

TIAGO FRANCISCO MANEA

AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA SOLAR-GÁS

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica
da Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Engenheiro
Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Francis H. R. França

Porto Alegre
2009



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA SOLAR-GÁS

TIAGO FRANCISCO MANEA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Bardo E. Joseff Bodmann
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Jorge R. S. Zabadal
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre
2009

De modo especial agradeço àqueles que contribuíram de forma significativa para minha formação profissional e pessoal.
Meus pais, Sérgio e Lúcia, às minhas irmãs, Simone, Ângela, Valéria e Juliana, à minha noiva Ariane e a todas as amigadas que construí.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me dar a dádiva da vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Francis H. R. França que acompanhou de perto a evolução deste trabalho.

Ao professor Arno Krenzinger pela tarde de conversa que valeu por “um ano” de estudos.

Aos docentes da Engenharia Mecânica por compartilharem seus conhecimentos para a formação de grandes profissionais.

Aos funcionários da UFRGS que são de suma importância para a manutenção desta universidade.

À FEEBURG Representações pelos orçamentos, informações técnicas e pela atenção concedida.

“Há homens que lutam um dia e são bons.
Há outros que lutam um ano e são melhores.
Há os que lutam muitos anos e são muito bons.
Porém, há os que lutam toda a vida.
Esses são os imprescindíveis.”

Bertolt Brecht

MANEA, T. F. **Avaliação de Sistemas de Aquecimento de Água Solar-gás**. 2009. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RESUMO

Neste trabalho realizou-se a simulação computacional de sistemas de aquecimento de água solar-gás através do programa TERMOSIM, visando atender o consumo de uma casa popular hipotética situada em Porto Alegre. Foram simulados sistemas combinando reservatórios de 300, 400, 500 e 600 litros acoplados a 1, 2, 3, 4 e 5 coletores. Os resultados mostraram que a eficiência destes sistemas diminui à medida que se aumenta o número de coletores e ao diminuir o volume do reservatório. Fato que está diretamente relacionado com a temperatura da água circulante no interior dos coletores, e a estratificação da temperatura da água acumulada no reservatório. O sistema dimensionado terá dois coletores com área de 1,42m² cada, um reservatório de 400 litros e um aquecedor de passagem a gás para complementar a energia não posta suficiente pela coleta solar. Isto devido o sistema selecionado possuir um fator de contribuição energética solar (Fração Solar) médio anual de 59%. O custo inicial do sistema de R\$4.217,00 será retornado em seis anos e oito meses com TIR estimada em 23,48%.

PALAVRAS-CHAVES: Aquecimento solar, Coletor solar, Reservatório térmico, TERMOSIM, Retorno de investimento.

MANEA, T. F. **Evaluation of Heating Water Solar-gas**. 2009. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ABSTRACT

This work was made using the computer simulation of water solar-gas heating systems through the program TERMOSIM, having in mind a hypothetical popular family house located in Porto Alegre. The simulations were made using combined tanks of 300, 400, 500 and 600 liters coupled to 1, 2, 3, 4 and 5 collectors. The results showed that the efficiency of these systems decreases as it increases the number of collectors and to decrease the tanks volume. This fact is directly related to the temperature of the water circulating inside the collectors, and the stratification of the temperature of water on the reservoir. The chosen system has two collectors with an area of 1.42 m² each, a 400 liters tank and a continuous gas heater to complement the insufficient solar energy output. This is because the selected system has a contributing factor in solar energy (solar fraction) annual average of 59%. The initial system cost R\$ 4217.00 will be returned in six years and eight months with an estimated IRR 23.48%.

KEYWORDS: Solar heating, Solar collector, Heat reservoir, Solar simulation, TERMOSIM Return on investment.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
2.1. Sistema Solar de Aquecimento de Água	1
2.2. Programa TERMOSIM	2
2.2.1. Modelamento Matemático	3
2.2.2. Dados de Entrada	3
2.2.3. Dados de Saída	4
2.3. Avaliação Econômica de Investimento	4
2.3.1. Fluxo de Caixa e Valor Presente Líquido (VPL)	4
2.3.2. Método da Taxa Interna de Retorno (TIR)	5
2.3.3. Método do Tempo de Retorno	5
3. SIMULAÇÕES	6
4. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	7
4.1. Avaliação Térmica	7
4.1.1. Influência do Volume do Reservatório	7
4.1.2. Influência do Número de Coletores	8
4.2. Avaliação Financeira	9
4.2.1. Custo Anual de um Sistema Elétrico	10
4.2.2. Custo Anual com GLP	10
4.2.3. Tempo de Retorno e TIR	11
5. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS	15

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento de água utilizando o chuveiro elétrico representa 67% do consumo doméstico de energia elétrica no Brasil, cuja utilização está altamente concentrada entre 18 e 21h [Aita, 2006]. O setor residencial reflete a cultura de uso excessivo da eletricidade para este fim, o que ocasiona, de imediato, problemas referentes à geração de energia neste intervalo de concentração e superdimensionamento das linhas de transmissão. Além disso, para aquecimento, a utilização de energia elétrica apresenta desvantagem por se tratar de energia final menos compatível com os processos de transformação em energia útil na forma de calor.

Uma das alternativas para reduzir estes impactos, seria a utilização em grande escala da energia solar para aquecimento de água para uso doméstico, algo que é totalmente viável num país como o Brasil que tem uma posição geográfica tão favorável para isto, estando com mais de 80% de seu território compreendido entre os trópicos, local onde há maiores índices de radiação solar. Porém, um dos principais entraves à difusão desta tecnologia é o custo de aquisição dos equipamentos, particularmente para famílias de baixa renda. Esta situação está sendo lentamente modificada ao longo dos anos devido à redução dos custos em função da escala de produção, dos avanços tecnológicos, do aumento da concorrência e dos incentivos governamentais.

Lourenço, 2000, avaliou economicamente diferentes sistemas para aquecimento de água residencial (elétrico, gás, solar-elétrico e solar-gás) e concluiu que o melhor investimento em longo prazo é o sistema híbrido que utiliza energia solar auxiliada por um aquecedor de passagem a gás. Este resultado motivou o estudo deste sistema neste trabalho.

O presente trabalho traz uma pequena parcela de contribuição para a evolução tecnológica desta alternativa energética, através do estudo da variação dos parâmetros envolvidos no dimensionamento destes sistemas (número de coletores e volume do reservatório) avaliando seu conseqüente reflexo no custo, na eficiência, e na parcela de contribuição solar. O seu desenvolvimento será focado no suprimento de uma residência de padrão popular situada em Porto Alegre. Para tanto será utilizada uma ferramenta computacional denominada TERMOSIM, que permite a simulação de sistemas de aquecimento solar auxiliado. Esta ferramenta foi desenvolvida pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LES-UFRGS).

O objetivo deste trabalho é traçar o comportamento da eficiência e contribuição solar do sistema em relação ao número de coletores e ao volume do reservatório, além de obter um dimensionamento ótimo destes dois parâmetros visando um melhor investimento econômico.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Sistema Solar de Aquecimento de Água

Os sistemas de aquecimento solar são divididos em dois tipos: sistema ativo, em que a circulação da água é forçada por uma bomba hidráulica; e sistema passivo, no qual a água circula através do sistema de termossifão.

O fenômeno de termossifão ocorre devido à diferença de massa específica entre a água com maior temperatura que está dentro do coletor e a de temperatura inferior que está no interior do reservatório. Neste trabalho foi adotado o sistema de termossifão, pois, segundo Treis, 1991, é o sistema mais adequado para utilização no Brasil por ser mais simples e conveniente ao nosso clima, principalmente no âmbito de uso doméstico.

Os sistemas passivos são compostos basicamente por: coletores solar, reservatórios, fonte auxiliar de energia e tubulações arranjadas como mostra a figura 2.1.

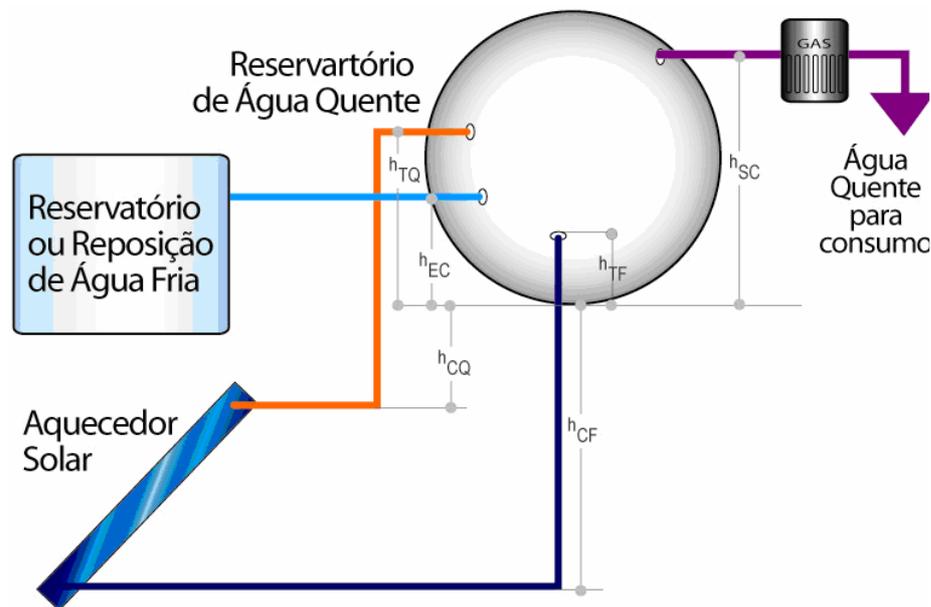


Figura 2.1 – Arranjo utilizado para as simulações.

O aquecedor, ou coletor solar é o responsável por aquecer a água do sistema através da captação de energia solar irradiada sobre ele. Esta captação é feita por placas de metal (alumínio ou cobre) que recebem a coloração escura para aumentar sua absorção. Tubos de cobre soldados a essas placas conduzem a água durante seu aquecimento.

O reservatório de água quente irá acumular a água aquecida pelos coletores, algo que deve ser feito sem degradação ou corrosão, com suporte das pressões envolvidas, e principalmente com a menor perda térmica possível. Por isso, é geralmente construído com duas camadas de aço inoxidável preenchidas com material de baixa condutividade térmica, geralmente lã de vidro.

Reservatório de água fria é o local que acumula água da rede hidráulica e a repõe ao reservatório quando houver consumo de água quente.

A fonte auxiliar de energia pode ser elétrica ou a gás. A primeira utiliza como fonte de potência a eletricidade disponibilizada pela rede, aquecendo a água através da dissipação do calor numa resistência elétrica. Já a segunda utiliza o calor gerado pela combustão do gás, geralmente gás liquefeito de petróleo (GLP). Ambas complementam o sistema fornecendo a parcela de energia que não foi posta suficientemente pelo sistema de coleta solar.

As tubulações que conectam o coletor ao reservatório, o reservatório a fonte auxiliar e a fonte auxiliar a fonte de consumo são revestidas com uma camada de material de baixa condutividade térmica, pois conduzem água com temperatura superior à ambiente. Já a tubulação que conecta o reservatório frio ao quente não necessita do isolamento.

2.2. Programa TERMOSIM

As simulações de processos através de cálculos computacionais são ferramentas de grande valia no auxílio de pesquisas, pois permitem a obtenção de respostas para várias situações em curto espaço de tempo e com custos muito menores.

O programa TERMOSIM constitui numa ferramenta computacional que simula sistemas de aquecimento solar de água auxiliado por um sistema a gás ou elétrico. Este aplicativo foi desenvolvido na linguagem de programação Visual Basic 5.0.

2.2.1. Modelamento Matemático

Para analisar o comportamento térmico e hidrodinâmico destes sistemas, o TERMOSIM realiza um balanço energético de cada componente de forma isolada e um balanço da quantidade de movimento ao longo de todo sistema.

A modelagem matemática utilizada para os coletores é a de Hottel-Bliss-Whillier [Duffie e Beckman,1991], que leva em consideração os parâmetros de qualidade do coletor: $F_R U_L$, referente às suas perdas térmicas e $F_R (\tau\alpha)$, referente às suas propriedades óticas.

O balanço energético no reservatório térmico é modelado através da teoria da estratificação térmica, em que o mesmo é dividido em camadas discretizadas com temperaturas homogêneas, porém diferentes entre si. Estas camadas trocam calor entre si e com o meio exterior, recebem água aquecida dos coletores, perdem água aquecida para o consumo e recebem água fria da rede. Considera-se que ao entrar no reservatório a água seguirá para a camada correspondente a sua temperatura, sem haver mistura entre as camadas.

A tubulação, mesmo tendo uma baixa perda térmica, é considerada no balanço energético, tendo como principais influências seus dados geométricos e de isolamento térmico.

A determinação da vazão mássica através do circuito é realizada similarmente àquela de Huang [1980], Huang e Hsieh [1982] e Close [1962]. Neste caso o TERMOSIM divide o sistema em vários seguimentos normais à direção do escoamento e a vazão mássica é determinada pela igualdade da soma da queda de pressão devido à diferença de densidade e as perdas por atrito no circuito.

Siqueira, 2005, validou os modelos matemáticos empregados no aplicativo TERMOSIM através do confronto dos resultados simulados com medidas experimentais.

2.2.2. Dados de Entrada

Sua interface amigável permite a inserção de dados de maneira intuitiva, como mostra a Figura 2.2.

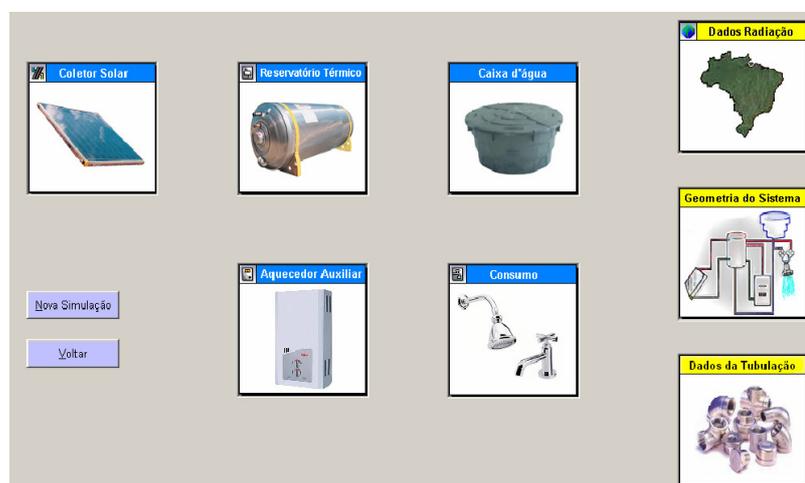


Figura 2.2 – Interface inicial do programa TERMOSIM

Os dados de entrada estão divididos em:

- Coletor Solar: onde é feito a inserção de dados referente à sua construção e composição, ou então, a inserção direta de seus parâmetros de qualidade $F_R(\tau\alpha)$ e $F_R U_L$. Neste item também se informa a quantidade de coletores do sistema e a sua área de coleta;
- Reservatório térmico: para caracterizar este componente são inseridos seus dados de diâmetro, comprimento, e informações sobre sua composição material.
- Consumo: neste item é possível traçar um perfil de consumo anual, estabelecendo o volume e temperatura diária.
- Dados climáticos: este programa possui um banco de dados climáticos com a média mensal horária para várias regiões do Brasil. Para a simulação basta selecionar a cidade pretendida e posicionar o coletor em sua inclinação horizontal e azimutal.
- Geometria do sistema: os dados geométricos são as alturas mostradas na figura 2.1, em que todas estão referenciadas na base do reservatório térmico.
- Dados de tubulação: neste item é preciso informar o comprimento de cada segmento da tubulação, bem como seu isolamento térmico e a quantidade de conexões.

2.2.3. Dados de Saída

Dentre vários dados de saída do TERMOSIM, os de interesse neste trabalho são os seguintes:

- Energia térmica do sol (ES): representa o valor da energia térmica fornecida à água pelo sol, em (MJ);
- Energia térmica do gás (EG): representa o valor da energia térmica fornecida à água pelo gás, em (MJ);
- Energia térmica perdida (ENU): representa o valor da energia térmica que foi adicionada ao sistema e não foi utilizada para aquecer a água, em (MJ);
- Energia térmica total (ET): representa a soma do valor da energia térmica do sol e da energia térmica do gás fornecido ao sistema, em (MJ);
- Fração solar (FS): representa a energia térmica do sol dividida pela energia total do sistema, em (%);
- Eficiência solar (ES): é a razão entre a energia solar convertida em energia térmica pelo coletor e a energia solar disponível na área de incidência dos coletores, em (%);
- Radiação solar anual incidente no plano dos coletores (Rad), em (MJ).

2.3. Avaliação Econômica de Investimento

Tendo em vista que a implantação de um projeto de aquecimento de água solar auxiliado é um investimento de capital, torna-se pertinente a revisão dos conceitos econômicos utilizados neste trabalho para avaliarem a viabilidade destes investimentos: tempo de retorno e taxa interna de retorno.

2.3.1. Fluxo de Caixa e Valor Presente Líquido (VPL)

O fluxo de caixa é uma projeção de entradas (benefícios) e saídas (despesas) para um determinado período. Como mostra a Figura 2.3, pode ser representado graficamente por uma

linha de tempo em que são colocadas setas representativas que indicam periodicamente as entradas (para cima) e saídas (para baixo).

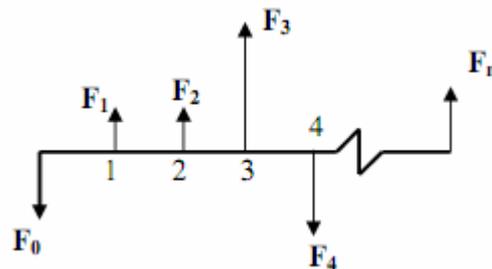


Figura 2.3 – Representação gráfica de um fluxo de caixa.

Tendo em vista que o capital sempre sofrerá desvalorização a certa taxa, o VPL de um fluxo de caixa é a soma do valor de cada entrada e saída no presente. A equação 2.1 calcula o VPL para o fluxo de caixa da figura 2.3.

$$VPL = F_0 + F_1(1+i)^{-1} + F_2(1+i)^{-2} + F_3(1+i)^{-3} + \dots + F_n(1+i)^{-n} \quad (2.1)$$

onde os F_n são benefícios (positivo) ou despesas (negativo) em (R\$), i é a taxa de juros em (% / ano), e n é o período de duração do investimento (anos).

2.3.2. Método da Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR de um projeto pode ser entendida como a remuneração do capital investido. Por definição é a taxa de desconto para qual o VPL do fluxo de caixa da alternativa em questão é nulo, ou seja, é o (i) da equação 2.1 para $VPL = 0$.

Segundo este método, para o investimento ser economicamente viável, a TIR deve ser maior que a taxa mínima de atratividade (TMA), ou seja, a rentabilidade mínima que o investidor espera do projeto.

2.3.3. Método do Tempo de Retorno

O método do Tempo de Retorno se baseia no cálculo do tempo necessário para que o capital investido seja compensado pelos benefícios gerados com projeto.

Este método tem algumas limitações, porém é muito utilizado por sua simplicidade. O mais comum é a sua utilização como um método complementar, empregado juntamente com um dos métodos considerados exatos como a TIR.

Por definição é o tempo decorrido para o VPL do fluxo de caixa do investimento em questão ser nulo, ou seja, é o n da equação 2.1 para $VPL = 0$.

Segundo este método o investimento para ser economicamente viável o tempo de retorno deve ser menor que a vida econômica do projeto.

3. SIMULAÇÕES

A fim de avaliar sistemas de aquecimento de água utilizando energia solar auxiliada por um aquecedor de passagem a gás, foram realizadas ao todo vinte simulações no programa TERMOSIM. Estas foram realizadas variando-se os parâmetros de análise (volume do reservatório e número de coletores) e mantendo-se os demais constantes.

Optou-se por utilizar no sistema simulado o reservatório térmico na posição horizontal, a qual é mais comum devido a restrições de espaço para utilização deste na posição vertical. Além disso, o aquecedor de passagem foi acoplado em série com o sistema como mostra a Figura 2.1.

Os reservatórios utilizados nas simulações são os de (300l, 400l, 500l e 600l), os quais tiveram seus dados construtivos utilizados nas simulações cedidos pelo fabricante, CUMULUS. O coletor utilizado foi do mesmo fabricante, modelo CSA – SUNPOP 140, com área de coleta de 1,42m² e coeficientes de eficiência certificados pelo Inmetro: $F_R U_L = 6,979$ e $F_R(\tau\alpha) = 0,646$.

O perfil de consumo suposto para as simulações considera uma família de quatro pessoas, em que todas se banham todos os dias das 18h às 19h com uma vazão de quatro litros por minuto, durante 15 min cada, com água a temperatura de 40°C.

A Tabela 3.1 mostra os dados de saída obtidos para cada sistema simulado. As abreviações utilizadas para denominar cada item estão descritas no item 2.2.3.

Tabela 3.1 – Resultados das simulações no TERMOSIM.

Reservatório de 300l						
N° coletores	Rad (MJ)	EG (MJ)	ES (MJ)	ENU (MJ)	ES	FS
1	8288,9	10858,1	4824,1	1866,3	58,3%	30,8%
2	16577,4	9915,1	8998,2	4877,9	54,3%	47,6%
3	24866,3	9051,7	12114,9	7340,9	48,6%	57,2%
4	33155	8472,1	14083,8	8939,2	42,3%	62,4%
5	41443,6	8096,6	15312,1	9934,6	36,8%	65,4%
Reservatório de 400l						
N° coletores	Rad (MJ)	EG (MJ)	ES (MJ)	ENU (MJ)	ES	FS
1	8288,9	8552,7	4996,2	1264,7	60,3%	36,9%
2	16577,4	6461,1	9284,2	3979,4	56,0%	59,0%
3	24866,3	5151,3	12348,6	6307,5	49,5%	70,6%
4	33155	4420,3	14203,6	7841,3	42,7%	76,3%
5	41443,6	4004,8	15344,8	8809,8	36,8%	79,3%
Reservatório de 500l						
N° coletores	Rad (MJ)	EG (MJ)	ES (MJ)	ENU (MJ)	ES	FS
1	8288,9	7937,6	4963,8	1153,9	59,9%	38,5%
2	16577,4	5406,8	9209	3734,4	55,5%	63,0%
3	24866,3	3944,4	12269,1	6038,6	49,2%	75,7%
4	33155	3252,5	14149,3	7601,5	42,5%	81,3%
5	41443,6	2884,4	15327,6	8613,6	36,8%	84,2%
Reservatório de 600l						
N° coletores	Rad (MJ)	EG (MJ)	ES (MJ)	ENU (MJ)	ES	FS
1	8288,9	7552	4939,7	1090,8	59,6%	39,5%
2	16577,4	4777	9152,9	3588,4	55,3%	65,7%
3	24866,3	3261,6	12196,3	5857,8	48,9%	78,9%
4	33155	2603,3	14084,2	7425,2	42,3%	84,4%
5	41443,6	2249,4	15272	8453,9	36,7%	87,2%

4. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1. Avaliação Térmica

Este item abordará a análise do ponto de vista energético dos sistemas simulados comparando suas eficiências e frações solares em função dos parâmetros: número de coletores e volume do reservatório.

4.1.1. Influência do Volume do Reservatório

Lafay, 2005, citou que ASHRAE (1996) afirma que “o projeto e seleção do equipamento de armazenamento é um dos elementos mais negligenciados nos sistemas de energia solar”. Apesar disto, o reservatório térmico é um componente que influi significativamente no desempenho do sistema.

Com os dados anuais de saída do programa utilizado, mostrados na Tabela 3.1, foi possível traçar as linhas da Figura 4.1, as quais representam a fração solar em função do número de coletores, para os quatro tamanhos de reservatório térmico.

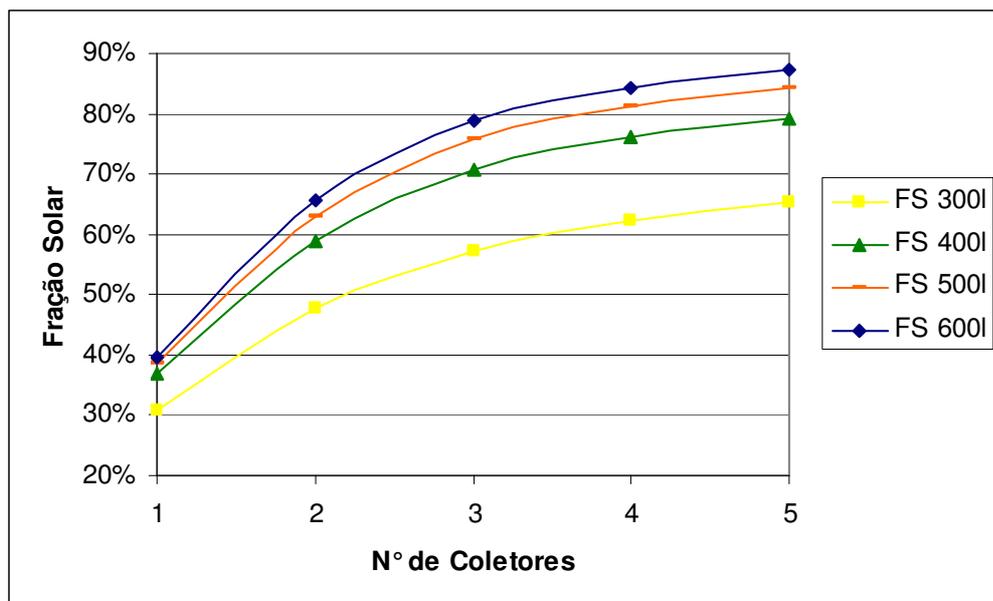


Figura 4.1 – Fração solar em função do número de coletores para cada reservatório.

A análise da Figura 4.1 deixa claro que houve um ganho na fração solar (FS) com o aumento do volume do reservatório, podendo assim, o sistema operar com uma menor área de coleta solar para um maior volume de reservatório mantendo a mesma FS.

Segundo Duffie e Backman, 1991, este aumento se deu devido a uma melhor estratificação das camadas internas do reservatório, gerando um maior gradiente de temperatura no seu interior e conseqüentemente entre a entrada e saída do coletor, que por sua vez provocou um aumento na vazão mássica do sistema, ocasionando maior transferência de calor entre o coletor e a água.

Além de aumentar a eficiência do sistema, a Figura 4.2 mostra que o aumento do volume do reservatório também diminui a energia não utilizada (ENU), ou seja, a energia perdida pelo sistema para o exterior, através das tubulações, e do próprio reservatório.

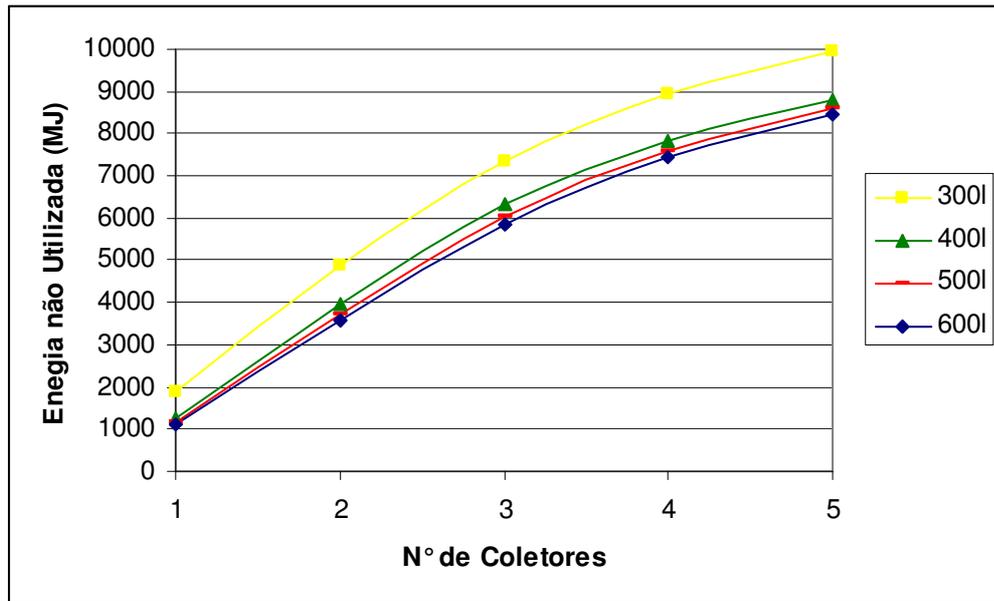


Figura 4.2 – Energia perdida para cada tipo de sistema.

É trivial concluir que o aumento do número de coletores eleva as perdas térmicas, já que aquecem a água a temperaturas mais altas, fazendo que a diferença de temperatura entre a água do sistema e o meio externo fique maior. Porém, não é tão obvio que o aumento do reservatório diminua estas perdas, já que a área de troca de calor aumenta.

Lafay, 2005, justifica este fenômeno estabelecendo um fator de qualidade do reservatório. Este seria calculado a partir da razão entre a quantidade de calor acumulado pelo reservatório (proporcional ao seu volume) pela quantidade de calor perdido pelo mesmo (proporcional a sua área). Encarando desta forma os reservatórios maiores são energeticamente mais favoráveis que os menores, levando em conta que a área aumenta com o quadrado e o volume com o cubo da dimensão.

4.1.2. Influência do Número de Coletores

O número de coletores é, geralmente, parâmetro principal no dimensionamento de sistemas de aquecimento solar, tendo em vista que seu aumento acarreta diretamente numa elevação da fração solar, como pode ser visto na Figura 4.1.

A fração solar é sempre acrescida quando acoplado mais coletores, porém sua taxa de crescimento diminui, tornando quase insignificante o acréscimo de mais um coletor no sistema, a partir de cinco coletores.

A Figura 4.3 mostra a variação da eficiência solar em função do número de coletores para o reservatório de 400l.

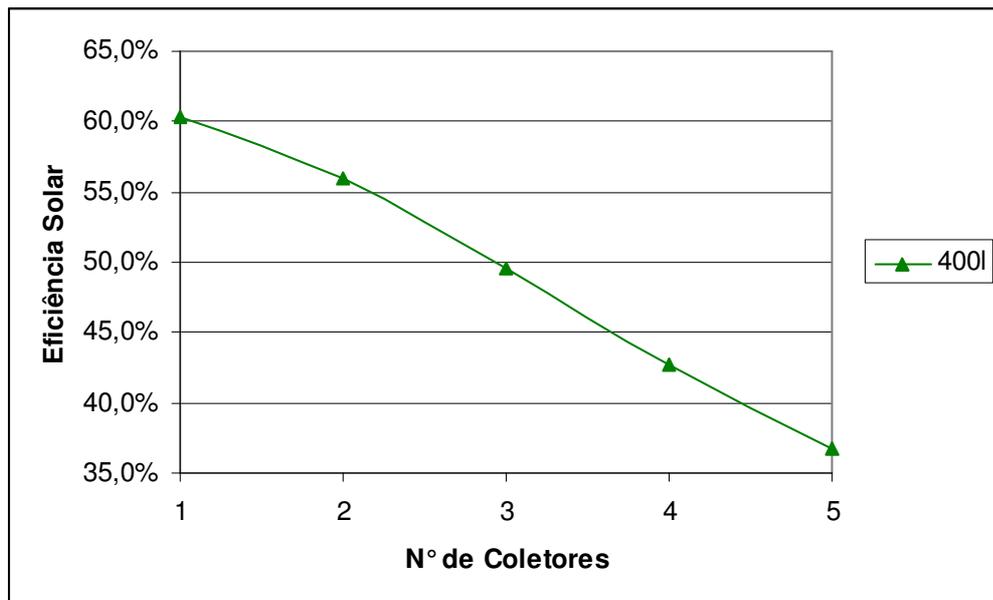


Figura 4.3 – Eficiência solar em função do número de coletores para reservatório de 400l.

Ao analisar a Figura 4.3 pode-se destacar que o aumento do número de coletores diminui a eficiência solar, com um comportamento quase linear, o que justifica a diminuição na taxa de crescimento da fração solar quando acrescentado mais coletores.

De acordo com Duffie e Beckman, 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, acarretando uma menor eficiência do sistema. Esta situação fica bem clara ao analisar as seguintes situações: a primeira (com cinco coletores), em razão de possuir uma grande área de coleta solar consegue aumentar significativamente a temperatura da água do reservatório, fazendo com que esta circule no coletor com temperatura mais alta, diminuindo a sua eficiência; a segunda (com um coletor) tem uma área de coleta pequena, que por sua vez não consegue elevar significativamente a temperatura da água do reservatório, ocorrendo o inverso da primeira situação.

4.2. Avaliação Financeira

O ideal do ponto de vista ambiental para o dimensionamento destes sistemas seria a utilização de uma fração solar igual a 100%, pois assim toda energia utilizada para aquecer o banho seria vinda de uma fonte renovável. Porém, economicamente, a nível doméstico, a substituição de um sistema convencional elétrico por um de aquecimento solar que cubra toda demanda de água quente de uma residência, como a abordada neste trabalho, ainda não é o investimento mais atraente dentre as possibilidades. Os motivos para isto são: em primeiro lugar o alto custo destes equipamentos e por último a diminuição significativa da eficiência de um sistema com grande número de coletores, como mostrado nas simulações.

Duffie e Backman sugerem utilizar uma fração solar de 75%. Por outro lado, Aita, 2006, citou que Shariah e Löf, 1997, recomendam que o valor esteja na faixa de 50 a 70%. Não há consenso quanto a um número fixo para este fator, o certo é que em cada caso o valor ótimo é diferente, e depende de inúmeros fatores. A avaliação financeira abordada neste trabalho terá como principal objetivo encontrar dentre os sistemas simulados aquele que tem um melhor

retorno de investimento, utilizando-se dos métodos financeiros citados no item 2.3, e espera-se que a fração solar fique dentro do intervalo citado.

4.2.1. Custo Anual de um Sistema Elétrico

Os sistemas simulados foram comparados ao sistema de aquecimento de água para banho elétrico. Para tanto, foi estimada a carga térmica (CT), ou seja, a quantidade de calor necessária para aquecer o volume de água de consumo, da temperatura da rede hidráulica, considerada igual à temperatura de bulbo úmido (TBU) média mensal, até a de conforto para banho (TB), como mostra na Tabela 4.1. A energia total (Et) é corrigida considerando a eficiência do chuveiro de 95%, resultando na energia total estimada (Ete).

Tabela 4.1 – estimativa da carga térmica no aquecimento de água para banho.

Mês	TB (°C)	TBU (°C)	Consumo (m³)	CT (MJ)
janeiro	40	19,2	7,2	626,00
fevereiro	40	19,4	7,2	619,98
março	40	17,5	7,2	677,16
abril	40	16,3	7,2	713,28
maio	40	13,9	7,2	785,51
junho	40	12,1	7,2	839,68
julho	40	12,4	7,2	830,65
agosto	40	12,7	7,2	821,62
setembro	40	14,2	7,2	776,48
outubro	40	13,4	7,2	800,55
novembro	40	15,3	7,2	743,37
dezembro	40	17,1	7,2	689,20
Et				8923,5
Ete				9393,1
Ete (kWh)				2609,2

Considerando a tarifa homologada pela Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para o ano de 2009, acrescida de impostos, obteve-se um custo de R\$ 0,444 por kWh de energia elétrica para a cidade de Porto Alegre. Com isso chega-se a uma estimativa do gasto anual no aquecimento de água para banho utilizando este sistema de R\$ 1.158,49.

4.2.2. Custo Anual com GLP

Cada sistema simulado possui um valor de fração solar diferente, logo, o consumo de gás e conseqüentemente o custo anual com esta energia auxiliar serão diferentes.

Em um levantamento feito pela agência nacional do petróleo (ANP) em março deste ano revelou o custo médio de R\$ 34,59 por vasilhame de 13 kg de GLP na região sul. O Centro de Tecnologia do Gás (CTGAS) estimou o poder calorífico inferior do GLP em 49,2 MJ/kg, sendo assim o custo do gás, utilizando estes dois dados será de 0,05408 R\$/MJ.

Conhecido o custo do gás, foi estimado o gasto anual de energia auxiliar de cada sistema simulado, mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Custo anual com GLP para cada sistema simulado.

Reservatório de 300l			Reservatório de 400l		
N° coletores	Cons. de gás (MJ)	Custo Anual	N° coletores	Cons. de gás (MJ)	Custo Anual
1	10858,1	R\$ 587,20	1	8552,7	R\$ 462,50
2	9915,1	R\$ 536,20	2	6461,1	R\$ 349,40
3	9051,7	R\$ 489,50	3	5151,3	R\$ 278,60
4	8472,1	R\$ 458,20	4	4420,3	R\$ 239,00
5	8096,6	R\$ 437,90	5	4004,8	R\$ 216,60

Reservatório de 500l			Reservatório de 600l		
N° coletores	Cons. de gás (MJ)	Custo Anual	N° coletores	Cons. de gás (MJ)	Custo Anual
1	7937,6	R\$ 429,30	1	7552	R\$ 408,40
2	5406,8	R\$ 292,40	2	4777	R\$ 258,30
3	3944,4	R\$ 213,30	3	3261,6	R\$ 176,40
4	3252,5	R\$ 175,90	4	2603,3	R\$ 140,80
5	2884,4	R\$ 156,00	5	2249,4	R\$ 121,60

Os resultados mostraram que uma quantidade maior de coletores conectado ao maior reservatório trará o menor custo com GLP, pois quanto maior a área de coleta maior a parcela de energia solar, e quanto maior o volume do reservatório maior a eficiência solar.

Abaixo, a Figura 4.4 mostra o comportamento dos sistemas simulados quanto ao consumo de GLP.

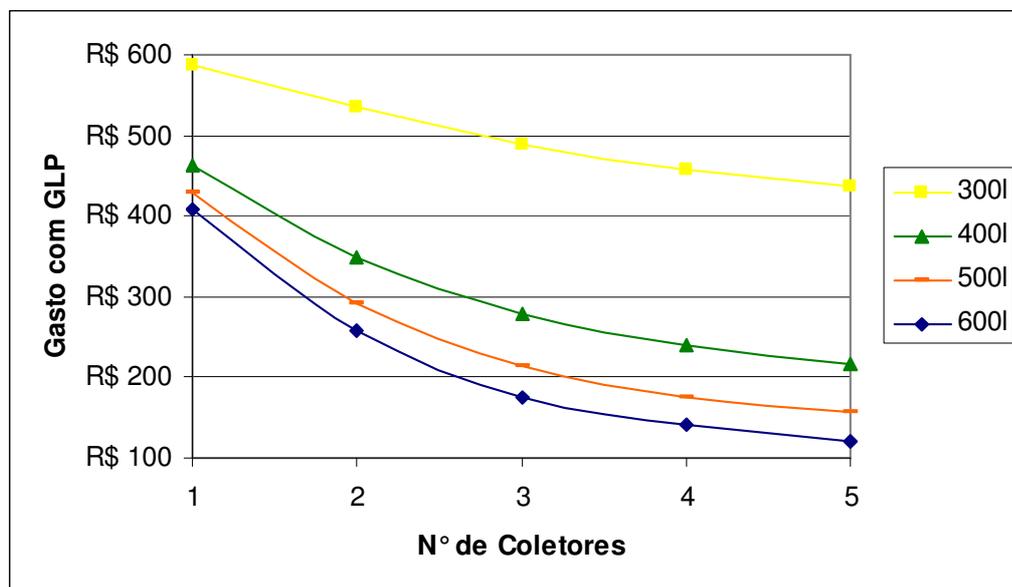


Figura 4.4 – Variação do gasto com GLP para reservatório de 300l, 400l, 500l, e 600l.

4.2.3. Tempo de Retorno e TIR

A Tabela 4.4 mostra um resumo da análise de investimento, em que (RA) é o retorno anual, ou seja, o quanto o sistema poupará em relação ao sistema convencional elétrico no primeiro ano. É calculado pela diferença entre o custo anual do sistema elétrico e do sistema simulado. Para fins de cálculo, este valor foi reajustado anualmente a uma taxa de 5%, levando em consideração que o preço do GLP e da eletricidade sofrerão reajustes próximos a taxa de inflação ao longo da vida útil do sistema.

O investimento inicial (ii) é o custo de aquisição dos equipamentos somado à instalação de cada sistema. Para ser estimado foi feito um levantamento de orçamentos que obteve colaboração da empresa FEEBURG, representante comercial da fabricante de sistemas de aquecimento solar CUMULUS. Este levantamento está mostrado na Tabela 4.3. Nesta tabela os custos com instalação destacados foram obtidos e os outros estimados.

Tabela 4.3 – Orçamentos adquiridos juntos à empresa FEEBURG.

EQUIPAMENTOS				
Reservatório	300I	400I	500I	600I
	R\$ 1.657,00	R\$ 1.776,00	R\$ 1.985,00	R\$ 2.191,00
Coletor SUNPOP - 140			R\$ 448,00	
Válvula Anti-Conjelhamento			R\$ 85,00	
Válvula de segurança			R\$ 60,00	
Tubulação			R\$ 200,00	
Aquecedor de passagem GLP			R\$ 500,00	
INSTALAÇÃO				
N° de Coletores	Reservatório			
	300I	400I	500I	600I
1	R\$ 500,00	R\$ 600,00	R\$ 700,00	R\$ 900,00
2	R\$ 600,00	R\$ 700,00	R\$ 800,00	R\$ 1.000,00
3	R\$ 700,00	R\$ 800,00	R\$ 900,00	R\$ 1.100,00
4	R\$ 800,00	R\$ 900,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.200,00
5	R\$ 900,00	R\$ 1.000,00	R\$ 1.100,00	R\$ 1.300,00

O custo com manutenção e a vida útil do sistema tiveram como referência o estudo realizado por Lourenço, 2000, em que ao analisar sistemas de aquecimento gás-solar utilizou um custo de manutenção de 30% do investimento inicial para cada 12 anos, e o tempo de utilização do sistema de 15 anos. Levando em consideração que houve um aumento na qualidade destes sistemas, optou-se por utilizar um custo de manutenção de 20% do investimento inicial a cada 10 anos, e uma vida útil do sistema de 20 anos.

Para o cálculo do tempo de retorno foi utilizada uma TMA anual de 12%.

Tabela 4.4 – Resumo da análise de investimento para cada sistema.

Reservatório de 300I				
N° de Coletores	RA	ii	n (anos-meses)	TIR
1	R\$ 571,28	R\$ 3.450,00	8	20,24%
2	R\$ 622,28	R\$ 3.998,00	8a-8m	18,97%
3	R\$ 668,97	R\$ 4.546,00	10a-9m	17,85%
4	R\$ 700,31	R\$ 5.094,00	11a-11m	16,54%
5	R\$ 720,62	R\$ 5.642,00	13a-4m	15,18%
Reservatório de 400I				
N° de Coletores	RA	ii	n (anos/meses)	TIR
1	R\$ 695,96	R\$ 3.669,00	6a-9m	23,22%
2	R\$ 809,07	R\$ 4.217,00	6a-8m	23,48%
3	R\$ 879,90	R\$ 4.765,00	7a	22,61%
4	R\$ 919,44	R\$ 5.313,00	7a-7m	21,18%
5	R\$ 941,91	R\$ 5.861,00	8a-3m	19,62%

Reservatório de 500l				
N° de Coletores	RA	ii	n (anos-meses)	TIR
1	R\$ 729,22	R\$ 3.978,00	7a	22,45%
2	R\$ 866,09	R\$ 4.526,00	6a-8m	23,44%
3	R\$ 945,17	R\$ 5.074,00	6a-11m	22,81%
4	R\$ 982,59	R\$ 5.622,00	7a-6m	21,39%
5	R\$ 1.002,50	R\$ 6.170,00	8a-3m	19,85%
Reservatório de 600l				
N° de Coletores	RA	ii	n (anos/meses)	TIR
1	R\$ 750,07	R\$ 4.384,00	7a-8m	20,94%
2	R\$ 900,15	R\$ 4.932,00	7a	22,36%
3	R\$ 982,10	R\$ 5.480,00	7a-3m	21,94%
4	R\$ 1.017,70	R\$ 6.028,00	7a-10m	20,65%
5	R\$ 1.036,84	R\$ 6.576,00	8a-7m	19,23%

Considerando uma taxa mínima de atratividade de 12% ao ano, e uma vida útil de vinte anos, neste caso, a substituição do sistema convencional (elétrico) de aquecimento de água para banho por um que utilize energia solar auxiliada por GLP, se mostra um investimento economicamente viável em todos os casos.

A Figura 4.5 mostra a variação da TIR em função do número de coletores para cada reservatório. Ao analisá-la conclui-se que o seu ponto máximo, para os sistemas com 400l, 500l e 600l, ocorre com dois coletores, resultando numa FS diferente para cada um: 400l – 59%, 500l – 63% e 600l – 65,7%.

Dos vinte sistemas simulados, aquele com reservatório de 400l acoplado a dois coletores foi o que obteve uma maior taxa interna de retorno (12%) e um menor tempo de retorno de investimento (seis anos e oito meses).

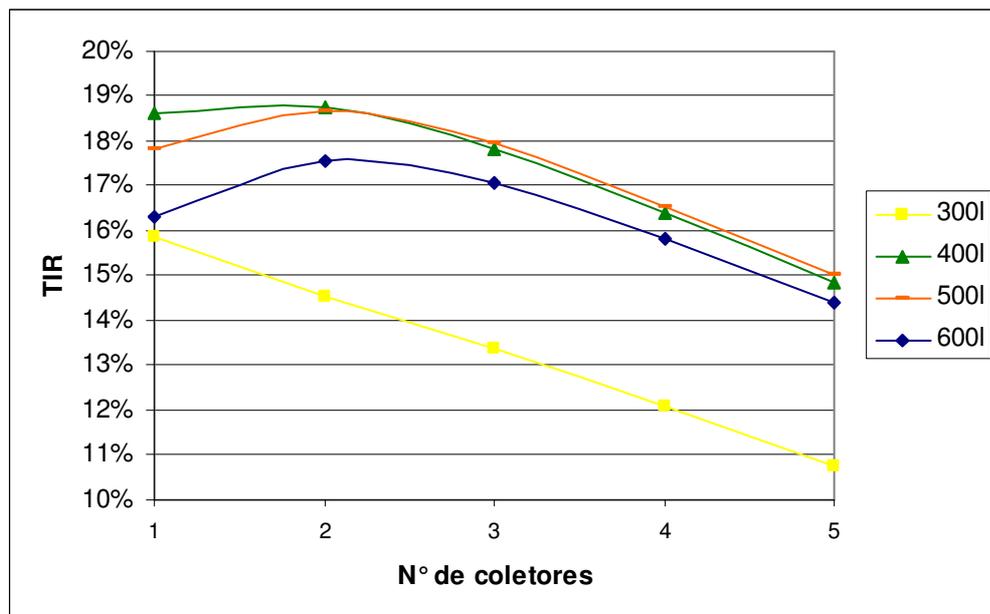


Figura 4.5 – Variação da TIR para sistemas com reservatórios de 300l, 400l, 500l, e 600l.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível traçar o comportamento dos sistemas de aquecimento de água solar-gás, quanto ao aumento do volume do reservatório, que acarretou no aumento da eficiência dos coletores e por sua vez a do sistema, e quanto ao aumento do número de coletores, que ocasionou diminuição da eficiência do sistema. Fatos que estão diretamente relacionados com a temperatura da água circulante nos coletores, e a distribuição da mesma no reservatório.

Foi utilizado nas simulações o reservatório na posição vertical, fato que desfavorece a estratificação térmica em seu interior. Como foi visto, este equipamento tem grande influência no desempenho destes sistemas, portanto ficam sugeridas, para trabalhos futuros, simulações que comparem o desempenho destes sistemas utilizando o reservatório na posição vertical.

Dentro das vinte possibilidades analisadas, com 1, 2, 3, 4 e 5 coletores acoplados a reservatórios de 300, 400, 500 e 600l, o que obteve um maior retorno de investimento foi o de dois coletores (com 1,42m² cada) acoplados a um reservatório de 400l. Sistema que terá um investimento inicial de R\$4.217,00 será retornado em seis anos e oito meses com TIR estimada em 23,48%.

Este sistema economicamente ótimo para o perfil de consumo de 160 litros diários de água a 40°C, consumidos das 18 às 19h, obteve uma fração solar de 59%, ficando dentro do intervalo citado pela literatura.

A popularização destes sistemas no Brasil é algo que deve acontecer, e para que ocorra é necessário políticas de incentivo, primeiramente que incentivem a redução do custo dos equipamentos envolvidos nestes sistemas, e por último, que mostre a população que estes sistemas são investimentos economicamente viáveis.

REFERÊNCIAS

ANEEL - **Agência nacional de energia elétrica**. Site: <http://www.aneel.gov.br>, acessado em outubro de 2009.

AITA, F. **Estudo do Desempenho de um Sistema de Aquecimento de Água por Energia Solar e Gás**. Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, 2006.

CTGAS – **Centro de Tecnologia do Gás**. Site: <http://www.ctgas.com.br>, acessado em outubro de 2009.

CASAROTTO, F.; KOPITTKE, N.; HARTMUT, B. **Análise de Investimentos**. 9ª ed. São Paulo: Atlas, 2000.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 2ª ed. Wisconsin: John Wiley & Sons, 1991.

LAFAY, J-M.S. **Análise Energética de Sistemas de Aquecimento de Água com Energia Solar e Gás**. Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS, 2005.

LOURENÇO Jr., I. **Estudo de um Sistema de Aquecimento de Água Híbrido Gás-Solar**. Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, 2001.

SIQUEIRA, A. M. O., **Desenvolvimento de um Programa de Simulação Computacional de Sistemas de Aquecimento Solar para Água**. Tese de doutorado. PROMEC/UFRGS. Porto Alegre RS, 2003.

TREIS, F. L., **Simulação de Sistemas de Aquecimento de Água por energia solar com circulação natural**. Dissertação de mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS, 1991.