termostato}} \times (1,123393)^{\text{N}^\circ\text{Coletor}} \times (0,4406862)^{\text{Volume}} \times (0,994317)^{\text{Consumo}} \quad (5.6)$$

onde a *Alt.Termostato* é a altura do termostato em percentual (%) da altura do reservatório, *N°Coletor* é o número de coletores instalados, *Volume* é o volume do reservatório em m³, *Consumo* é o volume de água quente a ser consumida em percentual (%) do volume do reservatório.

Com os fatores já determinados, a equação 5.2 pode ser reescrita conforme apresentado na equação 5.7.

$$\eta = \eta_{CT} \times \theta \times \phi \times \delta \times \omega \quad (5.7)$$

onde η = eficiência da correlação;

η_{CT} = eficiência média mensal do sistema solar para o caso típico;

θ = fator devido à variação da relação do volume do reservatório e a área de coletor;

Φ = fator devido à variação da relação da demanda de água quente e a área de coletor;

δ = fator devido à variação da qualidade dos coletores;

ω = fator devido a altura do termostato.

Observa-se que os resultados obtidos para a equação 5.6 são válidos para os dados constantes na Tabela 5.9.

Na Figura 5.16 é apresentada graficamente a comparação entre os resultados calculados através da correlação e os simulados utilizando o programa TERMOSIM.

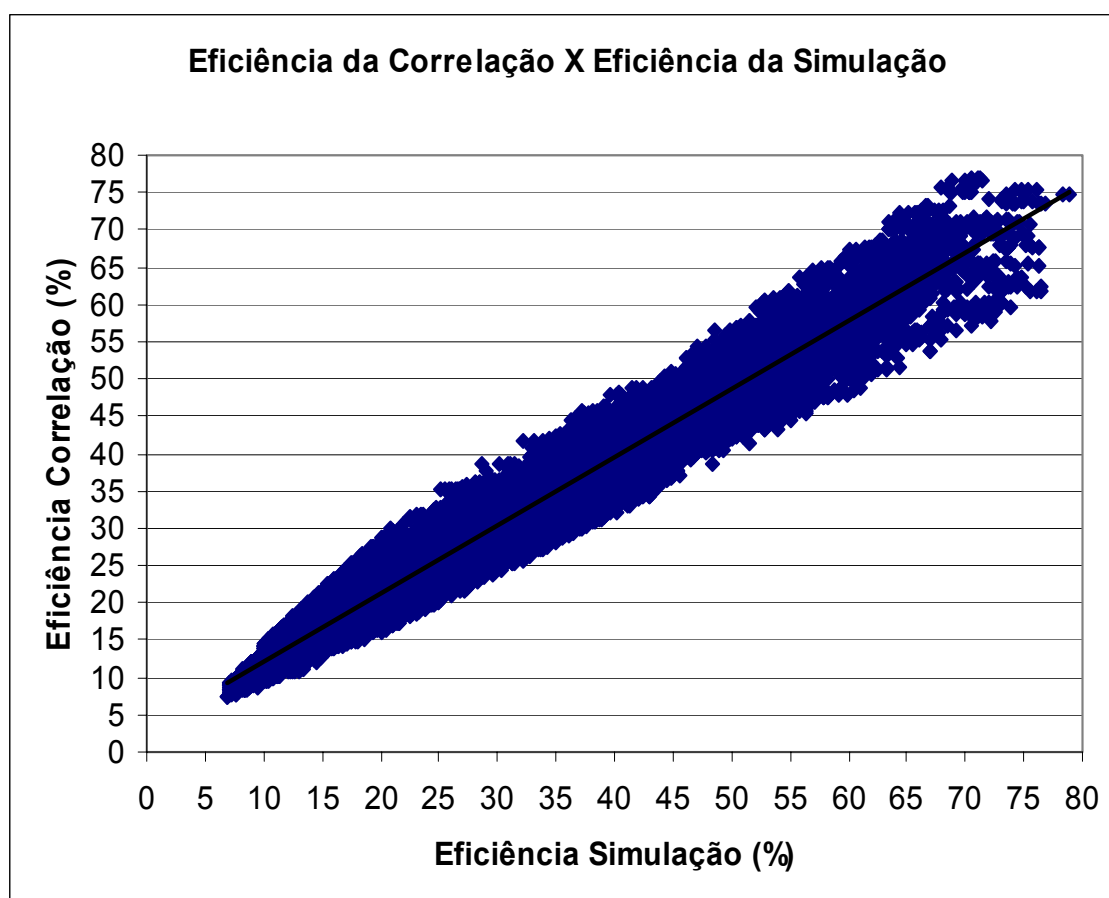


Figura 5.16 – Gráfico da eficiência térmica mensal: Correlação versus Simulação

O desvio relativo médio dos valores obtidos com a correlação, comparando com os valores gerados através das simulações com o programa TERMOSIM, foi de 8,3% e o desvio absoluto foi de 10,8%, sendo que 78,5% dos casos apresentaram desvio menor que 10%.

5.3.1. Aplicação da Correlação Desenvolvida na Obtenção da Eficiência Térmica do Sistema de Aquecimento de Água por Energia Solar.

Com a finalidade de ilustrar o uso da metodologia desenvolvida para a obtenção da eficiência térmica de um sistema de aquecimento de água por energia solar operando por termossifão, será realizado o cálculo para a situação abaixo apresentada.

Tabela 5.12 – Dados para cálculo da eficiência através da correlação

Número de Coletores	8
Volume do Reservatório	0,8 m ³
Altura do Termostato	50% da altura do reservatório
Volume de Demanda de Água Quente	50% do volume do reservatório
Qualidade do Coletor	$F_R(\tau\alpha) = 0,85$
	$F_R U_L = 6 \text{ W/m}^2\text{°C}$

Resolução:

1° - Determinar a relação volume do reservatório e área de coletor e aplicar na equação 5.3.

$$\theta = 0,9012$$

2° - Determinar a relação demanda de água quente e área de coletor e aplicar na equação 5.4.

$$\Phi = 0,8550$$

3° - Determinar a qualidade do coletor através da equação 2.3.

$$\eta = 62,5$$

Depois de calculada a eficiência, aplicar o resultado da qualidade do coletor na equação 5.5.

$$\delta = 1,30$$

4° - Determinar o fator de ajuste devido à altura do termostato através da equação 5.6.

$$\omega = 1,07$$

5° - Calcular a eficiência média mensal a partir dos valores constantes na Tabela 5.11 através da equação 5.7.

Tabela 5.13 – Comparação entre resultados da correlação e da simulação

Mês	Eficiência CORRELAÇÃO (%)	Eficiência SIMULAÇÃO (%)	Diferença (%)
Janeiro	40,7	41,9	-1,2
Fevereiro	41,6	44,2	-2,6
Março	42,9	45,4	-2,5
Abril	43,4	47,2	-3,8
Maiο	43,7	46,7	-3,0
Junho	42,5	44,4	-1,9
Julho	42,5	45,1	-2,6
Agosto	42,8	45,8	-3,0
Setembro	41,1	44,9	-3,8
Outubro	40,9	44,8	-3,9
Novembro	40,1	44,3	-4,2
Dezembro	39,7	41,2	-1,5

A diferença apresentada na Tabela 5.13 demonstra coerência entre os valores obtidos entre a correlação e a simulação.

6. CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho era realizar um estudo sobre a influência que os aspectos construtivos, o aspecto de utilização e o aspecto de qualidade dos materiais exerciam na eficiência do sistema de aquecimento de água por energia solar, realizando simulações com o programa TERMOSIM, para a cidade de Porto Alegre – RS e obter procedimento de correlação entre diversos parâmetros construtivos e a eficiência média do sistema de aquecimento solar.

As simulações foram efetuadas com a finalidade de identificar quais os parâmetros que apresentariam uma maior influência na eficiência do sistema de aquecimento solar, sendo possível salientar as seguintes conclusões obtidas ao longo do trabalho:

- O aumento da área de coletores no sistema acarreta o aumento da participação da energia solar no aquecimento da água. Com o consumo de 200 litros e simulações realizadas com áreas entre 0,6 e 8,4 m², representadas por diferentes números de coletores, mostraram que o ganho de energia térmica solar foi expressivo até o número de 8 coletores instalados (84 l/m²), razão pela qual o acréscimo de mais coletores não será benéfico para o sistema, tanto do ponto de vista energético como financeiro.

- O aumento do volume do reservatório deve estar sempre associado com o acréscimo do número de coletores, devendo ser mantido o valor da relação entre o volume do reservatório e área de coletores próxima a valores situados entre 50 a 100 l/m². Nos sistemas que possuem volume de reservatório pequeno, a temperatura de operação torna-se elevada diminuindo a eficiência dos coletores e com isso produzindo um aumento da participação da energia auxiliar. Por sua vez, o uso de reservatórios grandes sem o aumento da área de coletores eleva a eficiência nos coletores, havendo a necessidade de um consumo maior de energia do gás.

- A instalação do termostato próximo ao fundo do reservatório faz com que a temperatura da água localizada nesta região fique mais elevada, restringindo a captação da energia solar pelo coletor, provocando a redução da circulação de água pelo efeito termossifão e, conseqüentemente, a redução da eficiência do coletor. Por outro lado, quanto mais alto estiver o termostato localizado no tanque, menor será o uso da energia térmica do gás, pois o sistema de aquecimento solar irá trabalhar com uma temperatura menor no fundo do reservatório, aumentando a eficiência do coletor. Mesmo assim, não é recomendado que o termostato seja instalado nas porções superiores do reservatório, porque o volume de água aquecida seria insuficiente para atender a demanda de água quente.

- A razão de aspecto do reservatório, de acordo com as simulações realizadas com o programa TERMOSIM, não influenciou no resultado dos valores obtidos para a energia térmica solar, para a energia térmica do gás e para a eficiência do sistema. Entretanto, sabe-se que segundo a literatura, a razão de aspecto produz um maior grau de estratificação nos reservatórios, o que conseqüentemente geraria alguma influência no desempenho energético do sistema de aquecimento. Portanto, este item deverá ser mais explorado em trabalhos futuros que utilizarão o programa TERMOSIM.

- O mesmo consumo de água quente associado ao acréscimo do volume do reservatório ocasiona a elevação da eficiência do sistema e também da energia térmica solar. Por sua vez, o aumento do número de coletores juntamente com o maior consumo de água quente produz um acréscimo na energia térmica solar.

- O parâmetro $F_R(\tau\alpha)$ exerce grande influência no desempenho energético dos sistemas de aquecimento em comparação ao parâmetro $F_R U_L$, porque o ganho de energia térmica solar apresentou acentuado crescimento com aumento de $F_R(\tau\alpha)$ e com a manutenção do parâmetro $F_R U_L$, em relação ao ganho apresentado com a diminuição de $F_R U_L$ e com a manutenção de $F_R(\tau\alpha)$.

- Foi possível desenvolver uma sistemática para o desenvolvimento de uma equação (equação 5.7), a fim de obter a eficiência térmica de um sistema de aquecimento de água por energia solar, por meio da realização de uma correlação com os valores de eficiência térmica alcançados com as simulações realizadas para as diferentes situações. Os valores de eficiência térmica calculados através da equação desenvolvida apresentaram um desvio padrão em torno de 10%. Com isto, a metodologia desenvolvida torna-se uma ferramenta de grande valia para a obtenção da eficiência térmica de sistemas de aquecimento de água por energia solar utilizando como fonte de energia auxiliar o gás.

Como continuidade do trabalho, sugere-se a realização de simulações para outras cidades com os mesmos parâmetros usados no presente trabalho, assim como a utilização de um maior número de coletores solares e valores para o volume de reservatório, diferentes perfis de consumo de água quente, alturas de termostato e temperaturas de consumo de água, a fim de obter maior quantidade de dados para a elaboração de novas correlações e também a execução de uma análise econômica em relação ao custo de instalação, operação e de manutenção do sistema. Além disso, seria interessante também determinar uma correlação que apresentasse como resultado o consumo de gás. A realização de outras simulações irá auxiliar na obtenção rápida e simplificada da eficiência térmica do sistema de aquecimento de água por energia solar para um número maior de situações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988 – **Coletores Solares Planos para Líquidos, Determinação do Rendimento térmico, Método de Ensaio (NBR10184)**, Rio de Janeiro, Brasil.

Arruda, L. B., 2004. “**Operação de Sistemas de Aquecimento Solar de Água Com Controles de Vazões em Coletores Planos**”, Tese de Doutorado, POLI/USP, São Paulo, Brasil.

ASHRAE – THE AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, 1977 - **Methods of testing to determine the Thermal Performance of solar Collectors (Standard 93-77)** , New York.

Duffie, J. A., Beckman, W. A., 1991. “**Solar Engineering of Thermal Processes**”. Wiley Interscience Publication.

Furbo, S., Andersen, E., Knudsen, S., Vejen, N. K., Shah, L. J., 2005. “Smart Solar Tank for Small Domestic Hot Water Systems”, **Solar Energy**, Vol. 78, pp. 269-279.

Lourenço Junior, I., 2000. “**Estudo de um Sistema de Aquecimento de Água Híbrido-Gas-Solar**”, Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

Knudsen, S., 2002. “Consumer’s Influence on the Thermal Performance of Small SDHW Systems– Theoretical Investigations”, **Solar Energy**, Vol. 73, pp. 33-42.

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

Krenzinger, A., Siqueira, A. M. de O., Oliveski, R. de C., 2003. “AQUESOLGAS”, **17th International Congress of Mechanical Engineering**, São Paulo, Brasil.

Krenzinger, A., Lafay, J. M. S., 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, Brasil.

Lafay, J. M. S., 2005. “**Análise Energética de Sistemas de Aquecimento de Água com Energia Solar e Gás**”, Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

Lima, J. B. A., 2003. “**Otimização de Sistema de Aquecimento Solar de Água em Edificações Residenciais Unifamiliares Utilizando o Programa TRNSYS**”, Dissertação de Mestrado, POLI/USP, São Paulo, Brasil.

Mveh, J. D. B. 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, Brasil.

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

Shariah, A. M., Löf, G. O. G., 1997. "Effects of Auxiliary Heater on Annual Performance of Thermosyphon Solar Water Heater Simulates Under Variable Operation Conditions", **Solar Energy**, Vol. 60, pp. 119-126.

Siqueira, A. M. O., 2003. "**Desenvolvimento de um Programa de Simulação Computacional de Sistemas de Aquecimento Solar para Água**", Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

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

APÊNDICE I – INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE COLETORES

Tabela I.1 – Simulação para 1 coletor.

Mês	Radiação (MJ)	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
Jan	292,2	607,6	108,1	307	37
Fev	286,5	572,2	110,8	300,8	38,7
Mar	269,5	736,7	99,8	362,8	37
Abr	297,6	810,1	116	375,5	39
Mai	253,7	962	94,8	423,8	37,4
Jun	229,7	1058,2	80,8	469,4	35,2
Jul	263,4	1053,2	96,7	463,9	36,7
Ago	280,6	1035,5	105,5	479,8	37,6
Set	277,6	898,8	103,2	398,4	37,2
Out	327,8	827,9	118,9	400	36,3
Nov	285,1	698,7	99,3	338,6	34,8
Dez	308,5	640,5	111,4	310,3	36,1

Tabela I.2 – Simulação para 2 coletores.

Mês	Radiação (MJ)	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
Jan	596,7	519	205,9	310	34,5
Fev	573,3	465,8	207,3	268,7	36,2
Mar	560	622,8	195,9	313,7	35
Abr	568,9	749,4	205,5	382	36,1
Mai	475,5	926,6	159,3	427,9	33,5
Jun	501,1	946,9	161,4	432,8	32,2
Jul	517,7	926,6	169,7	416,2	32,8
Ago	516,4	891,2	166,4	414,8	32,2
Set	637,3	726,6	214,4	355,6	33,6
Out	608,3	676	196,1	352	32,2
Nov	589,2	539,3	194,7	288,2	33
Dez	599,9	478,5	204,7	271,5	34,1

Tabela I.3 – Simulação para 4 coletores.

Mês	Radiação (MJ)	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
Jan	1158,1	324,1	343,7	258,8	29,7
Fev	1164,7	270,9	365,3	243,8	31,4
Mar	1110,2	445,6	339,1	317,9	30,5
Abr	1199,1	458,2	383,5	296,6	32
Mai	957,2	693,7	292,1	355,9	30,5
Jun	958,1	762	266,6	360,9	27,8
Jul	1040,3	792,4	303,3	404,9	29,2
Ago	1114,3	686,1	326,5	352,8	29,3
Set	1102,8	635,5	316,6	344,4	28,7
Out	1322,1	486,1	401,7	335,6	30,4
Nov	1158	397,5	337,5	269,4	29,1
Dez	1203,8	334,2	361,1	265,7	30

Tabela I.4 – Simulação para 8 coletores.

Mês	Radiação (MJ)	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
Jan	2337,7	35,4	593,6	220,3	25,4
Fev	2291,6	35,4	591,1	244,4	25,8
Mar	2155,9	227,9	529,5	283,7	24,6
Abr	2380,9	227,9	622,4	299,5	26,1
Mai	2029,4	511,4	497,5	375,8	24,5
Jun	1837,6	582,3	425	337,6	23,1
Jul	2107,2	539,3	517,8	371	24,6
Ago	2245,2	427,9	546,6	313,3	24,3
Set	2221,1	425,3	528,5	350,3	23,8
Out	2622,4	169,6	665,1	288	25,4
Nov	2280,5	217,7	532,5	290,9	23,4
Dez	2468	169,6	569,1	297	23,1

Tabela I.5 – Simulação para 10 coletores.

Mês	Radiação (MJ)	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
Jan	2942,9	35,4	637,2	262,9	21,7
Fev	2835,3	0	637	247	22,5
Mar	3047,5	70,9	681,1	296,8	22,3
Abr	2906,4	220,3	649,6	335,6	22,4
Mai	2462,7	367,1	565,8	312,9	23
Jun	2264,6	513,9	483,6	336,7	21,4
Jul	2658,1	483,6	602,3	384,7	22,7
Ago	2769,8	384,8	625,7	347,6	22,6
Set	2791	354,4	602,3	343,3	21,6
Out	3172,6	184,8	701,9	327,3	22,1
Nov	2912,5	174,7	599,3	298,2	20,6
Dez	2958,7	113,9	616,1	296,3	20,8

Tabela I.6 – Simulação para 12 coletores.

Mês	Radiação (MJ)	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
Jan	3531,4	35,4	670,9	296,6	19
Fev	3304,6	0	651,3	276	19,7
Mar	3618,7	70,9	698,4	316,3	19,3
Abr	3462,5	136,7	706,3	313,4	20,4
Mai	3101,7	301,3	672,7	352,8	21,7
Jun	2672,1	506,3	514,8	362,8	19,3
Jul	3201	387,3	664,4	350,2	20,8
Ago	3294,1	369,6	673,5	377,8	20,4
Set	3333,6	296,2	647,7	328,4	19,4
Out	3725,3	154,4	746	339,8	20
Nov	3563,4	136,7	679,5	339,3	19,1
Dez	3657,6	103,8	668,8	323,4	18,3

Tabela I.7 – Simulação para 14 coletores.

Mês	Radiação (MJ)	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
Jan	4120	38	704,7	332,9	17,1
Fev	3855,4	0	681,9	306,6	17,7
Mar	4221,8	38	745,7	330,6	17,7
Abr	4039,6	154,4	733,5	358,3	18,2
Maio	3618,7	248,1	684	310,8	18,9
Jun	3117,4	483,6	578,5	403,7	18,6
Jul	3734,6	367,1	708,4	374	19
Ago	3843,1	334,2	709,1	378	18,5
Set	3889,2	248,1	708,3	340,9	18,2
Out	4346,1	151,9	775,8	367	17,8
Nov	4157,3	103,8	720,8	347,7	17,3
Dez	4267,2	93,7	691,8	336,3	16,2

Tabela I.8 – Eficiência dos coletores.

Mês	Eficiência 1 coletor (%)	Eficiência 2 coletores (%)	Eficiência 4 coletores (%)	Eficiência 8 coletores (%)	Eficiência 10 coletores (%)	Eficiência 12 coletores (%)	Eficiência 14 coletores (%)
Jan	37	34,5	29,7	25,4	21,7	19	17,1
Fev	38,7	36,2	31,4	25,8	22,5	19,7	17,7
Mar	37	35	30,5	24,6	22,3	19,3	17,7
Abr	39	36,1	32	26,1	22,4	20,4	18,2
Maio	37,4	33,5	30,5	24,5	23	21,7	18,9
Jun	35,2	32,2	27,8	23,1	21,4	19,3	18,6
Jul	36,7	32,8	29,2	24,6	22,7	20,8	19
Ago	37,6	32,2	29,3	24,3	22,6	20,4	18,5
Set	37,2	33,6	28,7	23,8	21,6	19,4	18,2
Out	36,3	32,2	30,4	25,4	22,1	20	17,8
Nov	34,8	33	29,1	23,4	20,6	19,1	17,3
Dez	36,1	34,1	30	23,1	20,8	18,3	16,2

Tabela I.9 – Energia em função do número de coletores.

Nº de coletores	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	% Energia solar utilizada
1	1245,3	9901,4	4630,3	11,2
2	2281,3	8468,7	4233,4	21,2
4	4037	6286,3	3806,7	39,1
8	6618,7	3569,7	3671,8	65,0
10	7401,9	2903,8	3789,3	71,8
12	7994,3	2498,6	3976,8	76,2
14	8442,5	2260,9	4186,8	78,9

Tabela I.10 – Eficiência do sistema de aquecimento.

Mês	% Fração solar / E. Total c/ 1 coletor	% Fração solar / E. Total c/ 2 coletores	% Fração solar / E. Total c/ 4 coletores	% Fração solar / E. Total c/ 8 coletores	% Fração solar / E. Total c/ 10 coletores	% Fração solar / E. Total c/ 12 coletores	% Fração solar / E. Total c/ 14 coletores
Jan	15,1	28,4	51,5	94,4	94,7	95,0	94,9
Fev	16,2	30,8	57,4	94,3	100,0	100,0	100,0
Mar	11,9	23,9	43,2	69,9	90,6	90,8	95,2
Abr	12,5	21,5	45,6	73,2	74,7	83,8	82,6
Mai	9,0	14,7	29,6	49,3	60,6	69,1	73,4
Jun	7,1	14,6	25,9	42,2	48,5	50,4	54,5
Jul	8,4	15,5	27,7	49,0	55,5	63,2	65,9
Ago	9,2	15,7	32,2	56,1	61,9	64,6	68,0
Set	10,3	22,8	33,3	55,4	63,0	68,6	74,1
Out	12,6	22,5	45,2	79,7	79,2	82,9	83,6
Nov	12,4	26,5	45,9	71,0	77,4	83,3	87,4
Dez	14,8	30,0	51,9	77,0	84,4	86,6	88,1

APÊNDICE II – INFLUÊNCIA DO VOLUME DO RESERVATÓRIO

Tabela II.1 – Resumo dos casos para volume

TQ = 0,1 m³.

Resumo dos casos simulados volume TQ=0,1 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	5903,9	549,6	4824,4	16,2
2	5633	957,1	4960,7	14,1
4	5081,3	1540,3	4992,3	11,3
6	4536,6	1978,8	4886,4	9,7
8	4146,9	2261,1	4778,8	8,3
10	3957,1	2438	4765,8	7,1

Tabela II.2 – Resumo dos casos para volume

TQ = 0,2 m³.

Resumo dos casos simulados volume TQ=0,2 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	6321,7	929,5	3993	27,5
2	5524,1	1694	3959,9	25
4	4015,3	2972,9	3729,9	21,9
6	3263,3	3800,4	3805,5	18,7
8	2529,1	4537,2	3808,1	16,8
10	2240,5	4931,1	3913,6	14,5

Tabela II.3 – Resumo dos casos para volume

TQ = 0,4 m³.

Resumo dos casos simulados volume TQ=0,4 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	9810,3	1249,8	4543,4	37,1
2	8445,5	2281,7	4210,9	33,8
4	6296,3	4036,6	3816,7	29,8
6	4767	5469,1	3719,8	26,9
8	3569,7	6621,8	3675,1	24,5
10	2903,7	7400,3	3787,6	21,9

Tabela II.4 – Resumo dos casos para volume

TQ = 0,6 m³.

Resumo dos casos simulados volume TQ=0,6 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	13597,8	1431,6	5254,6	42,5
2	11904	2605,4	4734,7	38,6
4	9270,9	4672,3	4168,5	34,6
6	7311,6	6380,1	3916,9	31,5
8	5719	7881	3825,6	29,2
10	4536,9	8991,5	3753,6	26,6

Tabela II.5 Resumo dos casos para volume

TQ = 0,8 m³.

Resumo dos casos simulados volume TQ=0,8 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	16752,2	1532,8	5252,1	45,5
2	15162,5	2803,5	4932,9	41,5
4	12410,4	5054,3	4431,9	37,4
6	10245,7	6956,7	4169,5	34,3
8	8385,2	8696,2	4048,2	32,2
10	6724,2	10319,7	4011	30,5

Tabela II.5 Resumo dos casos para volume

TQ = 1 m³.

Resumo dos casos simulados volume TQ=1 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	20359,8	1637,5	5705,9	48,7
2	18575	3010,6	5294,6	44,7
4	15800,3	5415,3	4924,3	40,2
6	13071,2	7607,3	4387,3	37,6
8	10919,1	9500,7	4128,9	35,2
10	9227,9	11069,8	4006,5	32,8

APÊNDICE III – INFLUÊNCIA DA ALTURA DO TERMOSTATO

Tabela III.1 – Altura do termostato igual a 50% da altura do reservatório e volume igual 0,1 m³.

Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	5903,9	548,3	4823	16,2
2	5623	959,3	4953	14,1
4	5083,8	1539,6	4994	11,3
8	4126,6	2268,9	4766,2	8,3
10	3936,8	2447,6	4755,1	7,2

Tabela III.2 – Altura do termostato igual a 50% da altura do reservatório e volume igual 0,2 m³.

Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	6299	941,9	3982,5	27,9
2	5481,1	1694,2	3917	25,1
4	3987,3	2979,4	3708,6	21,9
8	2529,3	4534	3804,9	16,8
10	2253,1	5009,1	4004,2	14,8

Tabela III.3 – Altura do termostato igual a 50% da altura do reservatório e volume igual 0,4 m³.

Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	9901,4	1245,3	4630,3	36,9
2	8468,7	2281,3	4233,4	33,8
4	6286,3	4037	3806,7	29,8
8	3569,7	6618,7	3671,8	24,5
10	2903,8	7396,2	3783,5	21,9

Tabela III.4 – Altura do termostato igual a 50% da altura do reservatório e volume igual 0,8 m³.

Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	16704,2	1538	5209,1	45,7
2	15131,7	2815	4914,1	41,8
4	12554,8	5028	4549,8	37,3
8	8245,8	8711	3923,7	32,3
10	6721,5	10311,2	4000,2	30,5

Tabela III.5 – Altura do termostato igual a 50% da altura do reservatório e volume igual 1 m³.

Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	9539,3	1432,9	4358,6	42,4
2	8002,7	2612,4	4001,5	38,7
4	5574,8	4731	3691,9	35
8	2321,5	7840,1	3548	29
10	1513,9	8768,8	3669,2	26,1

Tabela III.6 – Altura do termostato igual a 75% da altura do reservatório e volume igual 0,1 m³.

Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	3984,9	993,4	3349,2	29,5
2	3374,7	1595,9	3341,7	23,7
4	2645,8	2409,7	3426,3	17,8
8	1848,1	3242,7	3461,9	11,9
10	1729	3368,1	3467,9	9,9

Tabela III.7 –Altura do termostato igual a 75% da altura do reservatório e volume igual 0,2 m³.

Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	5025,3	1319,1	3086,2	39,1
2	3774,9	2266,1	2782,7	33,5
4	2351,7	3715,7	2809,3	27,5
8	1227,9	5215,6	3185,4	19,3
10	992,7	5629,9	3364,1	16,8

Tabela III.8 –Altura do termostato igual a 75% da altura do reservatório e volume igual 0,4 m³.

Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	8501,3	1743,7	3728,6	51,8
2	6711,6	3078,3	3273,3	45,7
4	4149,5	5264,2	2897,1	39
8	1797,7	7738,4	3019,4	28,8
10	1235,5	8458,1	3176,9	25,2

Tabela III.9 –Altura do termostato igual a 75% da altura do reservatório e volume igual 0,8 m³.

Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	15531,9	1927,8	4426,9	57,3
2	13726,9	3494	4187,9	51,8
4	10486,4	6266	3719,5	46,5
8	5655,9	10643,3	3266,1	39,5
10	4167,1	12095,2	3229,1	35,9

Tabela III.10 –Altura do termostato igual a 75% da altura do reservatório e volume igual 1 m³.

Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	8066	1746,5	3198,7	51,8
2	6438	3148,3	2972,9	46,8
4	3845,6	5620,6	2852,5	41,7
8	1068,5	8631,4	3086,2	32,1
10	640,5	9365,7	3392,6	27,9

APÊNDICE IV – INFLUÊNCIA DO CONSUMO DE ÁGUA QUENTE

Tabela IV.1 - Resumo dos casos simulados consumo 20% com volume do tanque igual 0,1 m³.

Resumo dos casos simulados consumo 20% com volume do tanque igual 0,1 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	550	5098,9	4997	16,1
2	984,9	4711,6	5044,5	14,4
4	1695,5	3898,8	4942,8	12,4
8	2491	2931,7	4771,1	9,1
10	2633,6	2820,3	4802,2	7,7

Tabela IV.4 - Resumo dos casos simulados consumo 20% com volume do tanque igual 0,8 m³.

Resumo dos casos simulados consumo 20% com volume do tanque igual 0,8 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	1347,6	7947,1	4081,5	39,9
2	2504,1	6658,3	3949,1	37,1
4	4526,6	4314	3627,4	33,4
8	7195,5	1741,7	3724,2	26,7
10	8019,7	1197,6	4004,1	23,8

Tabela IV.2- Resumo dos casos simulados consumo 20% com volume do tanque igual 0,2 m³.

Resumo dos casos simulados consumo 20% com volume do tanque igual 0,2 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	883,6	4255,7	3836,2	26,1
2	1620,6	3450,7	3768,1	23,9
4	2840,3	2182,4	3719,2	20,9
8	4170	1359,6	4226,2	15,4
10	4562,4	1248,1	4507	13,5

Tabela IV.5 -Resumo dos casos simulados consumo 20% com volume do tanque igual 1 m³.

Resumo dos casos simulados consumo 20% com volume do tanque igual 1 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	1428,6	9387,6	4299,8	42,3
2	2614,7	7861	3959,2	38,8
4	4698,8	5516,6	3698,6	34,8
8	7814,7	2238	3536,4	28,9
10	8710,9	1513,9	3708,3	25,9

Tabela IV.3- Resumo dos casos simulados consumo 20% com volume do tanque igual 0,4 m³.

Resumo dos casos simulados consumo 20% com volume do tanque igual 0,4 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	1126,1	5346,9	3866,4	33,3
2	2075,5	4253,2	3722,3	30,7
4	3697,8	2422,9	3513,7	27,3
8	5573,8	1035,6	4002,9	20,7
10	6159,9	822,8	4376,2	18,3

Tabela IV.6- Resumo dos casos simulados consumo 50% com volume do tanque igual 0,1 m³.

Resumo dos casos simulados consumo 50% com volume do tanque igual 0,1 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	548,3	5903,9	4823	16,2
2	959,3	5623	4953	14,1
4	1539,6	5083,8	4994	11,3
8	2268,9	4126,6	4766,2	8,3
10	2447,6	3936,8	4755,1	7,2

Tabela IV.7 – Resumo dos casos simulados consumo 50% com volume do tanque igual 0,2 m³.

Resumo dos casos simulados consumo 50% com volume do tanque igual 0,2 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	941,9	6299	3982,5	27,9
2	1694,2	5481,1	3917	25,1
4	2979,4	3987,3	3708,6	21,9
8	4534	2529,3	3804,9	16,8
10	5009,1	2253,1	4004,2	14,8

Tabela IV.10 Resumo dos casos simulados consumo 50% com volume do tanque igual 1 m³.

Resumo dos casos simulados consumo 50% com volume do tanque igual 1 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	1432,9	9539,3	4358,6	42,4
2	2612,4	8002,7	4001,5	38,7
4	4731	5574,8	3691,9	35
8	7840,1	2321,5	3548	29
10	8768,8	1513,9	3669,2	26,1

Tabela IV.8 – Resumo dos casos simulados consumo 50% com volume do tanque igual 0,4 m³.

Resumo dos casos simulados consumo 50% com volume do tanque igual 0,4 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	1245,3	9901,4	4630,3	36,9
2	2281,3	8468,7	4233,4	33,8
4	4037	6286,3	3806,7	29,8
8	6618,7	3569,7	3671,8	24,5
10	7396,2	2903,8	3783,5	21,9

Tabela IV.11 – Resumo dos casos simulados consumo 80% com volume do tanque igual 0,1 m³.

Resumo dos casos simulados consumo 80% com volume do tanque igual 0,1 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	610,9	6840,6	4844,9	18
2	1064,8	6627,9	5086,1	15,7
4	1596,4	6202,4	5192,4	11,8
8	2279	5344,2	5016,6	8,3
10	2373,9	5230,5	4997,7	7

Tabela IV.9 – Resumo dos casos simulados consumo 50% com volume do tanque igual 0,8 m³.

Resumo dos casos simulados consumo 50% com volume do tanque igual 0,8 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	1538	16704,2	5209,1	45,7
2	2815	15131,7	4914,1	41,8
4	5028	12554,8	4549,8	37,3
8	8711	8245,8	3923,7	32,3
10	10311,2	6721,5	4000,2	30,5

Tabela IV.12 – Resumo dos casos simulados consumo 80% com volume do tanque igual 0,2 m³.

Resumo dos casos simulados consumo 80% com volume do tanque igual 0,2 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	956,7	8612,9	4356,5	28,3
2	1685,1	7815,4	4287	24,8
4	2867,5	6493,7	4148	21,1
8	4538,8	4754,5	4080,1	16,8
10	5120,9	4324,2	4231,8	15,1

**Tabela IV.13 – Resumo dos casos simulados
consumo 80% com volume do tanque igual 0,4 m³.**

Resumo dos casos simulados consumo 80% com volume do tanque igual 0,4 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	1306	14329,4	5209	38,7
2	2340,2	12780,1	4694	34,6
4	4119	10633	4325,9	30,4
8	6787,9	7752,1	4113,7	25,1
10	7845,5	6627,8	4047	23,2

**Tabela IV.14 – Resumo dos casos simulados
consumo 80% com volume do tanque igual 0,8 m³.**

Resumo dos casos simulados consumo 80% com volume do tanque igual 0,8 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	1611,4	25438,5	6197,4	47,8
2	2944,9	23835,8	5928	43,7
4	5253,8	20977,7	5378,8	38,9
8	8982,8	16334,3	4464,5	33,3
10	10596,8	14529,3	4273,4	31,3

**Tabela IV.15 Resumo dos casos simulados
consumo 80% com volume do tanque igual 1 m³.**

Resumo dos casos simulados consumo 80% com volume do tanque igual 1 m ³				
Nº de coletores	Energia térmica gás (MJ)	Energia térmica Sol (MJ)	Energia térmica desperdiçada (MJ)	Eficiência solar (%)
1	1443,2	9584,9	4317,2	42,8
2	2645,3	7974,7	3909,4	39,2
4	4715,4	5686,2	3690,6	34,9
8	7931,9	2311,4	3532,5	29,3
10	8788,8	1587,3	3665,5	26,1

APÊNDICE V – INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DO COLETOR

Tabela V.1 – Eficiência do sistema solar versus coletor na condição de referência.

$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	Eficiência coletor nas condições de referência (%)	1 coletor	2 coletores	4 coletores	8 coletores	10 coletores
0,5	10	12,5	23,1	19,9	16,5	12,6	11,8
0,5	8	20	24,8	22,3	19	15,7	14,3
0,5	6	27,5	26,8	24,7	22	18,8	17,5
0,7	10	32,5	34,8	31	26,6	21	19,1
0,7	8	40	36,9	33,8	29,8	24,5	21,9
0,7	6	47,5	39,3	36,5	33,8	27,6	25
0,85	10	47,5	43,9	39,8	34,6	26,6	23,6
0,85	8	55	46,6	42,9	38,3	29,6	26,3
0,85	6	62,5	49	46,4	42,8	32,8	29