

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

ESTRATÉGIAS PARA MINIMIZAR O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO APOIO A
SISTEMAS SOLARES DE AQUECIMENTO DE ÁGUA.

por

Luiz Rosa Vieira

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, dezembro de 2001

ESTRATÉGIAS PARA MINIMIZAR O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO APOIO A
SISTEMAS SOLARES DE AQUECIMENTO DE ÁGUA.

por

Luiz Rosa Vieira
Engenheiro

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. Marcos Telló – DEE/PUCRS

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer – PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello – PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Alberto Tamagna
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 28 de dezembro de 2001.

*À minha esposa Helenita, companheira de tantos anos,
pela dedicação, apoio e incentivo;
aos meus filhos Rosane, Fabiano e Adriano,
como prova de que nunca é tarde para o que realmente se deseja;
à minha neta Mariana.*

AGRADECIMENTOS

- Ao meu orientador, Prof. Dr. Arno Krenzinger, pelo incentivo, colaboração, sabedoria, amizade e segurança na orientação.
- À Companhia Estadual de Energia Elétrica, representada pela Diretoria da Área de Distribuição, por ter-me facultado o tempo necessário aos estudos.
- Ao Eng. Carlos Marcelo Cecin, pelo valioso apoio, amizade e incentivo.
- Ao Prof. Dr. Guilherme Alfredo Dentzien Dias, pela amizade, apoio e palavras tão oportunas de desafio e encorajamento.
- Ao Prof. Dr. Milton Antônio Zaro, pelo auxílio, incentivo e amizade.
- Ao Eng. César W. M. Prieb, pelas sugestões sempre oportunas.
- Ao Eng. Paulo Kutter e demais funcionários e professores do PROMEC/ UFRGS, pela atenção e colaboração.
- A todos os colegas do PROMEC, pelos anos de tão boa convivência e companheirismo.
- Aos colegas da CEEE, pelo incentivo.
- A Deus por não me permitir vencer sozinho.

RESUMO

É muito difícil falar sobre aquecimento de água usando energia solar, sem falar em energia de apoio, ou auxiliar. Essa indispensável energia auxiliar, que pode ser eletricidade, gás ou um outro combustível qualquer, tem por objetivo substituir a energia solar nos dias nublados, ou complementá-la nos períodos de baixa radiação solar. Sua finalidade é manter um certo volume de água quente dentro das condições mínimas de temperatura para uso imediato. Essa energia, tão importante para a eficácia do sistema, tem sempre um custo agregado que deve ser considerado no projeto. A escolha do tipo de energia auxiliar recai justamente sobre a eletricidade por sua facilidade de controle e baixo investimento inicial. O custo da energia elétrica, contudo, é hoje alto o suficiente para que a fração elétrica no consumo de energia do sistema seja importante e passe a merecer mais atenção.

Esta dissertação visa a estudar estratégias para minimizar o consumo de energia elétrica auxiliar. O trabalho foi desenvolvido através da simulação do atendimento de uma residência unifamiliar, habitada por cinco pessoas, com um consumo de água quente variável ao longo do dia e igual para todos os dias do ano. Empregou-se para as simulações de todos os casos estudados, o software TRNSYS em sua versão 14.2, (KLEIN, 1997) que demonstrou eficácia e coerência nos resultados obtidos.

Ao longo do trabalho foram simulados mais de setecentos casos, variando-se parâmetros como área de coletores, volume do reservatório, potência elétrica, dentre outros. Com os resultados obtidos nas simulações foram elaboradas tabelas e gráficos dos quais foi possível retirar algumas conclusões relevantes tais como a dependência do consumo de energia auxiliar com o volume do reservatório, número de coletores, potência da resistência de aquecimento e sua altura, bem como a altura do termostato.

A partir dos resultados deste trabalho foi possível a elaboração de uma série de recomendações relativas a estudo e a projeto de sistemas de aquecimento solar de água quente para uso doméstico, visando à otimização na utilização do sistema de energia auxiliar.

ABSTRACT

STRATEGIES FOR MINIMIZING AUXILIARY ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION IN SOLAR ENERGY WATER HEATING SYSTEMS

It is hard to talk about solar heating water systems without mentioning any auxiliary energy source. The purpose of this necessary auxiliary energy (electricity, gas or any other fuel) is to replace solar energy in cloudy days or to complement it in low solar radiation periods by keeping an amount of hot water under minimal consumption conditions. This energy, so important for system efficiency, has always an associated cost, which must be considered in the project. Electricity is usually the chosen source because of its easy control and low initial investment. This energy cost, nevertheless, is sufficiently high-priced to deserve attention.

This work aims to study strategies for minimizing electrical auxiliary energy consumption. It was developed by simulating the hot water supplying to a five person family dwelling. The hot water consumption is variable along the day and constant for every day of the year. All the simulations were performed using TRNSYS software, [Klein, 1997] which was shown to be effective, giving coherent results.

Throughout this work more than 700 cases were simulated, varying parameters such as collectors area, reservoir volume, electrical power among others. Tables and graphs generated by the simulation results lead to some relevant conclusions such as auxiliary energy consumption dependence on the tank volume, on the number of collectors, on the heater power and its height, as well on the thermostat height.

The results of this work allowed to elaborate some recommendations concerning the study and the project of solar water heating systems for domestic use, aiming the auxiliary system optimization.

ÍNDICE

1. Introdução.....	1
2. Simulação de Sistemas.....	5
2.1. Emprego do <i>TRNSYS</i> (<i>Transient System Simulation Program</i>).....	5
2.2. Detalhamento do <i>Assembly</i> para a Simulação do Sistema de Aquecimento Solar..	10
2.3. Dimensionamento de um Sistema para Verão e para Inverno.....	13
2.3.1. Simulações preliminares.....	16
2.3.1.1. <u>Simulação para temporada de verão</u>	17
2.3.1.2. <u>Simulação para temporada de inverno</u>	18
2.4. Metodologia das Simulações.....	19
3. Efeito do Dimensionamento de um Sistema de Aquecimento Solar no Consumo de Energia Auxiliar.....	21
3.1. Efeito do <i>Setpoint</i> do Termostato.....	21
3.2. Estudo do Número de Coletores para o Bom Desempenho de um Sistema Solar..	23
3.2.1. Discussão dos resultados.....	27
3.3. Estudo da Capacidade Volumétrica dos Reservatórios.....	31
3.3.1. Simulações com variação de volume.....	32
3.3.2. Resultados.....	32
3.3.3. Análise.....	36
4. Efeitos do posicionamento e do controle da resistência auxiliar.....	39
4.1. Valor Nominal da Potência da Resistência Auxiliar.....	39
4.1.1. Conclusões preliminares.....	41
4.2. Variação da Fração Solar em Função da Posição da Resistência Elétrica.....	42
4.3. Variação Simultânea e Solidária da Posição da Resistência Auxiliar de Aquecimento e do Termostato.....	44
4.4. Estratégia de Controle Horário.....	47
4.4.1. Consumo Doméstico Distribuído.....	48
4.4.2. Consumo Concentrado no Final da Tarde.....	50
4.4.3. Consumo por Transferência Global.....	52

5. Conclusões.....	54
Referências Bibliográficas.....	57
APÊNDICE I.....	59
APÊNDICE II.....	61
APÊNDICE III.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Demanda Máxima do Verão de 2001.....	3
Figura 2.1	Modelo de Múltiplos Nós.....	7
Figura 2.2	Arranjo Utilizado em Todas as Simulações Realizadas.....	11
Figura 2.3	Gráfico da Radiação Solar Horária para o Dia 22 de Dezembro.....	14
Figura 2.4	Gráfico da Radiação Solar Horária para o Dia 22 de Junho.....	15
Figura 2.5	Energia Útil e Energia Auxiliar para as Condições Consideradas para a Temporada Quente.....	18
Figura 2.6	Energia Útil e Energia Auxiliar para as Condições Consideradas para Inverno.....	19
Figura 3.1	Perfil de Consumo Diário.....	24
Figura 3.2	Gráfico de Desempenho de um Sistema Empregando Apenas 1 Coletor Solar.....	25
Figura 3.3	Gráfico de Desempenho de um Sistema Empregando 16 Coletores Solares.....	26
Figura 3.4	Gráfico de Desempenho de um Sistema Empregando 30 Coletores Solares.....	27
Figura 3.5	Gráfico de Desempenho do Sistema. Energia Captada em Função do Número de Coletores Solares Utilizados.....	29

Figura 3.6	Varição do Percentual de Energia Solar sobre a Energia Total Consumida no Sistema.....	30
Figura 3.7	Dependência da Energia Auxiliar Necessária com a Capacidade Volumétrica do Reservatório.....	37
Figura 4.1	Efeito da Variação da Potência Nominal na Temperatura da Água para 4 Coletores.....	40
Figura 4.2	Efeito da Variação da Potência Nominal na Temperatura da Água para 8 Coletores.....	41
Figura 4.3	Fração Solar em Função da Posição da Resistência Elétrica.....	42
Figura 4.4	Energia Elétrica em Função da Posição da Resistência Elétrica.....	43
Figura 4.5	Fração Solar, Fração Elétrica e Perdas em Função da Posição da Resistência e Termostato Dentro do Reservatório para 4 Coletores.....	45
Figura 4.6	Fração Solar, Fração Elétrica e Perdas em Função da Posição da Resistência e Termostato Dentro do Reservatório para 8 Coletores.....	46
Figura 4.7	Gráfico de Barras Mostrando o Horário e a Distribuição do Consumo de Água Aquecida para o Caso Considerado.....	48
Figura 4.8	Gráfico do Perfil de Consumo de Água Aquecida no Final da Tarde.....	50
Figura 4.9	Gráfico de Barras Mostrando Concentração do Consumo de Água Aquecida para o Presente Caso.....	52
Figura II.1	Curvas para um Sistema Solar para 5 Coletores.....	62
Figura II.2	Curvas para um Sistema Solar para 6 Coletores.....	63
Figura II.3	Curvas para um Sistema Solar para 7 Coletores.....	64
Figura II.4	Curvas para um Sistema Solar para 8 Coletores.....	65
Figura III.1	Curvas da Potência Função da Posição da Resistência Auxiliar para 4 Coletores.....	66
Figura III.2	Curvas da Potência Função da Posição da Resistência Auxiliar para 5 Coletores.....	67
Figura III.3	Curvas da Potência Função da Posição da Resistência Auxiliar para 6 Coletores.....	68

Figura III.4	Curvas da Potência Função da Posição da Resistência Auxiliar para 7 Coletores.....	69
Figura III.5	Curvas da Potência Função da Posição da Resistência Auxiliar para 8 Coletores.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Dados da Simulação com os Parâmetros acima, para Verão.....	17
Tabela 2.2	Resultados da Simulação com os Parâmetros acima, para Inverno.....	18
Tabela 3.1	Resumo Anual das Simulações para um Número de Coletores Linearmente Crescente até 30 Unidades.....	28
Tabela 3.2	Resumo das Simulações com Volume Variável e 4 Coletores.....	33
Tabela 3.3	Resumo das Simulações com Volume Variável e 5 Coletores.....	33
Tabela 3.4	Resumo das Simulações com Volume Variável e 6 Coletores.....	34
Tabela 3.5	Resumo das Simulações com Volume Variável e 7 Coletores.....	35
Tabela 3.6	Resumo das Simulações com Volume Variável e 8 Coletores.....	35
Tabela 3.7	Relação entre o Número de Coletores Solares Considerados na Simulação e a Energia Elétrica Auxiliar Utilizada	36
Tabela 4.1	Condições de Atendimento ao Consumo para 4 Coletores.....	44
Tabela 4.2	Condições de Atendimento ao Consumo para 8 Coletores.....	45
Tabela 4.3	Caso Especial para Consumo Doméstico Distribuído.....	49
Tabela 4.4	Caso Especial para Consumo no Final da Tarde.....	51
Tabela 4.5	Caso Especial para Consumo no Final da Tarde.....	53
Tabela I.1	Arquivo TMYPOA Original.....	59
Tabela I.2	Arquivo TMYPOA(X) Derivado do Original.....	60
Tabela II.1	Potência Nominal X Temperatura da Água para 5 Coletores.....	61
Tabela II.2	Potência Nominal X Temperatura da Água para 6 Coletores.....	62

Tabela II.3	Potência Nominal X Temperatura da Água para 7 Coletores.....	63
Tabela II.4	Potência Nominal X Temperatura da Água para 8 Coletores.....	64
Tabela III.1	Altura da Resistência Auxiliar para 4 Coletores.....	66
Tabela III.2	Altura da Resistência Auxiliar para 5 Coletores.....	67
Tabela III.3	Altura da Resistência Auxiliar para 6 Coletores.....	68
Tabela III.4	Altura da Resistência Auxiliar para 7 Coletores.....	69
Tabela III.5	Altura da Resistência Auxiliar para 8 Coletores.....	70

1. INTRODUÇÃO

Afirmar que o nosso planeta possui energia em abundância e que ela é mal utilizada não constitui novidade. Afirmar que além da má utilização de nossa energia não existe um planejamento objetivo no sentido de incentivar o uso de fontes alternativas também há muito deixou de ser novidade.

Em um país com dimensões continentais como o Brasil, onde os aproveitamentos hídricos ainda não foram inteiramente inventariados e muito menos aproveitados, o carvão continua pouco explorado, o xisto está abandonado, ou quase, a existência da turfa é ignorada pela maioria dos brasileiros, o vento serve para refrescar e o sol para bronzear a pele dos bem aquinhoados, uma crise energética não deveria causar surpresa.

Nas casas brasileiras faz-se uso, na maioria das vezes, de lâmpadas incandescentes, com rendimento luminoso paupérrimo, utilizam-se eletrodomésticos produzidos com o emprego de tecnologias ultrapassadas, em decorrência do baixo grau de exigência e pouco poder aquisitivo do povo, e na maioria das vezes, após um dia de trabalho, volta-se para casa, e o banho é tomado em chuveiros elétricos arcaicos e dispendiosos, gastando-se a energia que um dia faltará.

A substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas é uma medida paliativa, pois não resolverá plenamente a situação. O baixo fator de potência apresentado pelas mesmas fará com que as linhas de transmissão do sistema elétrico, conduzindo menos potência ativa, passem a conduzir mais potência reativa levando a pouco resultado prático.

Existe, contudo, um lado positivo na atual crise energética. É a reativação do interesse pelas energias alternativas de geração local, cujas tecnologias sejam conhecidas, como a solar, a eólica e outras tantas.

No caso da energia solar, os princípios que regem o seu aproveitamento para o aquecimento de água em instalações prediais, sejam elas residenciais, comerciais ou mesmo

industriais, suas utilizações mais imediatas e práticas, já são suficientemente conhecidos nos meios acadêmicos e empresariais.

Os sistemas solares são compostos basicamente de um conjunto de coletores solares, canalizações e reservatório com isolamento térmico, conjuntos estes que poderão ser mais ou menos sofisticados.

Considerando-se que a energia solar está disponível em todos os recantos do planeta, em maior ou menor quantidade, dependendo da latitude, estações do ano e condições meteorológicas, o principal fator limitador para a generalização de seu uso no Brasil, até o presente momento, foi, sem sombra de dúvida, a falta de poder aquisitivo da maioria da população e a existência de gás e de energia elétrica abundantes e baratos para as classes de maior poder aquisitivo. Por outro lado, as empresas pioneiras na produção e instalações dos sistemas de aquecimento solar foram responsáveis, em grande parte, pela divulgação de uma idéia errônea sobre a viabilidade do uso de energia solar no aquecimento de água para consumo doméstico, fazendo crer que o produto era caro e destinava-se somente às elites, sendo a instalação de um sistema solar um símbolo de *status*, de alto custo; mas esta situação já está mudando.

Em 1996, ano anterior ao início da privatização das concessionárias de energia elétrica, o MWh era vendido, para os consumidores, ao redor de R\$134,59; atualmente paga-se em torno de R\$284,89 pelo mesmo MWh. Por estranho que pareça, dentro de um regime de livre iniciativa, existe a ameaça de punição para quem não reduzir o consumo de energia elétrica, quando o oposto seria o esperado. Com tudo isso, as atenções do governo e as esperanças dos consumidores se voltam para as energias alternativas.

No Rio Grande do Sul, como de resto em todo o Brasil, o consumo de energia elétrica aumenta com a chegada do verão. No Estado particularmente, as características de sazonalidades deverão agravar em muito a atual crise energética, principalmente na chegada do verão de 2002, quando as demandas coincidentes do levante hidráulico para a lavoura orizícola e o consumo dos veranistas, mais uma vez, irão sobrecarregar o sistema elétrico regional. Deve-se observar que o deslocamento de veranistas rumo ao litoral não necessariamente representa uma diminuição do consumo de energia em seus locais de origem, pois, não raro, enquanto uma parte de família permanece em férias no litoral ao longo da semana, outra parte retorna para atender a compromissos profissionais.

Para que se tenha uma idéia da gravidade da situação, a Figura 1.1 mostra a curva de carga para o dia de maior consumo no litoral, durante o verão de 2001, um sábado, dia 10 de fevereiro. O ponto de observação foi a Subestação Osório 2, da Companhia Estadual de Energia Elétrica, instalada no município de Osório, por onde passa toda a energia consumida no Litoral Norte, que abrange os consumidores entre os municípios de Tavares e Torres. Observa-se claramente que a ponta de carga ocorreu naquele horário em que os veranistas usualmente já se recolheram às suas residências e estão fazendo uso de eletrodomésticos, televisores e chuveiros elétricos.

O gráfico acima referido representa apenas o consumo de energia elétrica no Litoral Norte do Estado, tendo sido apresentado como exemplo, sugerindo uma possibilidade de aplicação da energia solar para aquecimento com o objetivo de reduzir uma “ponta de carga” indesejável. Este trabalho, contudo, não abrangerá aquela região, restringindo-se à Capital.

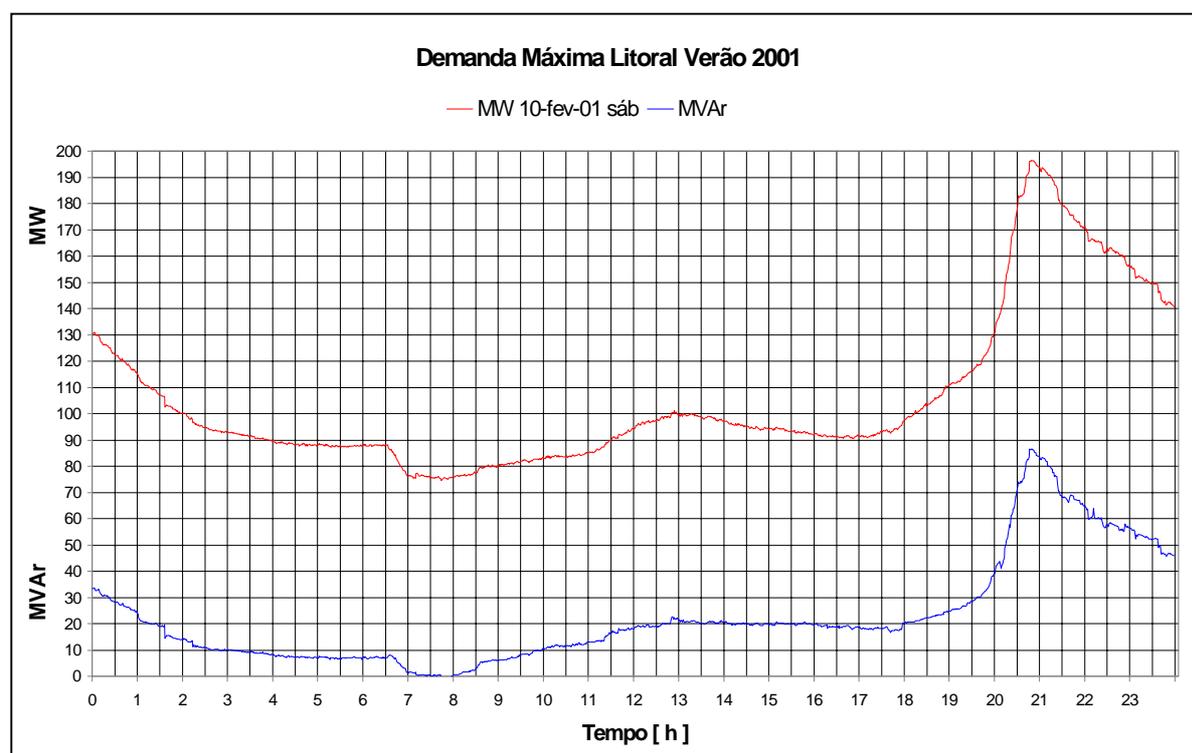


FIGURA 1.1 – DEMANDA MÁXIMA DO VERÃO DE 2001

Espera-se que a legislação sobre a obrigatoriedade de investir 1% de seu faturamento em pesquisa de fontes alternativas de energia, por parte das concessionárias de

energia elétrica, e a isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) e Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) sobre coletores solares venham estimular o maior emprego do aquecimento solar residencial e industrial.

Se da pesquisa espera-se o desenvolvimento de alternativas viáveis e mais baratas para o aquecimento solar destinado ao uso residencial, hospitalar e industrial, também se espera que o fator de escala possa baixar ainda mais o preço dos coletores, tanques e demais acessórios, tornando mais atrativo o uso do aquecimento solar.

Segundo Lourenço Júnior, a utilização da energia solar para aquecimento da água é:

“(...) uma das aplicações mais práticas e é uma área a ser analisada de uma forma especial, pois no tocante à economia de energia elétrica é uma opção extremamente útil. Através dela é possível diminuir ou até mesmo substituir o uso dos chuveiros elétricos (aparelhos responsáveis por uma inconveniente carga para as concessionárias, geradoras e distribuidoras de energia elétrica) pois o Brasil possui incidência de radiação solar em todo o seu território”. [LOURENÇO JÚNIOR, 2000].

Esta dissertação de Mestrado desenvolve, além deste, 4 capítulos, da seguinte forma:

O Capítulo 2 trata da simulação de sistemas, proporcionando uma visão dos recursos de *software* de simulação, descreve a composição e o funcionamento do *TRNSYS 14.2* e inicia o trabalho pela simulação de um caso para temporada quente e um caso para temporada fria, fazendo uso de um arquivo climático do tipo *TMY* específico para Porto Alegre.

O Capítulo 3 estuda o efeito do dimensionamento de um sistema de aquecimento solar na economia de energia auxiliar, abordando o *setpoint* do termostato, o número de coletores e a capacidade volumétrica do reservatório

O Capítulo 4 estuda os efeitos da potência da resistência de aquecimento, da posição da resistência e do termostato dentro do reservatório, além de três situações especiais com diferentes perfis de consumo de água quente, envolvendo controle horário do uso da energia de apoio.

O Capítulo 5 elenca as conclusões sobre o trabalho e discute possibilidades de continuidade.

2. SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

As simulações computacionais têm encontrado uma gama de empregos cada vez mais ampla, nas mais variadas áreas do conhecimento, objetivando sempre economizar tempo e sobretudo queimar etapas, particularmente aquelas que normalmente demandam mais tempo e recursos financeiros. Através da simulação é possível conhecer o comportamento de um sistema sem a necessidade de montar protótipos. Também é possível o desenvolvimento completo de um novo produto sem a necessidade de sua existência física, ficando o protótipo relacionado praticamente à engenharia de produto, passando a ser manuseado somente para pequenos retoques.

2.1 Emprego do *TRNSYS* (*Transient System Simulation Program*)

Empregou-se o *software TRNSYS* em sua versão 14.2. em todos os casos estudados no presente trabalho. Este *software* está disponível comercialmente desde 1975 e foi desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade de Wisconsin (USA) para o estudo e análise envolvendo aplicação de energia solar. A elaboração do *TRNSYS* contou com a colaboração, dentre outros, de John A. Duffie e William A Beckman, ambos conhecidos pela autoria do livro **Solar Engineering of Thermal Processes** (Duffie e Beckmann, 1991), sendo o *TRNSYS* um programa de simulação transiente com estrutura modular.

O programa *TRNSYS* utilizou o modelo de múltiplos nós, descrito em Oliveski, 2000, conforme segue:

Segundo a autora, no modelo de Múltiplos Nós o reservatório é modelado com um número fixo de volumes. Afirma ainda que:

“O domínio de cálculo ou volume de controle deste modelo envolve apenas o volume de água contida no reservatório. Este volume de controle é dividido em segmentos, que podem ser imaginados como discos sobrepostos, sendo que a temperatura destes discos é uniforme para cada um deles” [Oliveski, 2000].

Observe-se a equação (1), abaixo, que é utilizada por este modelo:

$$(1) \quad Mc_p \frac{dT}{dt} = -m c_p \Delta z \frac{dT}{dt} + k A_r \Delta z \frac{d^2 T}{dz^2} + \dot{Q}$$

Do lado esquerdo desta equação encontra-se o termo temporal; do lado direito está o termo que representa a quantidade de energia cedida ou recebida através do fluxo de massa oriundo dos circuitos de aquecimento e reposição/consumo, o termo difusivo e o termo fonte. O termo fonte pode englobar as perdas térmicas para o ambiente externo, possíveis fontes de energia auxiliar (resistência elétrica, trocador de calor, etc.) e trocas térmicas devido à presença de componentes mecânicos.

O volume de controle deste modelo pode ser representado pela Figura 2.1, onde m_{col} é a vazão dos coletores; m_{ret} , a vazão de retorno; m_{rep} , a vazão de reposição; m_{cons} , a vazão de consumo; T_{col} , a temperatura com que a água chega dos coletores; T_N , a temperatura do fundo do reservatório; T_{rep} , a temperatura da água de reposição; T_1 , a temperatura no ponto mais alto do reservatório; e T_{amb} , a temperatura ambiente.

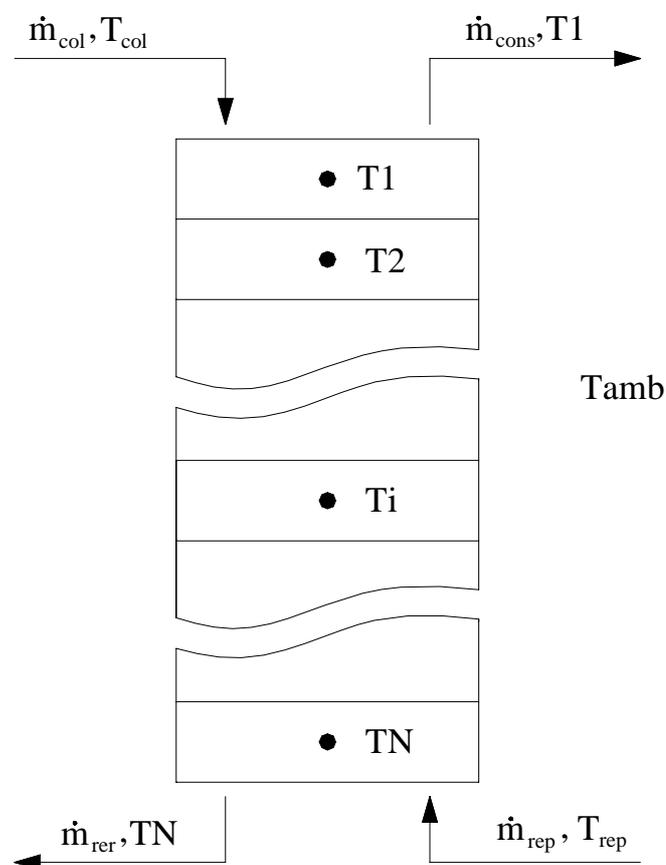


FIGURA 2.1 – MODELO DE MÚLTIPLOS NÓS

Fonte: Oliveski, 2000.

A utilização deste modelo faz com que o grau de estratificação seja determinado pela escolha da quantidade de segmentos. Quanto maior o número de segmentos maior será o grau de estratificação [Klein *et al.*, 1990 apud Oliveski, 2000]. Se o reservatório for constituído de um único segmento, este é modelado como sendo completamente homogêneo e nenhuma estratificação será considerada. A altura dos diversos segmentos pode assumir valores distintos. Utilizando-se este modelo, é possível optar-se entre modelamento com posição de entrada fixa ou móvel. A posição de entrada diz respeito ao nível do reservatório em que é adicionado o fluido de retorno dos coletores. Nos modelos de posição de entrada fixa, o fluido oriundo dos coletores é inserido no topo do reservatório e a água de reposição entra pela base do mesmo. Nos modelos de posição de entrada variável, o fluido proveniente dos coletores é adicionado ao segmento que possui a massa específica mais próxima da massa específica do fluido de entrada.

A água proveniente dos coletores, quando entra numa camada de temperatura superior e massa específica inferior à sua, se desloca para baixo até encontrar uma camada de mesma massa específica. Portanto é fisicamente mais realista o modelamento com posição de entrada móvel.

Oliveski, 2000 acentua que Klein *et al.*, 1990 e Duffie e Beckmann, 1991 apresentaram a equação (1) para um segmento genérico do reservatório, conforme mostrado na equação (2).

$$M_i c_p \frac{dT}{dt} = \alpha c_i m_{col} c_p (T_{col} - T_i) + \beta c_i m_{rep} c_p (T_{rep} - T_i) + \delta c_i \gamma c_i c_p (T_{i-1} - T_i) + (1 - \delta c_i) \gamma c_i c_p (T_i - T_{i+1}) + k A_i \Delta y \frac{d^2 T}{dy^2} + U_i A_i (T_i - T_{amb}) + \dot{Q}$$

(2)

Onde U é o coeficiente global de troca térmica; αc , βc , δc e γc são funções de controle de cálculo e são definidas da seguinte maneira:

$\alpha c_i = 1$, se o fluido vindo do coletor é adicionado ao nó i, 0 para os demais nós;

$\beta c_i = 1$, se o fluido de reposição é adicionado ao nó i, 0 para os demais nós.

$$\gamma c_i = m_{col} \sum_{j=1}^{i-1} \alpha c_j - m_{rep} \sum_{j=i+1}^N \beta c_j$$

$$\delta c_i = 1, \text{ se } \gamma c_i > 0$$

$$0, \text{ se } \gamma c_i \leq 0$$

(3)

Afirma ainda Oliveski que Klein *et al.*, 1990 apresenta duas versões do modelo de Múltiplos Nós. A primeira versão é chamada de modelo Estratificado e a segunda, de modelo Detalhado. O modelo Detalhado difere do modelo Estratificado em dois aspectos, a saber, no que diz respeito a sua formulação e, também, ao uso de um artifício para obtenção do perfil de temperatura ao longo da altura. Quanto à formulação, o modelo Detalhado acrescenta uma

condutividade extra (Δk) à condutividade da água. Esta condutividade extra é uma função da condutividade da parede multiplicada pela relação entre a área transversal da parede e a área transversal do volume interno do reservatório, conforme pode ser visto nas equações (4) e (5) abaixo:

$$M_i c_p \frac{dT}{dt} = \alpha c_i m_{col} c_p (T_{col} - T_i) + \beta c_i m_{rep} c_p (T_{rep} - T_i) + \delta c_i \gamma c_i c_p (T_{i-1} - T_i) + (1 - \delta c_i) \gamma c_i c_p (T_i - T_{i+1}) + (k + \Delta k) A_i \Delta y \frac{d^2 T}{dy^2} + U_i A_i (T_i - T_{amb}) + \dot{Q}$$

(4)

$$\Delta k = k_{par} \frac{A_{tpr}}{A_i}$$

(5)

Onde A_{tpr} é a área transversal da parede do reservatório.

Kleinbach *et al.*, 1993, segundo Oliveski, 2000, desprezaram os efeitos difusivos, levando em conta apenas os efeitos da convecção forçada e as perdas térmicas do ambiente, conforme pode ser visto na equação (6) abaixo:

$$M_i c_p \frac{dT}{dt} = \alpha c_i m_{col} c_p (T_{col} - T_i) + \beta c_i m_{rep} c_p (T_{rep} - T_i) + \delta c_i \gamma c_i c_p (T_{i-1} - T_i) + (1 - \delta c_i) \gamma c_i c_p (T_i - T_{i+1}) + U_i A_i (T_i - T_{amb}) + \dot{Q}$$

(6)

A configuração do sistema a ser simulado é feita através de ícones denominados *type*, os quais representam subrotinas na janela de montagem (*deck*), no qual o usuário faz a estruturação dos componentes do sistema interligando-os de forma a garantir um fluxo de informações (*assembly*).

Os *type* são subrotinas escritas em linguagem Fortran (Klein, 1997) e representam os diferentes componentes empregados no sistema utilizados, como, por exemplo, coletores,

reservatórios térmicos, misturadores ponto de consumo entre outros, para o caso de seu emprego para simular o uso de energia solar para o aquecimento de água como foi feito por Siqueira e Krenzinger, 1998, tendo em vista que o *TRNSYS* tem emprego também em outras áreas de pesquisa que envolvem calor. No caso do reservatório térmico, o programa utiliza artifícios computacionais para determinar uma distribuição de temperaturas estratificadas que pode ser considerada muito similar à verdadeira. Embora uma distribuição de temperaturas mais exata possa ser determinada pelo procedimento desenvolvido por Oliveski (2000) para a precisão necessária para esta dissertação não se julgou necessário intervir no processo convencional do programa.

2.2 Detalhamento do *Assembly* para a Simulação do Sistema de Aquecimento Solar

Toda a configuração do sistema empregado nas simulações está centrada no *type 45*. O ícone denominado *type 45* representa a subrotina que simula os sistemas de aquecimento solar que operam por termossifão, consistindo, basicamente, de um coletor solar e de um reservatório termicamente isolado onde se encontram o termostato e a resistência auxiliar de aquecimento.

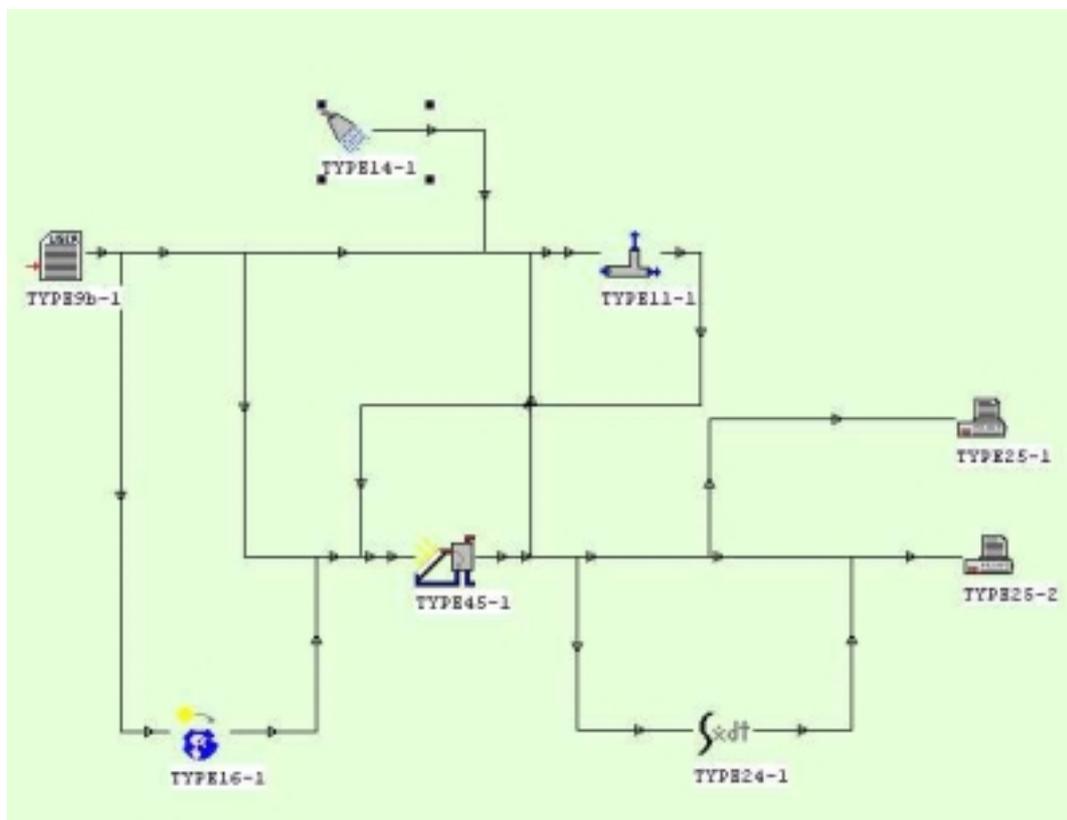


FIGURA 2.2 – ARRANJO UTILIZADO EM TODAS AS SIMULAÇÕES REALIZADAS

Ao “clique” com o mouse sobre o ponto de abertura do ícone *type 45* – *Thermosyphon Collector-Storage Subsystem* – uma janela denominada *TYPE 45 – type 45 / parameters* – abre-se, aparecendo os parâmetros referentes aos coletores solares, ao reservatório térmico, ao sistema auxiliar de aquecimento, conforme pode ser visto na Figura 2.3, abaixo. Cada um dos *TYPE*, ao ser utilizado pela primeira vez, recebe o índice “1” e, quando utilizado pela segunda vez no mesmo *deck*, recebe o índice “2”.

Para a simulação dos casos envolvendo aquecimento solar o *Data Reader* necessitaria ler arquivos de dados no formato *TMY (Typical Meteorological Year)*, que fornece os dados meteorológicos e sazonais acima enumerados e referenciados a um período de trinta anos, constituindo-se numa seqüência de dados representativos dos fenômenos meteorológicos ocorridos durante aquele período de tempo. Este ano típico meteorológico fornece dados

climáticos a intervalos de tempo de uma hora, iniciando em 0 e terminando em 8760 horas. Nas simulações constantes deste trabalho, utilizou-se, na realidade, um arquivo com formato similar ao *TMY*, denominado *TMYP OA*, cujos dados climáticos foram coletados e estatisticamente trabalhado pelo Laboratório de Energia Solar da UFRGS, para representar um ano climático típico de Porto Alegre, utilizando modelos de Macagnan, 1989 e Krenzinger, 1994.

Conforme será visto mais adiante, empregaram-se dois tipos de arquivos de dados climáticos. O primeiro deles, denominado simplesmente *TMYP OA*, reunia os dados climáticos acima enumerados e foi o mais utilizado neste trabalho. Utilizou-se um segundo tipo de arquivo climático, derivado do primeiro e em versões variadas, às quais decidiu-se chamar genericamente de *TMYP OA(X)*, onde “X” é um número ou letra que identifica a versão em uso, sendo que estes arquivos têm uma coluna a mais do que o original. Esta oitava coluna, acrescentada ao arquivo *TMYP OA* original, contém o dígito de controle (1 ou 0), destinados a habilitar ou desabilitar a fonte de energia auxiliar do sistema de aquecimento em um intervalo de tempo previamente escolhido. A rotina em *Visual Basic* para desenvolver o arquivo *TMYP OA(X)* foi desenvolvida no Laboratório de Energia Solar da UFRGS (Apêndice I). Abaixo a descrição de cada um:

- a) *Type14 – Time Dependent Forcing Function* – é uma subrotina que caracteriza a vazão de água quente (fluxo ao longo do tempo). Este *type*, na verdade, representa a carga ou o consumo de água utilizada para consumo;
- b) *Type25 – Printer* – subrotina utilizada para apresentação dos resultados produto da simulação. Neste trabalho, por uma mera questão de comodidade, lançou-se mão do uso de dois ícones, *TYPE25-1* e *TYPE25-2*, donde, após cada uma das simulações, os dados eram apresentados na forma de uma planilha compatível com o *Microsoft Excel*, permitindo que facilmente os dados fossem levados para tratamento através deste software;
- c) *Type16 – Solar Radiation Processor* – tem a finalidade de transformar os dados fornecidos pelo Arquivo *TMYP OA* (*Dados de Radiação Solar Horizontal Total*) em valor para superfícies inclinadas;
- d) *Type11 – Temperature Controlled Flow Diverter* – desempenha as funções de um misturador; ele de fato, fornece uma visão mais fiel do desempenho do sistema de aquecimento utilizando energia solar;

- e) *Type24 – Quantity Integrator – além de efetuar o somatório das grandezas empregadas pelo programa simulador, no caso o TRNSYS 14.2, é na realidade, uma subrotina destinada ao auxílio deste programa simulador, buscando a redução das atividades de pós-processamento;*
- f) *Type9 – Data Reader – é uma subrotina que faz a leitura de dados como mês, dia, hora, radiação solar, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e velocidade do vento, em um intervalo regular de tempo.*

2.3 Dimensionamento de um Sistema para Verão e para Inverno

A história do aproveitamento da energia solar para o aquecimento de água destinada ao uso doméstico, hospitalar, industrial ou comercial está repleta de narrativas inteiramente desabonatórias ao seu emprego, não pela sua já amplamente comprovada utilidade, mas por estimativas de aproveitamento mal feitas a seu respeito, o que de certa forma resultaram em projetos inadequados.

Cita-se, como exemplo, em Porto Alegre, uma escola de natação que mandou remover um sistema de aquecimento solar recém implantado para uso nas piscinas térmicas pelo simples fato de não saberem o que fazer com o excesso de calor produzido durante o verão, o que elevava a temperatura da água da piscina principal para um ponto muito acima do tolerável.

Por outro lado, não são raros os casos de queixas sobre o mau funcionamento do sistema de aquecimento solar durante o inverno, quando o pouco calor captado pelos sistemas de aquecimento não é suficiente para garantir um banho confortável, nem mesmo nos dias de alta insolação, sendo necessário o uso continuado da fonte de energia auxiliar.

Tais ocorrências justificam-se pela posição geográfica de Porto Alegre e de tantas outras localidades distantes do Equador Terrestre, pois está a Capital Gaúcha situada na Latitude 30° S e Longitude 51° W. As Figuras 4 e 5, extraídas do programa *RADIASOL* (Krenzinger e

Macagnan,1995) mostram no que resulta esta localização geográfica na distribuição da radiação solar.

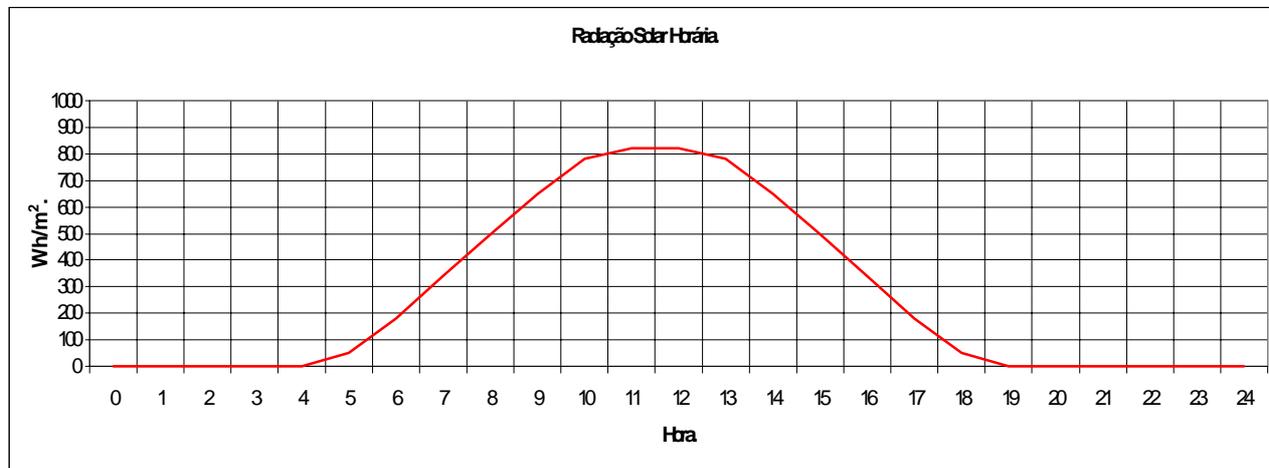


FIGURA 2.3 – GRÁFICO DA RADIAÇÃO SOLAR HORÁRIA PARA O DIA 22 DE DEZEMBRO

Em 22 de dezembro, normalmente o primeiro dia de verão no hemisfério sul, o nascer do sol ocorre às 05h03 min e o pôr do sol ocorre às 18h57 min (hora solar), dando ao dia uma duração de 13h54 min. Além disto, o sol se encontra numa inclinação de 23° e 15' ao norte, o que significa uma menor camada da atmosfera para ser percorrida pelos raios solares que nos demais dias do ano.

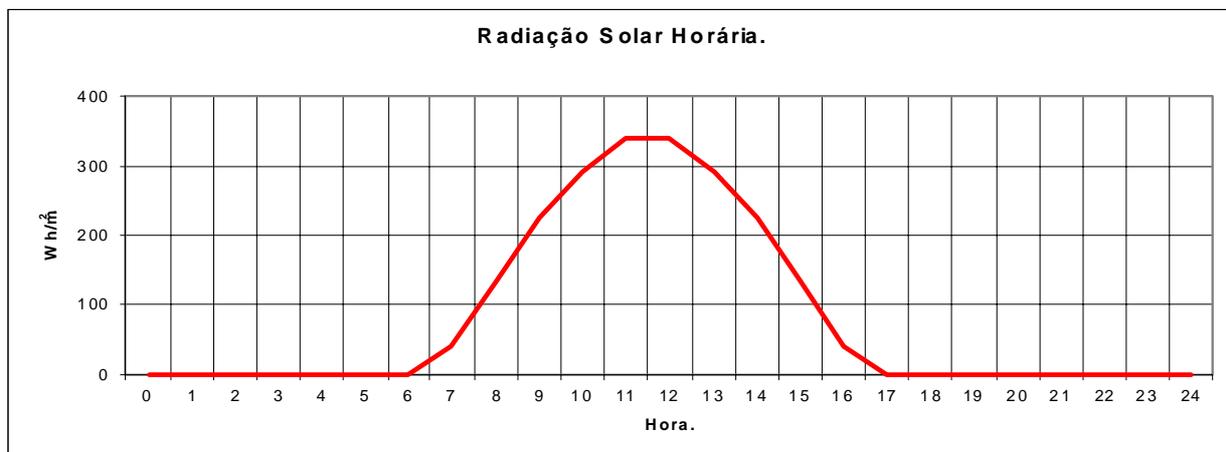


FIGURA 2.4 – GRÁFICO DA RADIAÇÃO SOLAR HORÁRIA PARA O DIA 22 DE JUNHO

Em 22 de junho, normalmente o primeiro dia de inverno no hemisfério sul, o nascer do sol ocorre às 06h59 min e o pôr do sol ocorre às 17h01 min (hora solar), dando ao dia uma duração de 10:02 horas. Além disto, o sol se encontra numa inclinação de 53° e $15'$ ao norte, o que significa uma camada da atmosfera bem mais extensa para ser percorrida pelos raios solares que nos demais dias do ano.

Para melhor esclarecer o que se afirmou, aproveitando o uso dos resultados como referência, foi simulado um caso típico para de um período de três meses de temperaturas elevadas, entre 21 de dezembro e 21 de março do ano típico, contido no arquivo *TMYP0A*, e, ainda, um outro caso, para o período entre 21 de junho e 21 de setembro, correspondente ao inverno. Com o emprego das condições abaixo listadas, obtiveram-se as Figuras 2.5 e 2.6, apresentadas neste capítulo, que ilustram o problema em causa.

2.3.1 Simulações preliminares

Segundo a prática utilizada pelos instaladores de sistema solares e instruções encontradas na literatura, é normal considerar para Porto Alegre 1 m² de área de coletor por pessoa, quando o consumo é de 50 litros por pessoa/dia. O volume do reservatório deve estar entre 50 e 100 litros por m² de coletor (75 é o valor médio assumido). Assim, uma residência com cinco (5) pessoas corresponderia a 5 m² de coletores e um reservatório de 375 litros de água, sendo usual ajustar a temperatura dentro do reservatório para 60°C.

Para a simulação dos dois casos sugeridos foram considerados os seguintes parâmetros:

- a) Capacidade volumétrica do reservatório de 0,375 m³;
- b) Altura do reservatório 0,91 m;
- c) Altura do termostato 0,55 m;
- d) Altura da resistência de auxiliar aquecimento 0,45 m;
- e) Altura do retorno 0,85 m;
- f) Consumo diário de água 0,25 m³;
- g) Potência nominal da resistência de aquecimento 2,5 kW;
- h) *Setpoint* do termostato 60°C;
- i) Número de 6 coletores solares utilizados, totalizando 5,4 m².

Na simulação é necessário entrar com dados técnicos de desempenho dos componentes. Como neste trabalho se investigam atitudes de dimensionamento e estratégias de utilização dos sistemas, não foram consideradas, em nenhum momento, variações da qualidade dos componentes da instalação. Foram escolhidos coletores solares de boa qualidade cujos parâmetros tinham já sido previamente determinados no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, com o procedimento descrito na ABNT-NBR 10184 (1988), em procedimento conforme descrito por Krenzinger *et al.*, 1996. Os parâmetros da curva de eficiência dos

coletores utilizados nas simulações são $FR_{\tau\alpha}=0,73$ e $FR_{UL}=8 \text{ W/m}^2\text{C}$. Para o reservatório térmico, foi utilizado um coeficiente de perdas tal que, quando o reservatório tem 1m^3 , o coeficiente vale $6,9 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$.

Para simulação da temporada de verão foi considerado um período de 8760 horas, (um ano) com a contagem do tempo iniciando-se em 1^o de julho.

2.3.1.1 Simulação para temporada de verão

TABELA 2.1 – DADOS DA SIMULAÇÃO COM OS PARÂMETROS ACIMA PARA VERÃO

RESUMO PARA VERÃO - 6 COLETORES					
	Q. Útil	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	Fra. Sol.
Coletores	KWh	kWh	kWh	°C	%
6	14763,3	301,6	372,9	59,5	83,0

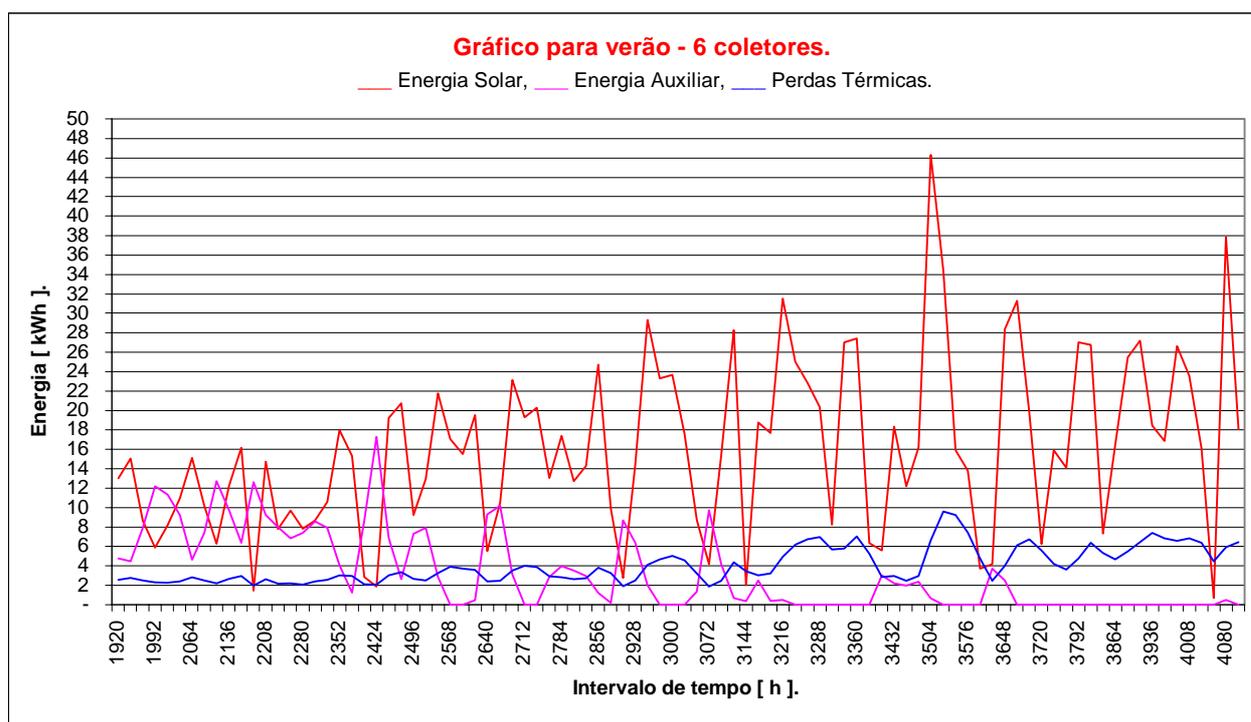


FIGURA 2.5 – ENERGIA ÚTIL E ENERGIA AUXILIAR PARA AS CONDIÇÕES CONSIDERADAS PARA A TEMPORADA QUENTE

Observa-se que a energia útil, captada de acordo com as condições iniciais estabelecidas, para o período de alta insolação, corresponde ao percentual de 83% do total de energia utilizada e a temperatura mínima da água quente do período, dentro do reservatório foi de 59,5°C. A fração solar foi de 1.476,3 kWh e complementou-se com 301,6 kWh de energia auxiliar para manter a água aquecida nas condições exigidas.

2.3.1.2 Simulação para temporada de inverno

TABELA 2.2 – DADOS DA SIMULAÇÃO COM OS PARÂMETROS ACIMA PARA INVERNO

RESUMO PARA INVERNO – 6 COLETORES					
	Q. Útil	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	Fra. Sol.
Coletores	kWh	KWh	kWh	°C	%
6	765,4	1035,3	220,5	59,5	42,5

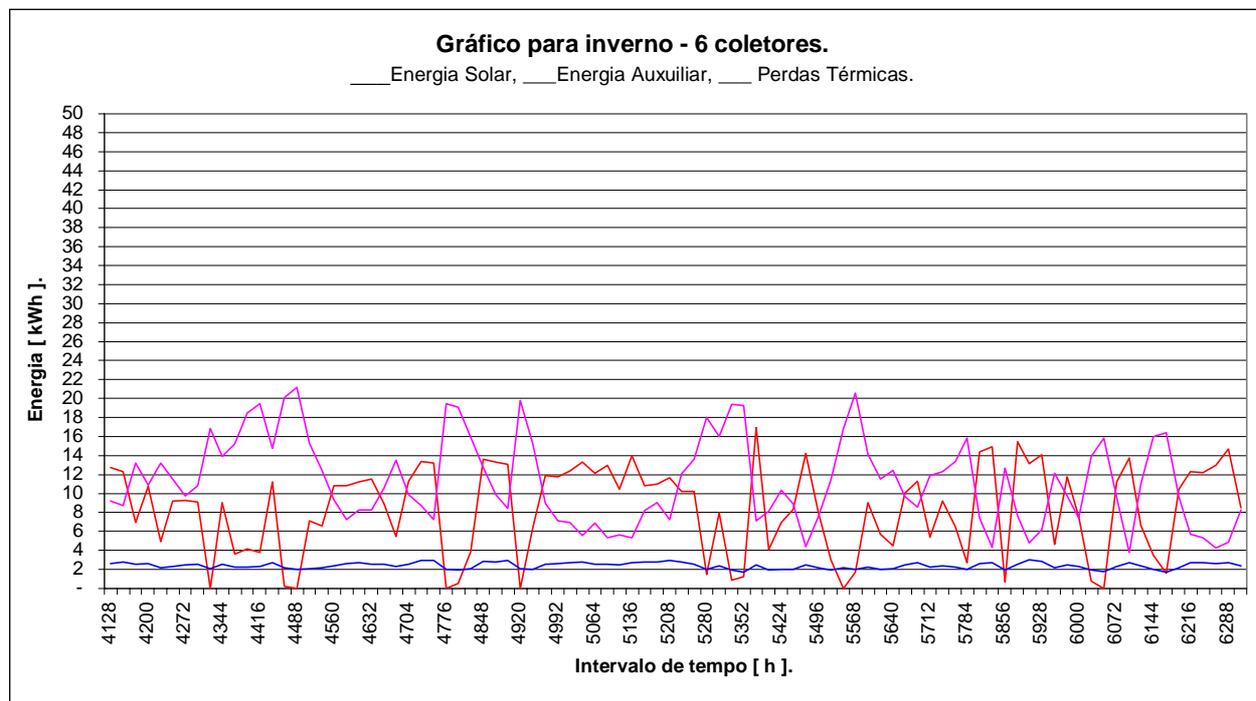


FIGURA 2.6 – ENERGIA ÚTIL E ENERGIA AUXILIAR PARA AS CONDIÇÕES CONSIDERADAS PARA INVERNO

Observa-se que a energia útil captada, de acordo com as condições iniciais estabelecidas, para o período de baixa insolação, corresponde ao percentual de 42,5% do total de energia utilizada e a temperatura mínima da água quente do período, dentro do reservatório foi de 59.5 °C. Captaram-se 765,4 kWh de energia solar e complementou-se com 1.035,3 kWh de energia auxiliar para manter a água aquecida nas condições exigidas.

2.4 Metodologia das Simulações

Para se alcançar a meta de diminuição do consumo de energia auxiliar, foi elaborada uma estratégia que consistiu na execução de simulações variando apenas um parâmetro de cada vez. Depois de efetuadas várias rodadas de simulações e estabelecidos valores

que aparentemente designavam situações ótimas para cada parâmetros, os parâmetros variados passaram a ser substituídos por parâmetros fixos com valores próximos do ótimo.

Os dados obtidos foram organizados em tabelas e algumas delas produziram gráficos para facilitar a análise.

3 EFEITO DO DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR NO CONSUMO DE ENERGIA AUXILIAR

Uma abordagem que se julgou adequada para apresentar e analisar os resultados desta dissertação foi subdividir o assunto em dois tópicos distintos, um deles abordando aspectos construtivos do sistema como área de coletores e volume do tanque e, o outro, informações complementares que possam influir no desempenho do sistema ou resultar em economia suplementar. Assim, elegeu-se para abordagem, neste capítulo, o estudo da influência do *setpoint* do termostato, do número de coletores e da capacidade volumétrica do reservatório. A influência da potência nominal da resistência auxiliar de aquecimento na economia de energia auxiliar, a influência da posição da resistência auxiliar de aquecimento e da posição do termostato no desempenho do sistema e, ainda, a discussão de três casos especiais de distribuição do consumo ao longo do dia serão tópicos abordados no capítulo seguinte.

Para todos os casos simulados, manteve-se uma relação constante entre o raio “r” e a altura “h” do reservatório empregado, expressa pela Equação (7):

$$h = 2,5.r$$

(7)

3.1 Efeito do *Setpoint* do Termostato

Sabe-se que um sistema de aquecimento de água, empregando energia solar sem o emprego de uma fonte auxiliar de aquecimento para os dias de baixa captação, exigiria uma grande área de coletores solares e um reservatório para armazenamento de grande capacidade volumétrica e baixas perdas, pois a energia acumulada depende do volume do reservatório, de

seu isolamento térmico, da temperatura ambiente e da temperatura da água aquecida, conforme expresso pela Equação (8):

$$Q = mC_p\Delta T$$

(8)

Onde $\Delta T = T_{aq} - T_{am}$, que expressa a diferença entre a temperatura da água aquecida, dentro do reservatório, e a temperatura do ambiente onde o reservatório se encontra.

Sabendo-se que, em princípio, a água deverá ter seu volume determinado pela necessidade de consumo, existem duas possibilidades para reduzir as perdas térmicas: reduzir o tamanho do reservatório ou jogar com os valores de ΔT . Optou-se pela segunda alternativa, a qual implica o emprego de uma temperatura de armazenamento baixa o suficiente para reduzir de forma significativa as perdas no reservatório, contudo, alta o suficiente para chegar ao misturador com uma temperatura não inferior a 40°C, cuja justificativa será vista logo a seguir.

Com base em pesquisa direta efetuada pelo autor, pediu-se para algumas pessoas regularem a seu gosto a temperatura da água para o banho e, após isso, medir, com o emprego de um termômetro, a temperatura dessa água. A maioria das pessoas consultadas declarou ter encontrado uma temperatura próxima, mas abaixo dos 40°C.

Tendo-se estabelecido, para este trabalho, que o uso primordial da água produzida por aquecimento solar se destinaria à higiene pessoal, assumiu-se, então, que a água deveria chegar ao misturador numa temperatura nunca inferior aos 40°C. Considerando-se que o sistema apresenta perdas térmicas nas conexões e tubulações, decidiu-se efetuar uma rodada de simulações utilizando um *setpoint* de 42°C, confiando ser o suficiente para o atendimento de todas as situações, chegando ao misturador nas condições exigidas.. Mais tarde, constatou-se que, em situações extremas, esse valor era insuficiente, exigindo novas rodadas de simulações, empregando agora um *setpoint* de 43°C, que se mostrou bom para todos os demais casos posteriormente testados.

Considerou-se então que escolher um *setpoint* de 43°C era uma boa opção, sendo este o valor empregado na quase totalidade dos casos simulados. Shariah e Löff, 1997 mencionam

trabalho de Gutierrez *et al.*, 1974 que teriam também utilizado os mesmos 43°C em simulações usando o *TRNSYS*.

3.2 Estudo do Número de Coletores para o Bom Desempenho de um Sistema Solar

Em se tratando do aproveitamento da energia solar para o aquecimento de água, pode parecer lógico ao leigo que, quanto maior o número de coletores empregados, mais benefícios serão conseguidos. Existem, contudo, muitas variáveis em jogo e, embora não faça diretamente parte do escopo deste trabalho, o custo dos coletores solares é uma dessas variáveis.

Para as simulações que visavam a identificar o número de coletores mais adequado em termos de rendimento para demanda e capacidade de armazenamento conhecidas, foram empregados os parâmetros de um coletor comercial, similar aos coletores já ensaiados no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, produzidos com chapas e tubos de cobre anodizados, com área individual de 0,9 m². Para a capacidade de armazenamento de água quente, utilizou-se como valor inicial 1 m³ e, para a resistência auxiliar de aquecimento, arbitrou-se a metade da potência nominal usualmente empregada em aquecedores elétricos de passagem (chuveiros elétricos), que se situa ao redor de 5 kW, utilizando-se, então, o valor de 2,5 kW.

Tanto a capacidade de armazenamento do reservatório de água quente quanto o valor nominal da resistência auxiliar de aquecimento serão objetos de rodadas de simulações específicas ainda neste capítulo.

Para que se possa realizar uma simulação, é necessário que o formulário do *TRNSYS*, denominado *TYPE 45-1 – Type 45/parâmetros*, esteja carregado com os parâmetros de sistema e, ainda, com os parâmetros, em particular, os correspondentes ao caso que se deseja simular.

Ao conjunto destes parâmetros chamou-se de Condições Iniciais e os mesmo vão listados a seguir. Estes valores serão considerados valores fixos ao longo de todas as simulações apresentadas neste capítulo, mudando apenas o valor correspondente ao número de coletores empregados, cuja área é mostrada no primeiro item do formulário acima mencionado.

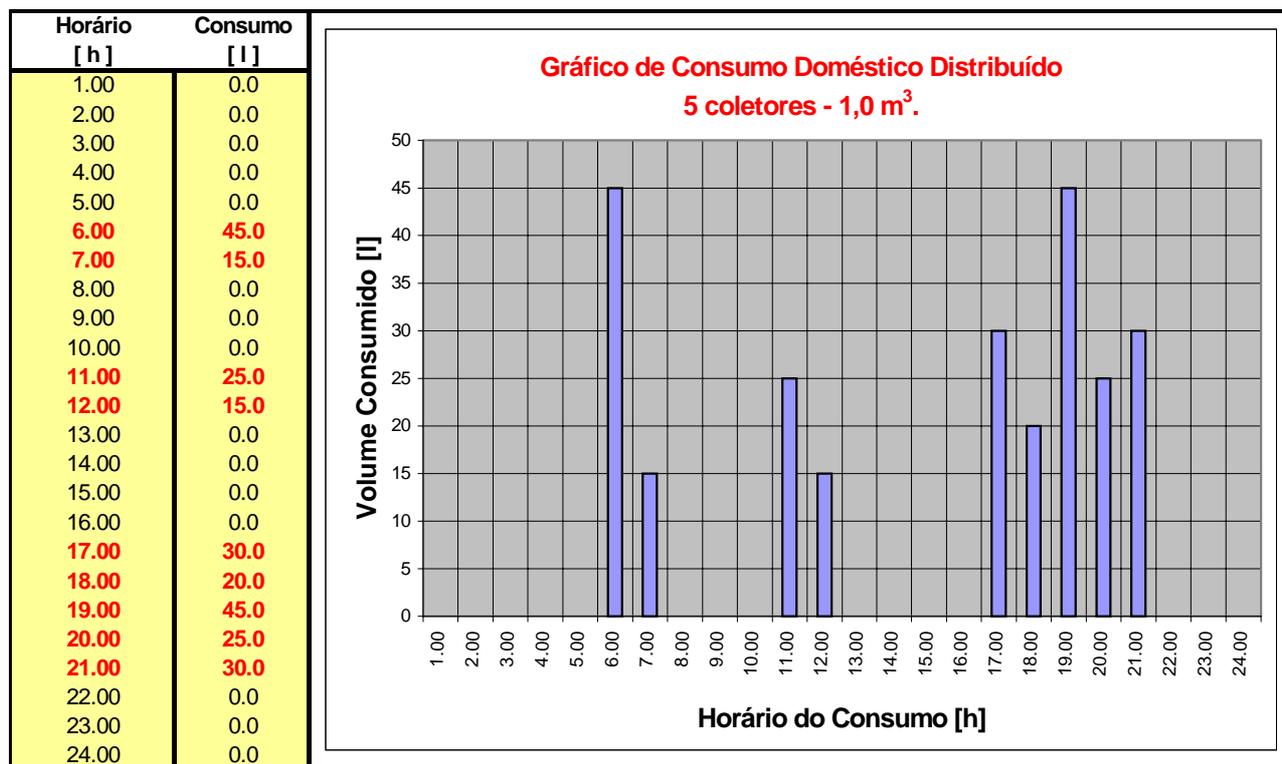


FIGURA 3.1 – PERFIL DE CONSUMO DIÁRIO

A Figura 3.1 apresenta o gráfico correspondente ao perfil de consumo diário que será empregado no presente estudo.

- Volume do reservatório de água quente, em m³: 1,0;
- Consumo diário de água quente, em m³: 0,25;
- Altura da resistência auxiliar variável em função do volume;
- Altura do termostato variável em função do volume;
- Potência nominal de dissipação da resistência auxiliar, em kW: 2,5;
- Setpoint do termostato, em °C: 43;
- Número de coletores solares variando entre 1 e 30, unidades de 0,9 m².

Nas simulações para um número de coletores variável obtiveram-se os resultados ilustrados na seqüência de gráficos apresentados a seguir. Os valores que geraram estes gráficos foram retirados da Tabela 3.1, apresentada no final deste capítulo.

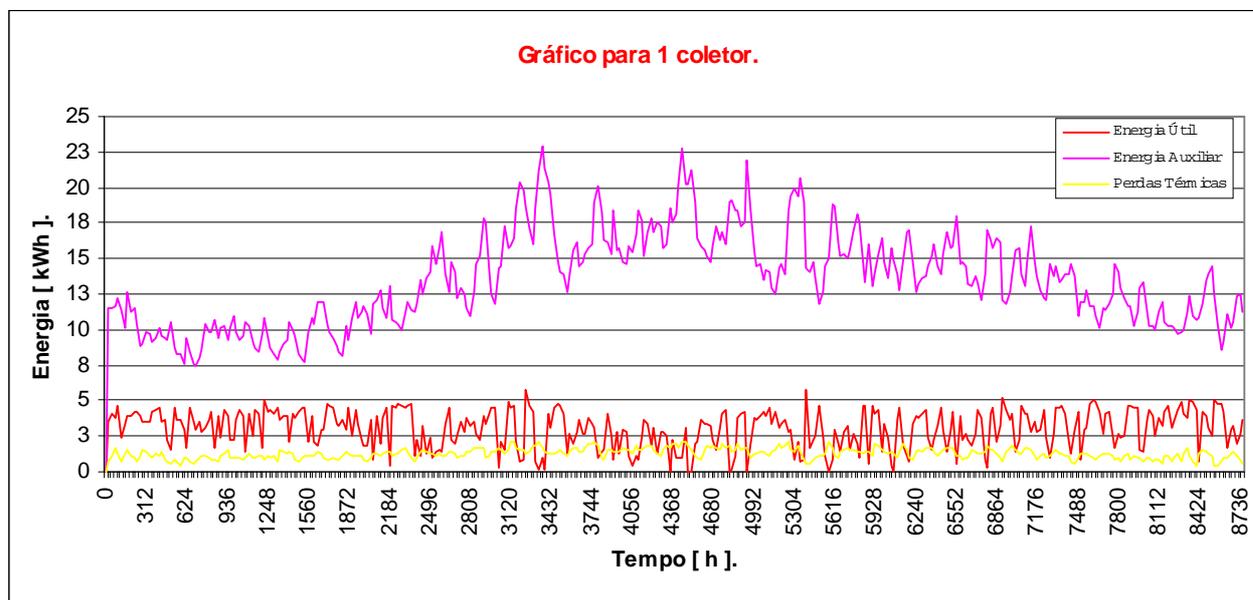


FIGURA 3.2 – GRÁFICO DE DESEMPENHO EMPREGANDO APENAS 1 COLETOR SOLAR

As curvas do gráfico apresentado na Figura 3.2 demonstram de maneira inequívoca a ineficácia do sistema empregando apenas 1 coletor solar para a obtenção de água quente nas condições estabelecidas. A energia solar captada, para o presente caso, representa apenas 18,3 % do total da energia utilizada pelo sistema de aquecimento, conforme Tabela 3.1, no final deste capítulo. Embora tenha atendido à demanda, a máxima temperatura registrada durante o ano dentro do reservatório, foi de 43°C, o que sugere ter sido a carga atendida na sua maior parcela pela energia auxiliar, tendo o reservatório um comportamento similar ao de um simples boiler elétrico.

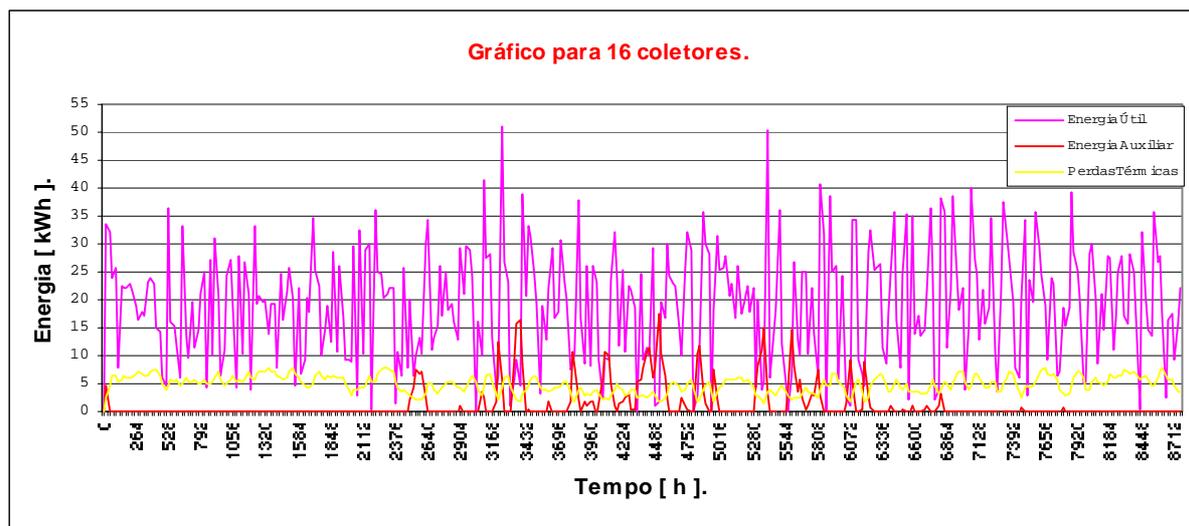


FIGURA 3.3 – GRÁFICO DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA EMPREGANDO 16 COLETORES SOLARES

A energia solar representa, neste caso, 93% do total da energia utilizada pelo sistema. De acordo com a Tabela 3.1, a máxima temperatura registrada dentro do reservatório, durante todo o ano, foi de 81,5°C.

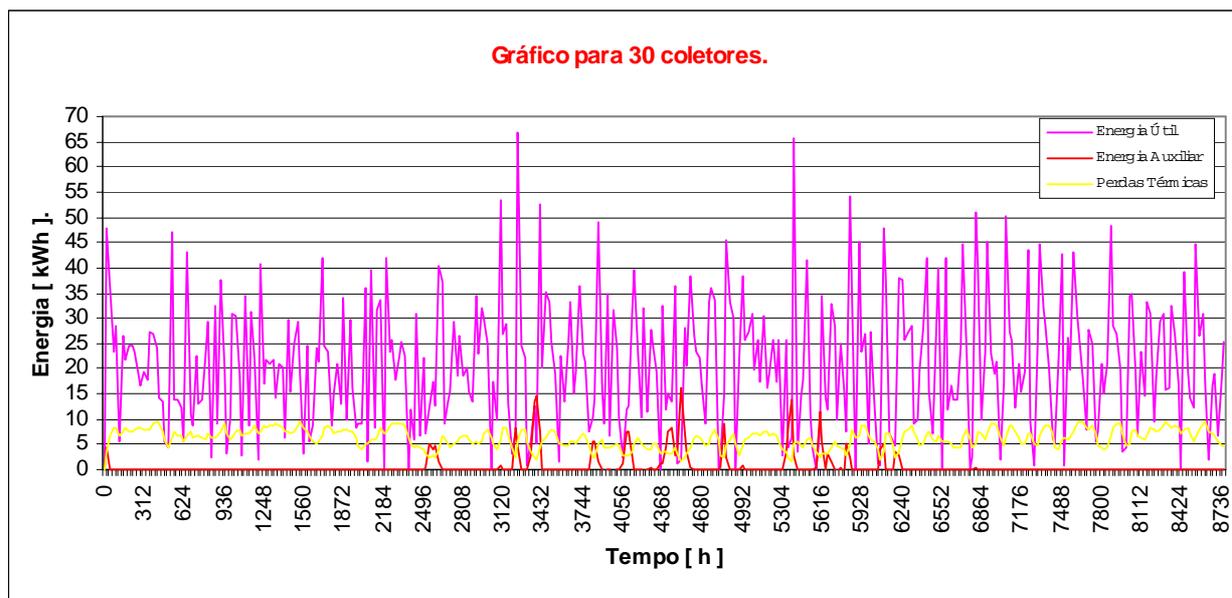


FIGURA 3.4 – GRÁFICO DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA EMPREGANDO 30 COLETORES SOLARES

O gráfico anual demonstra um crescimento irrisório na eficácia do sistema, empregando agora 30 coletores solares para a obtenção de água quente nas condições estabelecidas. A energia solar representa 96% do total da energia utilizada pelo sistema, conforme mostrado na última linha da Tabela 3.1, e a temperatura máxima, registrada dentro do reservatório durante todo o ano, foi de 94°C.

3.2.1 Discussão dos resultados

Neste capítulo efetuaram-se 30 simulações, tendo-se apresentado os gráficos correspondentes aos casos 1, 16 e 30. Os demais gráficos poucas informações acrescentariam, se incluídos no trabalho, contudo a Tabela 3.1 apresenta o produto das 18 simulações realizadas, com resultados que serão analisados ainda no presente capítulo.

TABELA 3.1 – RESUMO ANUAL DAS SIMULAÇÕES PARA UM NÚMERO DE COLETORES LINEARMENTE CRESCENTE ATÉ 30 UNIDADES

RESUMO ANUAL.							
Número de	Q. Útil	Ganho	Q. Aux.	Perdas	T. Supri.	Perc. Sist.	T. Máxima
Coletores.	kWh	Q. Útil	kWh	kWh	°C	%	°C
1	1070,2	%	5063,6	577,3	42,7	17,4	42,9
2	2046,0	91,2	4173,3	665,4	42,7	32,9	42,9
3	2882,8	40,9	3424,3	751,5	42,7	45,7	42,9
4	3609,2	25,2	2779,2	829,2	42,7	56,5	46,8
5	4225,3	17,1	2247,7	908,1	42,7	65,3	50,7
6	4732,6	12,0	1836,6	998,9	42,7	72,0	56,0
7	5142,9	8,7	1527,8	1096,6	42,7	77,1	60,2
8	5483,8	6,6	1288,9	1196,0	42,7	81,0	63,9
9	5762,0	5,1	1106,8	1291,0	42,7	83,9	67,0
10	5996,3	4,1	963,4	1380,2	42,7	86,2	69,8
11	6194,4	3,3	848,8	1462,4	42,7	87,9	72,3
12	6362,3	2,7	760,5	1538,3	42,7	89,3	74,5
13	6507,9	2,3	686,1	1609,4	42,7	90,5	76,4
14	6631,6	1,9	628,6	1675,1	42,7	91,3	78,2
15	6740,2	1,6	579,1	1733,6	42,7	92,1	79,8
16	6836,1	1,4	540,4	1788,8	42,7	92,7	81,5
17	6925,4	1,3	503,7	1841,3	43,0	93,2	83,0
18	7000,3	1,1	474,6	1887,4	43,0	93,7	84,1
19	7068,7	1,0	451,2	1931,2	42,8	94,0	85,2
20	7132,2	0,9	429,8	1972,6	42,8	94,3	86,4
21	7190,7	0,8	412,1	2012,3	42,8	94,6	87,4
22	7243,2	0,7	396,0	2047,9	42,8	94,8	88,7
23	7288,7	0,6	381,3	2079,3	42,8	95,0	89,3
24	7335,1	0,6	367,2	2111,3	42,8	95,2	90,0
25	7376,2	0,6	354,3	2139,0	42,8	95,4	90,5
26	7415,4	0,5	343,1	2166,9	42,8	95,6	91,3
27	7450,1	0,5	334,6	2192,4	42,8	95,7	92,4
28	7484,8	0,5	325,1	2216,2	42,8	95,8	93,0
29	7517,3	0,4	316,6	2240,4	42,8	96,0	93,7
30	7548,1	0,4	307,3	2262,8	42,8	96,1	94,3

Os resultados das simulações foram distribuídos na tabela horizontalmente. A primeira coluna mostra o número de coletores utilizados em cada uma das simulações. A segunda coluna apresenta o valor total anual da energia útil (solar) captada, em kWh. A terceira, o valor percentual do ganho obtido com o acréscimo do coletor considerado. A quarta apresenta o valor da energia auxiliar dissipada para a manutenção da temperatura mínima dentro do reservatório de água aquecida. A quinta coluna mostra o valor das perdas térmicas, também em kWh. A sexta apresenta o valor da temperatura de suprimento, medida junto ao misturador, em °C. A sétima, o percentual de energia útil (solar) captada em relação à energia total utilizada. Finalmente, a oitava coluna apresenta, para cada caso, a maior temperatura registrada junto ao misturador.

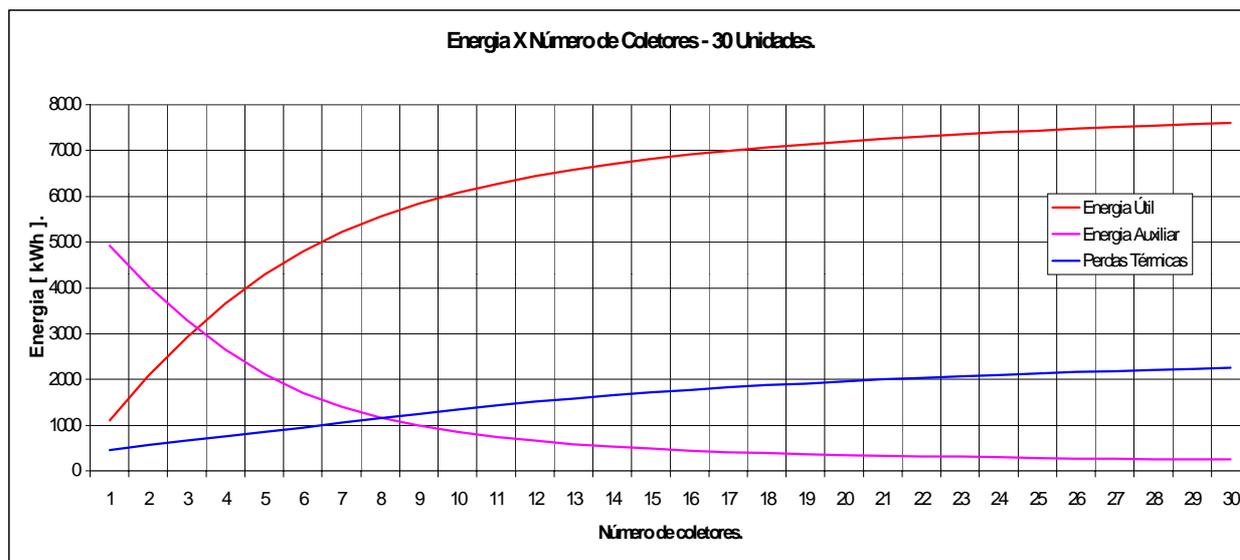


FIGURA 3.5 – GRÁFICO DE DESEMPENHO DO SISTEMA. ENERGIA CAPTADA EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COLETORES SOLARES UTILIZADOS

A Figura 3.5 apresenta um gráfico com as curvas relativas à energia solar captada – Energia Útil –, à energia auxiliar dissipada dentro do reservatório – Energia Auxiliar – e às perdas térmicas havidas no sistema – Perdas Térmicas.

Observa-se que o gráfico mostra um crescimento da captação de energia solar, inicialmente rápido, que declina à medida que mais coletores vão sendo considerados, demonstrando uma tendência das curvas de se tornarem assintóticas.

Dos casos simulados, é fácil observar-se que, em função das variações registradas na incidência da radiação solar sobre a superfície da terra, naturalmente em decorrência das variações climáticas ao longo do ano típico adotado, cujos dados foram utilizados nas simulações sendo retirados do arquivo TMYPOA, o aumento do número de coletores solares para a obtenção de água quente, jamais conseguirá suprir inteiramente a demanda de maneira economicamente viável, senão vejamos:

- a) quando se empregou apenas um coletor solar, conseguiu-se captar 17,4% da energia total utilizada pelo sistema;

- b) quando se acrescentou o segundo coletor solar, conseguiu-se captar 32,9% da energia total utilizada pelo sistema, o que representou um acréscimo de 91,2% sobre o resultado da captação anterior;
- c) quando se acrescentou o terceiro coletor solar, conseguiu-se captar 45,7% da energia total utilizada pelo sistema, mas agora o acréscimo representou menos da metade do anterior, ou seja, 40,9%;
- d) quando se acrescentou o quarto coletor solar, conseguiu-se captar 56,5% da energia total utilizada, representando o acréscimo somente 25,2% sobre o resultado da captação anterior;
- e) quando se acrescentou o quinto coletor solar, conseguiu-se captar 65,3% da energia total utilizada, mas o acréscimo foi de apenas 17,1% sobre o resultado da captação anterior.

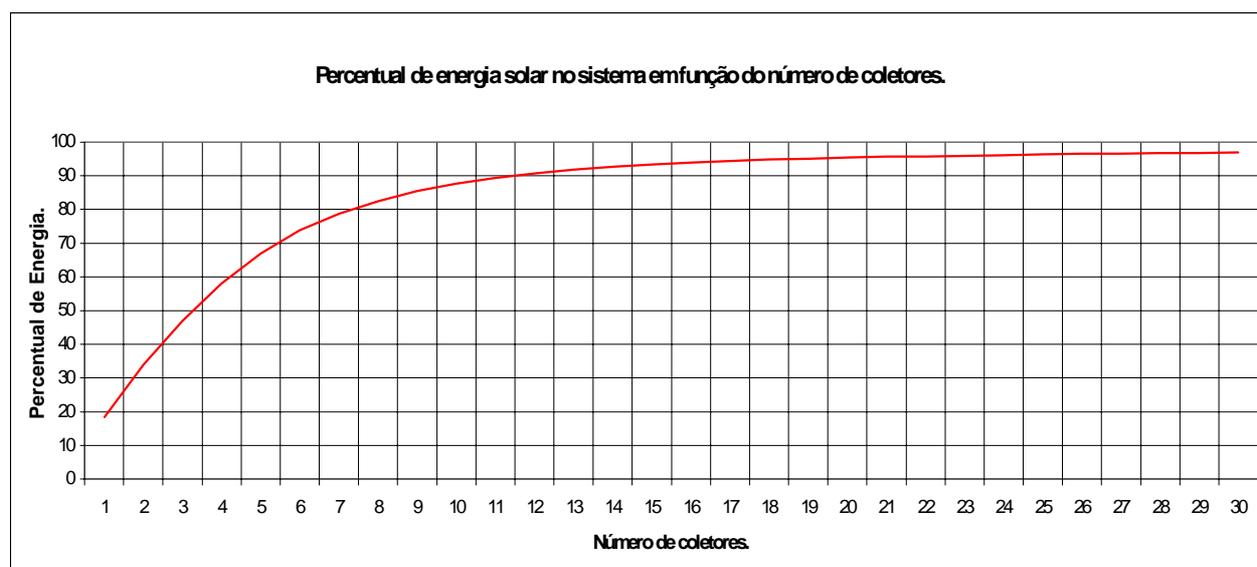


FIGURA 3.6 – VARIÇÃO DO PERCENTUAL DE ENERGIA SOLAR SOBRE A ENERGIA TOTAL CONSUMIDA NO SISTEMA

A queda na progressão do calor útil, já demonstrada pelos gráficos e tabela acima, evolui de tal forma que, quando havia 16 coletores solares no sistema, foi conseguida uma conversão de 92,7% da energia total utilizada. Com 20 unidades, o acréscimo de energia convertida atinge 94,3% da energia total utilizada. Acrescentando-se mais 10 coletores solares,

totalizando agora 30 coletores, a correspondente conversão passa a representar 96,1% da energia utilizada.

Neste último gráfico, apresentado pela Figura 3.6, fica claro o motivo porque Shariah e Löf, 1997 teriam afirmado que as instalações de aquecimento solar são freqüentemente projetadas para conseguir suprir entre 50% e 80% da água utilizada. O sistema pode ser considerado pouco eficaz quando converte abaixo de 50% da energia útil que necessita, mas qualquer acréscimo no número de coletores, acima de 80%, resulta em pouco benefício.

3.3 Estudo da Capacidade Volumétrica dos Reservatórios

Levando-se em conta o que foi visto ao longo deste capítulo até este ponto, particularmente no que se refere ao gráfico da Figura 3.6, o trabalho desenvolvido doravante abordará simulações sobre a capacidade volumétrica dos reservatórios, somente para área cobertas por coletores solares entre 4 e 8 unidades, abrangendo 3,6 e 7,2 m² de superfície coletora, respectivamente, objetivando destacar o relacionamento direto entre o número de coletores considerados e a capacidade volumétrica do reservatório, para as condições iniciais estabelecidas, na simulação de cada um dos casos.

Considerando-se que um sistema de aquecimento solar tem um desempenho energético eficiente, se conseguir captar o máximo de energia solar utilizando estritamente o necessário de energia elétrica auxiliar para manter as condições iniciais estabelecidas, e visto que, dentro do processo, se observa o aumento da proporção da energia solar (Energia Útil), enquanto que a dissipação da energia elétrica auxiliar (Energia Auxiliar) diminui gradativamente à medida que a capacidade volumétrica do reservatório aumenta até um certo ponto, e que a partir deste ponto ocorre o aumento da necessidade da energia elétrica auxiliar, mesmo que a captação de energia solar continue, conclui-se que o referido ponto sinaliza o limite para o desempenho eficiente do sistema considerado, conforme segue.

3.3.1 Simulações com variação de volume

As condições iniciais consideradas foram:

- capacidade volumétrica do reservatório	Variável
- consumo diário de água, em m ³	0,25
- altura da resistência auxiliar em função do volume	0,75
- altura do termostato em função do volume	0,85
- <i>setpoint</i> do termostato, em °C	43
- potência nominal da resistência auxiliar, em kW	2,5
- número de coletores por caso simulado	variável

3.3.2 Resultados

As tabelas a seguir apresentarão os resultados obtidos nas simulações dos casos, variando-se a capacidade volumétrica do reservatório a partir de 0,2 m³ até o ponto que se considerou como limite de eficácia do sistema.

Em todas as tabelas, a primeira coluna mostra a capacidade volumétrica considerada na simulação, a segunda, a energia útil (Q. Útil) convertida, a terceira, a energia elétrica auxiliar utilizada (Q. Aux.), a quarta, a soma de todas as perdas registradas no sistema de aquecimento solar, a quinta, a temperatura mínima da água aquecida que chega ao misturador, a sexta, a maior temperatura da água quente, para o caso considerado, que chega ao misturador e,

finalmente, a sétima, o percentual de energia elétrica auxiliar utilizada em relação ao total da energia utilizada, ou seja, em relação a soma das energias solar e auxiliar.

TABELA 3.2 – RESUMO DAS SIMULAÇÕES COM VOLUME VARIÁVEL E 4 COLETORES

RESUMO DOS CASOS SIMULADOS NAS CONDIÇÕES ACIMA - 4 COLETORES.						
Volume m ³	Q Útil kW/h	Q Aux. kW/h	Perdas kW/h	T.Supri. °C	T.Máx. °C	Aux/Total %
0,2	2.815,7	3.056,4	356,0	42,5	62,4	52,0
0,4	3.248,7	2.792,6	514,2	42,6	53,0	53,0
0,6	3.454,6	2.649,1	561,8	42,7	50,0	49,8
0,8	3.547,9	2.744,2	741,0	42,7	48,1	43,6
1,0	3.583,1	2.835,7	858,5	42,7	47,3	44,2

Para um reservatório de capacidade volumétrica variável e quatro coletores solares, a segunda coluna mostra que a captação da energia solar aumenta com o aumento da capacidade volumétrica do reservatório, ocorrendo o oposto com a terceira coluna, cuja necessidade de energia elétrica diminui com o aumento da capacidade volumétrica do reservatório, mas somente até 0,6 m³, voltando a aumentar a partir daí. Observe-se que, no mencionado ponto, a energia auxiliar (Q. Aux.) representa 49,8% do total utilizado. Por outro lado, a energia elétrica utilizada como energia auxiliar, para manter a temperatura da água aquecida no mínimo em 43°C, é de 2.649.1 kWh, aumentando para 2.744.2 kWh quando a capacidade volumétrica do reservatório aumenta para 0,8 m³.

TABELA 3.3 – RESUMO DAS SIMULAÇÕES COM VOLUME VARIÁVEL E 5 COLETORES

RESUMO DOS CASOS SIMULADOS NAS CONDIÇÕES ACIMA - 5 COLETORES						
Volume m ³	Q Útil kW/h	Q Aux. kW/h	Perdas kW/h	T.Supri. °C	T.Máx. °C	Aux/Total %
0,2	3.160,1	2.745,8	390,6	42,5	67,8	46,5
0,4	3.736,4	2.355,1	564,9	42,6	58,8	53,0
0,6	4.007,5	2.228,1	694,8	42,7	54,7	49,8
0,8	4.132,6	2.231,3	811,6	42,7	52,7	35,1
1,0	4.192,8	2.304,9	934,3	42,8	51,0	35,5

Para um reservatório de capacidade volumétrica variável e cinco coletores solares, a segunda coluna mostra e confirma que a participação da energia solar aumenta com o aumento da capacidade volumétrica do reservatório, ocorrendo o oposto com a terceira coluna, cuja utilização de energia elétrica diminui até que se atinja a capacidade volumétrica de 0,6 m³, voltando a aumentar a partir daí. No mencionado ponto, a energia auxiliar (Q. Aux.) representa agora 49,8% do total utilizado. Por outro lado, a energia elétrica dissipada como energia auxiliar, para manter a água aquecida na temperatura mínima de 43°C, dentro do reservatório, é de 2.228,1 kWh, aumentando para 2.231,3 kWh, correspondente a 0,8 m³.

TABELA 3.4 – RESUMO DAS SIMULAÇÕES COM VOLUME VARIÁVEL E 6 COLETORES

RESUMO DOS CASOS SIMULADOS NAS CONDIÇÕES ACIMA - 6 COLETORES						
Volume m ³	Q Útil kW/h	Q Aux. kW/h	Perdas kW/h	T.Supri. °C	T.Máx. °C	Aux/Total %
0,2	3.429,7	2.507,2	422,3	42,5	70,2	42,2
0,4	4.122,6	2.024,7	619,8	42,6	64,3	53,0
0,6	4.451,0	1.858,0	767,3	42,7	60,3	49,8
0,8	4.611,3	1.836,8	893,8	42,7	57,6	28,5
1,0	4.696,2	1.892,4	1.021,9	42,8	56,9	28,7

Para um reservatório de capacidade volumétrica variável e seis coletores solares, a segunda coluna mostra e confirma que a captação da energia solar aumenta com o aumento da capacidade volumétrica do reservatório, ocorrendo o oposto com a terceira coluna, cuja dissipação de energia elétrica diminui até o correspondente a 0,8 m³, voltando a aumentar a partir daí. Observe-se que, no mencionado ponto, a energia auxiliar (Q. Aux.) representa agora 28,5% do total utilizado. Por outro lado, a energia elétrica dissipada como energia auxiliar, para manter a temperatura da água aquecida na temperatura mínima de 43°C, dentro do reservatório, é de 1.836,8 kWh, aumentando para 1.892,4 kWh, correspondente a 1,0 m³.

TABELA 3.5 – RESUMO DAS SIMULAÇÕES COM VOLUME VARIÁVEL E 7 COLETORES

RESUMO DOS CASOS SIMULADOS NAS CONDIÇÕES ACIMA - 7 COLETORES						
Volume m³	Q Útil kW/h	Q Aux. kW/h	Perdas kW/h	T.Supri. °C	T.Máx. °C	Aux/Total %
0,2	3.640,8	2.324,8	450,7	42,5	74,0	39,0
0,4	4.424,0	1.779,2	674,9	42,6	69,1	53,0
0,6	4.801,7	1.584,3	842,1	42,7	63,9	49,8
0,8	4.998,1	1.540,6	982,4	42,7	62,3	23,6
1,0	5.106,4	1.579,9	1.116,9	42,7	60,2	23,6

Para um reservatório de capacidade volumétrica variável e sete coletores solares, a segunda coluna continua a mostrar que a participação da energia solar aumenta com o aumento da capacidade volumétrica do reservatório, ocorrendo o oposto com a terceira coluna, cuja utilizada de energia elétrica diminui até atingir a capacidade volumétrica correspondente a 0,8 m³, voltando a aumentar a partir daí, ocorrendo o oposto com a energia útil. Observa-se que, no mencionado ponto, a energia auxiliar (Q. Aux.) representa agora 23,6% do total utilizado. Por outro lado, a energia elétrica dissipada como energia auxiliar, para manter a temperatura da água aquecida no mínimo em 43°C, dentro do reservatório, é de 1.540,6 kWh, aumentando para 1.579,9 kWh, correspondente a 1,0 m³.

TABELA 3.6 – RESUMO DAS SIMULAÇÕES COM VOLUME VARIÁVEL E 8 COLETORES

RESUMO DOS CASOS SIMULADOS NAS CONDIÇÕES ACIMA - 8 COLETORES						
Volume m³	Q Útil kW/h	Q Aux. kW/h	Perdas kW/h	T.Supri. °C	T.Máx. °C	Aux/Total %
0,2	3.811,5	2.179,8	476,3	42,5	77,8	36,4
0,4	4.664,0	1.592,1	726,6	42,7	73,0	53,0
0,6	5.080,3	1.378,9	914,0	42,7	67,6	49,8
0,8	5.310,8	1.340,6	1.069,8	42,7	66,0	20,2
1,0	5.444,9	1.340,0	1.214,5	42,7	64,0	19,7
1,2	5.553,7	1.372,1	1.346,0	42,8	61,6	19,8

Repete-se, para um reservatório de capacidade volumétrica variável e oito coletores solares, o que já foi visto antes, ou seja, que a captação da energia solar aumenta com o aumento da capacidade volumétrica do reservatório, ocorrendo o oposto com a terceira coluna,

cuja dissipação de energia elétrica diminui agora até a capacidade volumétrica correspondente a $0,8 \text{ m}^3$, voltando a aumentar a partir daí; também que ocorre o oposto com a energia útil. Observa-se que, no mencionado ponto, a energia auxiliar (Q. Aux.) representa agora 20% do total utilizado. Por outro lado, a energia elétrica dissipada como energia auxiliar, para manter a água aquecida no mínimo em 43°C , é de 1.316 kWh, aumentando para 1.1338 kWh, correspondente a $1,0 \text{ m}^3$.

3.3.3 Análise

Analisando-se os cinco casos simulados, cujos resultados resumidos já foram apresentados acima, observa-se que à medida que a capacidade volumétrica de armazenamento aumenta, o percentual de energia elétrica auxiliar (Q. Aux.) cai, inicialmente de forma muito rápida e, depois, de forma mais lenta, pelo fato de que agora, num reservatório maior, a estratificação das camadas é melhor definida, fazendo com que uma maior diferença de temperatura dentro do reservatório provoque uma vazão mássica mais intensa por dentro dos coletores solares e uma eficiência mais alta, removendo daí mais calor do que anteriormente acontecia. Observa-se, ainda, que o aumento do número de coletores solares, a partir de um certo limite, só se justifica se for acompanhado do aumento da capacidade volumétrica do reservatório.

TABELA 3.7 – RELAÇÃO ENTRE O NÚMERO DE COLETORES SOLARES CONSIDERADOS NA SIMULAÇÃO E A ENERGIA ELÉTRICA AUXILIAR UTILIZADA

VOLUME DO RESERVATÓRIO X NÚMERO DE COLETORES.					
	4 Coletores	5 Coletores	6 Coletores	7 Coletores	8 Coletores
Volume m^3	Q Aux. kWh				
0,2	3.056,4	2.745,8	2.507,2	2.324,8	2.179,8
0,4	2.792,6	2.355,1	2.024,7	1.779,2	1.592,1
0,6	2.649,1	2.228,1	1.858,0	1.584,3	1.378,9
0,8	2.744,2	2.231,3	1.836,8	1.540,6	1.540,6
1,0	2.835,7	2.304,9	1.892,4	1.579,9	1.340,0
1,2					1.372,1

Quando a capacidade volumétrica do reservatório é menor, a temperatura de entrada dos coletores solares é mais alta e, conseqüentemente, a eficiência dos coletores é menor do que no caso de reservatórios com grandes capacidades volumétricas. Quando o volume é grande, o sistema solar opera de modo eficiente, porém talvez não seja capaz de aquecer todo o reservatório, sendo necessária, a partir de certo volume de água, aumentar a participação elétrica. Como se esperava, a energia elétrica auxiliar utilizada é inversamente proporcional ao número de coletores considerados na simulação.

Pode ser visto pela comparação das tabelas que a fração solar não ultrapassa um limite que fica estabelecido com a relação entre o número de coletores e o volume do reservatório. Por exemplo, com 4 coletores, a máxima economia de energia elétrica ocorre com uma fração solar de 57%. Com 6 coletores, o ponto ótimo fica em 63% da fração solar.

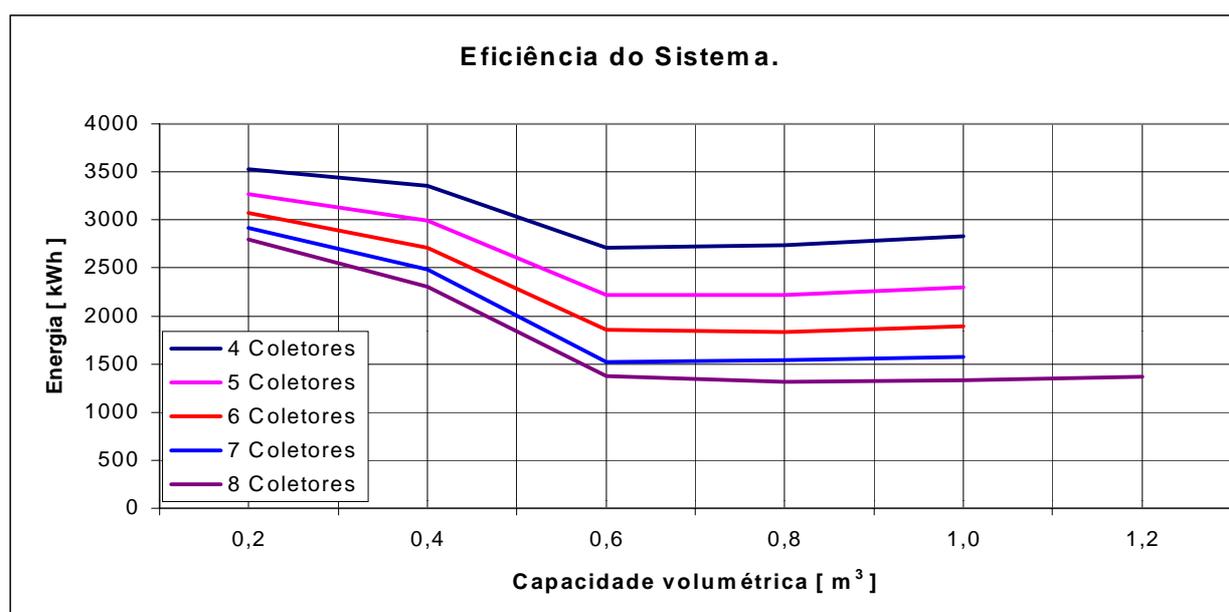


FIGURA 3.7 – DEPENDÊNCIA DA ENERGIA AUXILIAR NECESSÁRIA COM A CAPACIDADE VOLUMÉTRICA DO RESERVATÓRIO

A família de curvas acima expressa o comportamento da energia elétrica auxiliar em função do número de coletores considerados e a capacidade volumétrica do reservatório de água aquecida. Conforme foi proposto fazer, no início deste capítulo, cada uma das curvas está associada a uma capacidade volumétrica máxima que expressa o limite da eficiência do sistema considerado, para as condições iniciais estabelecidas. Este limite indica o ponto de mínimo

consumo de energia auxiliar, mas não o ponto ótimo de projeto, uma vez que nesta análise não foi efetuado um estudo econômico do sistema.

As separações entre as curvas do gráfico da Figura 3.7 indicam o grau de economia de energia auxiliar com o aumento do número de coletores utilizados. Além de mostrar um comportamento compatível com os resultados apresentados na Figura 3.5, estas separações ajudam a verificar que aumentar o número de coletores de 4 para 5 unidades é muito mais significativo que aumentar este número de 7 para 8.

4 EFEITOS DO POSICIONAMENTO E DO CONTROLE DA RESISTÊNCIA AUXILIAR

4.1 Valor Nominal da Potência da Resistência Auxiliar

No capítulo anterior, desejava-se conhecer o número de coletores solares que apresentasse melhor desempenho em função da capacidade volumétrica do reservatório para cada um dos casos simulados. Para isso, arbitrou-se, nas condições iniciais para simulação daquele problema, entre outras coisas, que o valor nominal da resistência de aquecimento, em particular, teria a metade do valor usual para aquecedores elétricos de passagem (chuveiros elétricos), ou seja, 2,5 kW.

Como o objetivo deste trabalho é buscar condições que propiciem maior eficiência energética para um sistema de aquecimento de água usando energia solar e tendo eletricidade como energia auxiliar, resta, entre outras, a determinação da influência do valor nominal da resistência de aquecimento no desempenho global do sistema. Simularam-se então os seguintes casos, cujos resultados são apresentados pelas curvas dos gráficos das Figuras 3.8 e 3.9, melhor detalhados no Apêndice II.

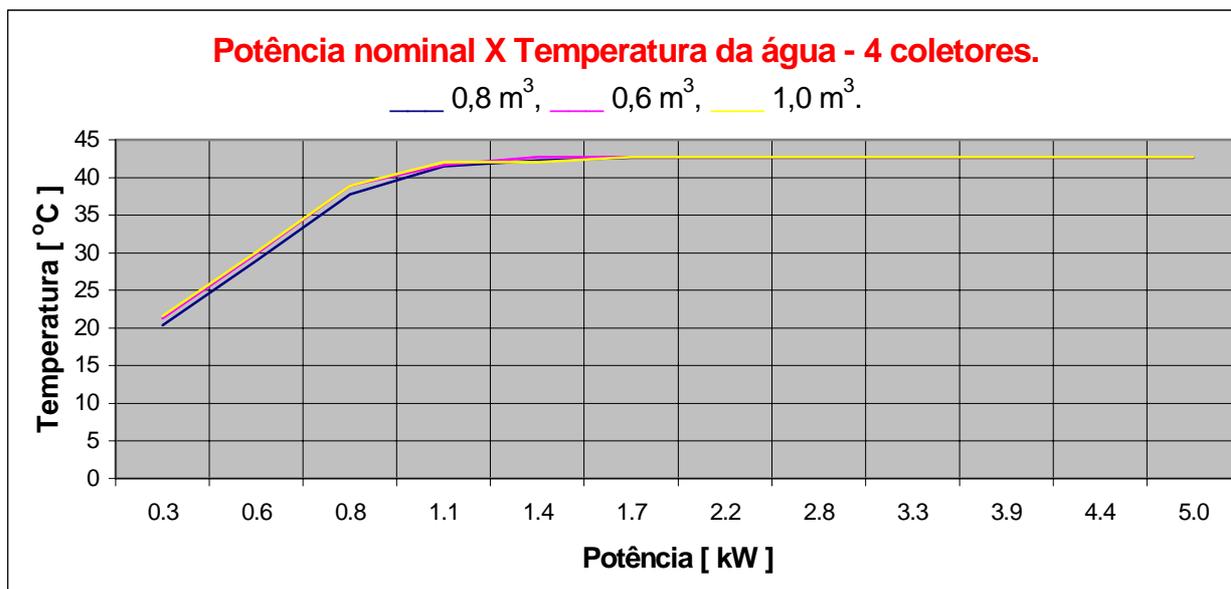


FIGURA 4.1 – EFEITO DA VARIAÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL NA TEMPERATURA DA ÁGUA PARA 4 COLETORES

Para a elaboração do gráfico da Figura 4.1, utilizaram-se 4 coletores solares e fez-se variar o valor nominal da resistência auxiliar de aquecimento entre 0,3 e 5 kW para reservatórios com capacidade volumétrica de 0,6, 0,8 e 1 m³, respectivamente. O eixo das ordenadas, no gráfico, representa a temperatura mais baixa que chega ao misturador ao longo do ano de simulação.

Observa-se que, para as três curvas, a temperatura da água depositada no reservatórios manteve temperaturas inferiores ao *setpoint* escolhido (43°C) até o valor de aproximadamente 1,7 kW de potência auxiliar, utilizada quando estas curvas estabilizaram-se indicando temperatura constante.

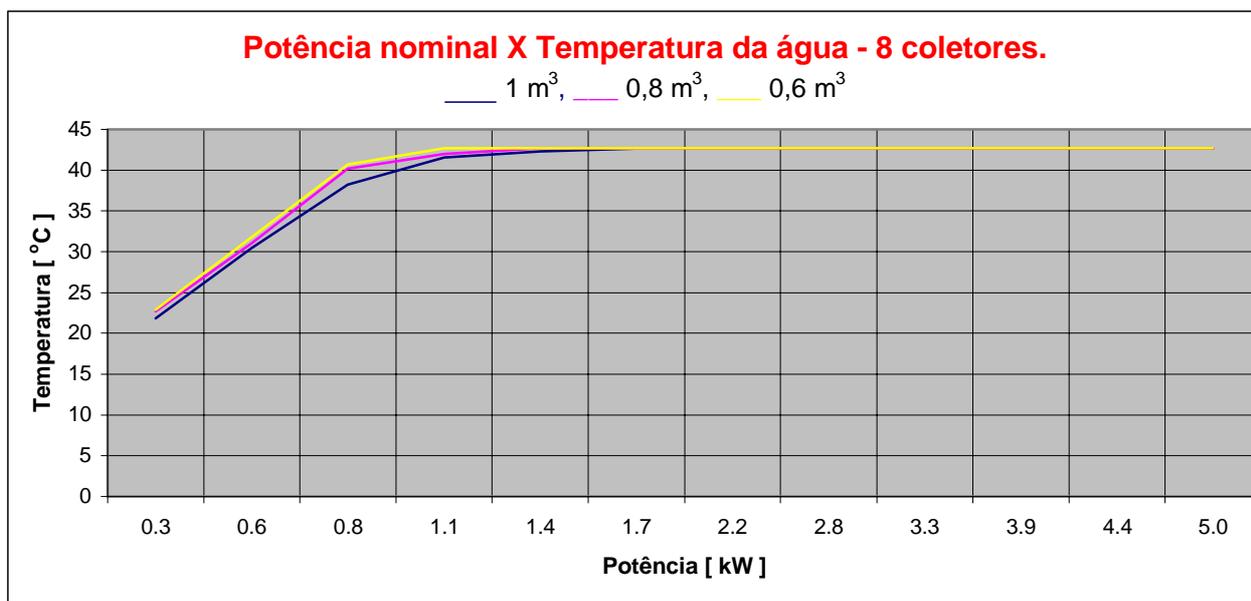


FIGURA 4.2 – EFEITO DA VARIAÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL NA TEMPERATURA DA ÁGUA PARA 8 COLETORES

4.1.1 Conclusões preliminares

Como a utilização ou não da energia auxiliar é comandada por um termostato instalado no interior do reservatório de água quente, sua utilização, ou não, está condicionada ao fato de estar a temperatura da água aquecida acima ou abaixo do *setpoint* escolhido. Sendo assim, para os casos até aqui estudados, de nada adianta ter valores nominais para a resistência de aquecimento acima dos 1,7 kW determinados, pois o calor armazenado depende do produto da capacidade de dissipação (potência nominal) da resistência auxiliar pelo seu tempo de ativação. Cabe salientar que estes resultados são válidos para o perfil diário de consumo utilizado. Eventualmente, a utilização, em períodos diferentes, poderia sugerir valores mínimos diferentes de potências.

4.2 Variação da Fração Solar em Função da Posição da Resistência Elétrica

Conforme foi visto no início deste trabalho, a função da energia auxiliar é manter a temperatura da água aquecida dentro do reservatório, numa temperatura nunca inferior ao *setpoint* escolhido. Isto é válido pelo menos para água que está acima da linha da resistência.

Durante o desenvolvimento de todas as simulações até aqui realizadas, o plano que contém a resistência auxiliar de aquecimento esteve sempre 0,75 m do fundo do reservatório. Para análise nesta seção, manteve-se o volume do reservatório em 1 m³, a potência nominal da resistência de aquecimento em 2,5 kW e variou-se a altura desta resistência entre 0,15 e 0,75 m, para um número de coletores solares entre 4 e 8 unidades. A posição do termostato não foi modificada, ficando sempre na mesma posição, 0,85 m acima do fundo do reservatório.

Os resultados alcançados nas simulações estão expressos nas Figuras 4.2 e 4.3, abaixo representadas:

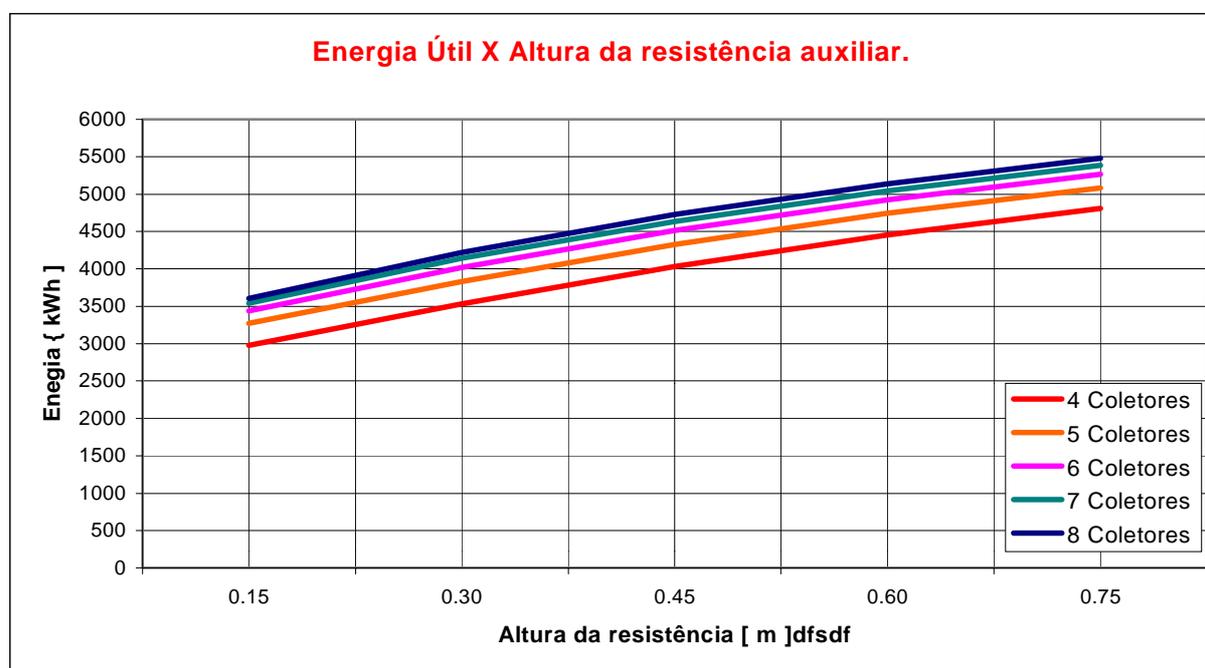


FIGURA 4.3 – FRAÇÃO SOLAR EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A família de curvas da Figura 4.3 representa a variação da energia útil convertida em função da variação da altura da resistência auxiliar de aquecimento em relação ao fundo do reservatório. Note-se que a presença da resistência auxiliar de aquecimento próximo ao fundo do reservatório inibe a captação de energia solar ao criar uma zona de água aquecida que dificulta a circulação da água por efeito termossifão e aumenta a temperatura da água de entrada, reduzindo a eficiência dos coletores.

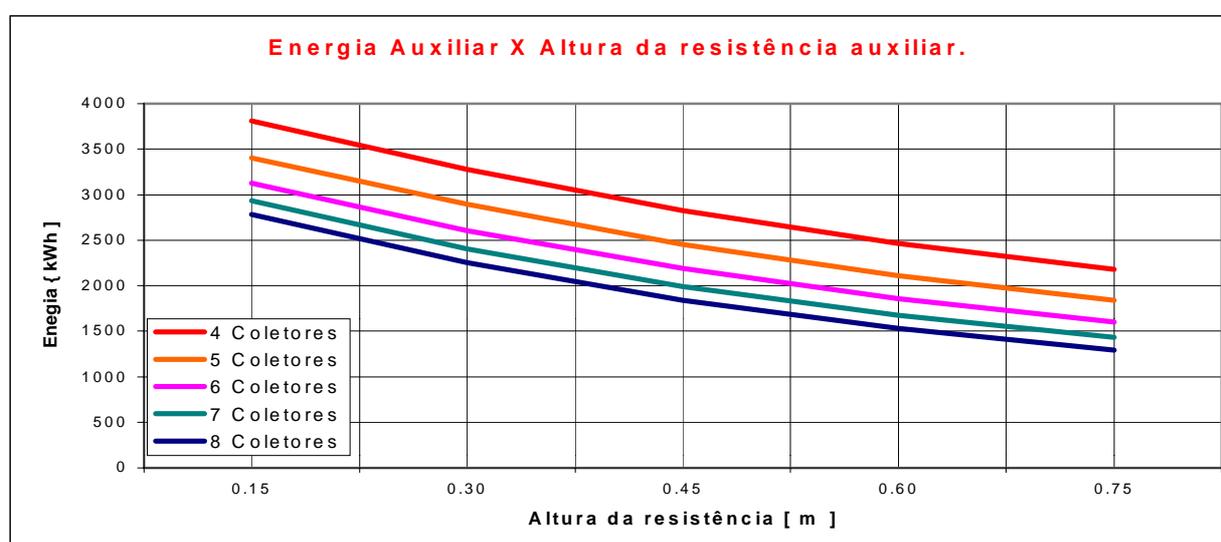


FIGURA 4.4 – ENERGIA ELÉTRICA EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A utilização de energia auxiliar, representada pela família de curvas da Figura 4.4, nada mais é do que o complemento da energia útil que deixou de ser convertida, conforme foi visto no gráfico da Figura 4.3. Aparentemente, quanto mais alta está a resistência, maior é a economia de energia auxiliar, já que o sistema solar trabalha de forma mais eficiente. Isto não permite, porém, que a resistência seja instalada no topo do reservatório, já que seria aquecida apenas a lâmina superior de água sendo insuficiente para o abastecimento de água. Informações adicionais sobre este tópico podem ser encontradas no Apêndice III.

4.3 Variação Simultânea e Solidária da Posição da Resistência Auxiliar de Aquecimento e do Termostato

No desenvolvimento das simulações referentes à seção 4.2, manteve-se o volume do reservatório em 1 m^3 , a potência da resistência de aquecimento em $2,5 \text{ kW}$ e fez-se variar a altura desta resistência entre $0,15$ e $0,75 \text{ m}$, para um número de coletores solares entre 4 e 8 unidades, mantendo-se fixo o termostato. Na análise desta seção, fez-se a mesma experiência, só que a variação da resistência auxiliar de aquecimento foi acompanhada de maneira simultânea e solidária pelo termostato, que se manteve sempre $0,1 \text{ m}$ acima da referida resistência.

Os resultados alcançados pouco diferiram daqueles já vistos na seção 4.2, razão pela qual somente as simulações relativas ao emprego de 4 e 8 coletores solares estão expressas nas tabelas e curvas dos gráficos a seguir:

TABELA 4.1 – CONDIÇÕES DE ATENDIMENTO AO CONSUMO PARA 4 COLETORES

ALTURA DA RESISTÊNCIA AUXILIAR E TERMOSTATO VARIANDO - 4 COLETORES.							
Altura Res.	Altura Term.	Q Util	Q Aux.	Perdas	Q. Interno	T.Supri.	T.Máx.
m	m	kWh	kWh	kWh	kWh	°C	°C
0,2	0,3	2933,8	3870,8	1223,0	1,8	42,8	51,2
0,3	0,40	3268,8	3408,1	1091,5	3,8	42,8	50,3
0,5	0,6	3442,5	3122,4	991,7	5,7	42,8	49,0
0,6	0,7	3538,7	2933,9	907,6	7,5	42,8	47,6
0,8	0,9	3604,5	2785,4	830,8	9,0	42,7	46,8

As condições de atendimento ao consumo mantiveram-se satisfatórias ao longo das simulações, conforme pode ser observado na sétima coluna. As diferenças na fração solar, na fração elétrica e no acúmulo de energia no reservatório foram muito grandes. Também a variação ocorrida com as perdas térmicas foi ampla e decresceu juntamente com o afastamento da resistência auxiliar de aquecimento do fundo do reservatório. Esta variação, juntamente com a variação da fração solar e fração elétrica, é observada na Figura 4.5.

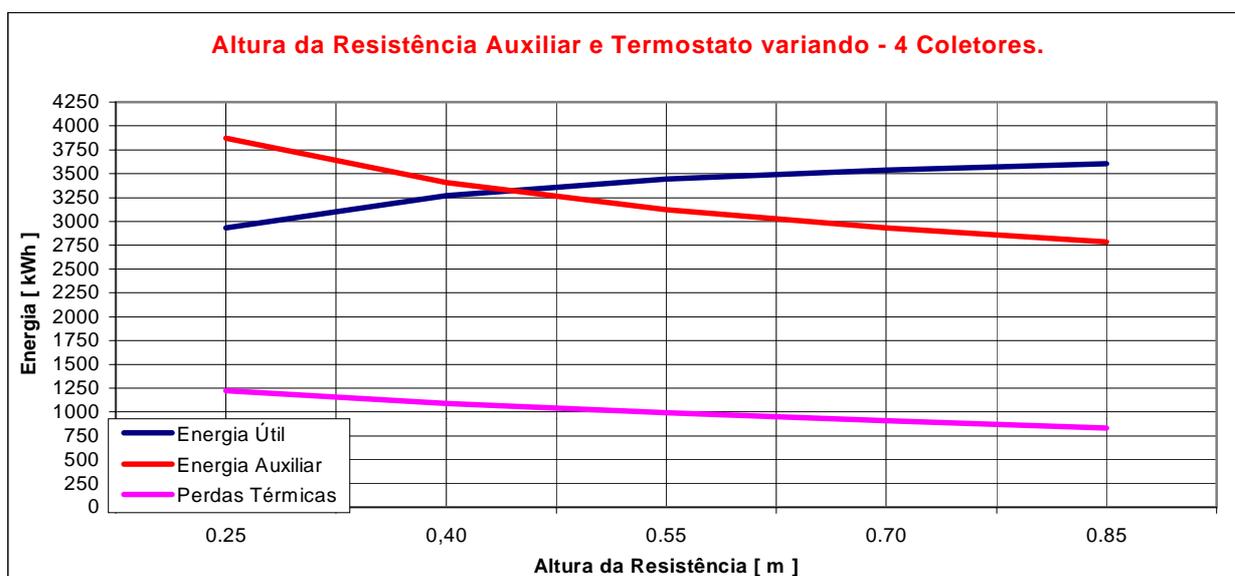


FIGURA 4.5 – FRAÇÃO SOLAR, FRAÇÃO ELÉTRICA E PERDAS EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO DA RESISTÊNCIA E TERMOSTATO DENTRO DO RESERVATÓRIO PARA 4 COLETORES

Na mesma figura, nota-se que, em aproximadamente 0,45 m do fundo do reservatório, a fração solar e a fração elétrica se igualam.

TABELA 4.2 – CONDIÇÕES DE ATENDIMENTO AO CONSUMO PARA 8 COLETORES

ALTURA DA RESISTÊNCIA AUXILIAR E TERMOSTATO VARIANDO - 8 COLETORES.							
Altura Res.	Altura Term.	Q Útil	Q Aux.	Perdas	Q. Interno	T.Supri.	T.Máx.
m	m	kWh	kWh	kWh	kWh	°C	°C
0,15	0,25	4560,64	2490,88	1477,83	5,22	42,82	64,51
0,30	0,40	5028,71	1919,82	1369,08	6,87	42,80	64,01
0,45	0,55	5253,64	1618,55	1296,91	9,10	42,78	63,93
0,60	0,70	5384,66	1431,08	1243,03	11,57	42,75	63,93
0,75	0,85	5477,80	1291,19	1198,22	14,27	42,73	63,93

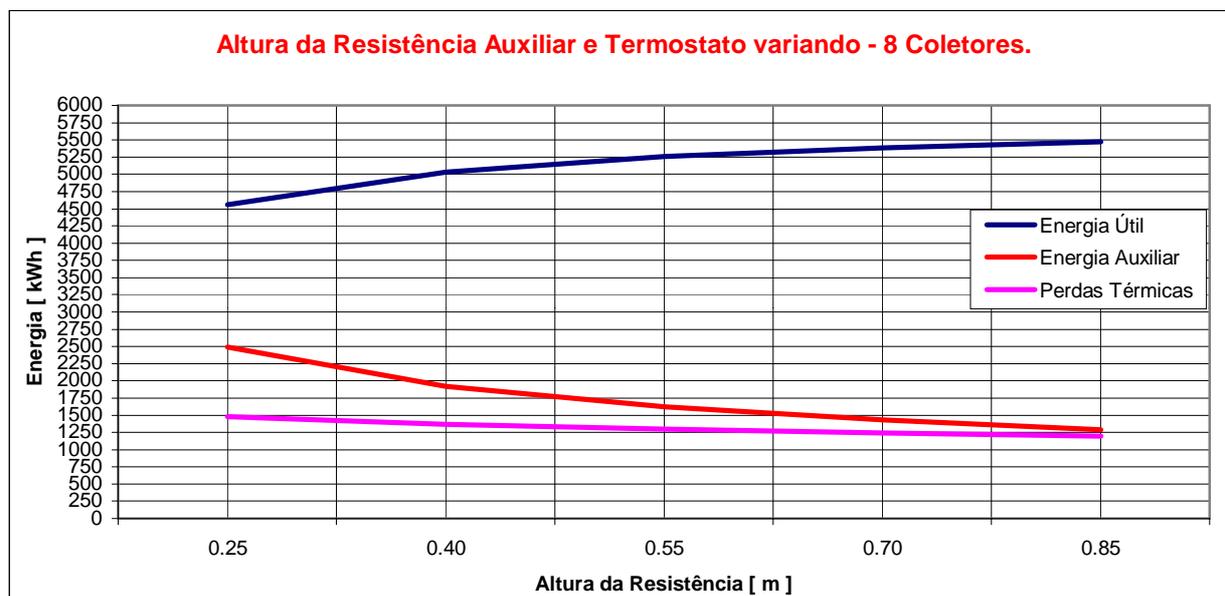


FIGURA 4.6 – FRAÇÃO SOLAR, FRAÇÃO ELÉTRICA E PERDAS EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO DA RESISTÊNCIA E TERMOSTATO DENTRO DO RESERVATÓRIO PARA 8 COLETORES

No Apêndice III, encontram-se situações similares para vários números de coletores solares.

Observa-se, em todas as situações, que quanto mais alto estiver o conjunto resistência e termostato, menos energia elétrica é necessária. O limite de altura mantido neste trabalho, em 0,75 m para a resistência e 0,85 m, para o termostato, em um reservatório de 1 m³, garante a manutenção de um volume de água quente de 250 litros, correspondente ao consumo de um dia. Era esperado observar a diminuição das perdas térmicas com a altura do aquecimento auxiliar, já que as temperaturas mais altas concentradas na parte superior do reservatório produzem menos perdas que as mesmas temperaturas em toda a extensão do reservatório.

4.4 Estratégia de Controle Horário

Coerente com o título, toda a temática deste trabalho de dissertação girou em torno de desenvolver estratégias para minimizar o consumo de energia elétrica. Houve uma constante preocupação com o consumo mínimo dessa energia, uma vez que a crise energética que atualmente aflige os consumidores brasileiros foi inspiradora de grande parte do que aqui foi escrito.

Viu-se, inicialmente, que a quantidade de radiação solar disponível é essencial no dimensionamento de um sistema de aquecimento de água e que o número de coletores solares empregados neste mesmo sistema de aquecimento, utilizando energia solar tem uma quantificação ótima, podendo tornar-se ineficiente, por falta, ou dispendioso, por excesso.

Observou-se que o dimensionamento volumétrico do reservatório é importantíssimo e que, associado a um *setpoint* baixo, para o termostato de comando do sistema de aquecimento auxiliar, pode influir na economia do sistema.

Notou-se, também, que a altura do termostato e da resistência auxiliar é muito importante no processo, influenciando substantivamente no desempenho do sistema.

Registrou-se, ainda, que existe um valor nominal mínimo para a resistência de aquecimento e que, para os casos até agora vistos, um dimensionamento a maior não traria benefício, mas sim gasto adicional no sistema.

O que se deseja demonstrar agora é ser possível aumentar a economia de um sistema de aquecimento solar que tenha energia elétrica como fonte de atendimento auxiliar, se um sistema de controle inteligente for incluído para efetuar um comando horário sobre essa fonte de energia auxiliar.

Portanto, a proposta é simular a inclusão, no sistema, de um Controlador Lógico Programável, CLP, para fazer o controle horário, efetuar a leitura da radiação solar e, segundo uma programação lógica, ligar a energia elétrica, a resistência auxiliar de aquecimento, agora com um valor nominal de 5 kW.

Serão apresentadas as simulações de três casos, todos diferenciados pelo consumo de água quente.

4.4.1 Consumo doméstico distribuído

O consumo doméstico considerado para o presente caso é o mesmo utilizado em todas as simulações feitas até agora, valendo as condições iniciais para elas estabelecidas. Esta distribuição já foi apresentada na Figura 1.1.

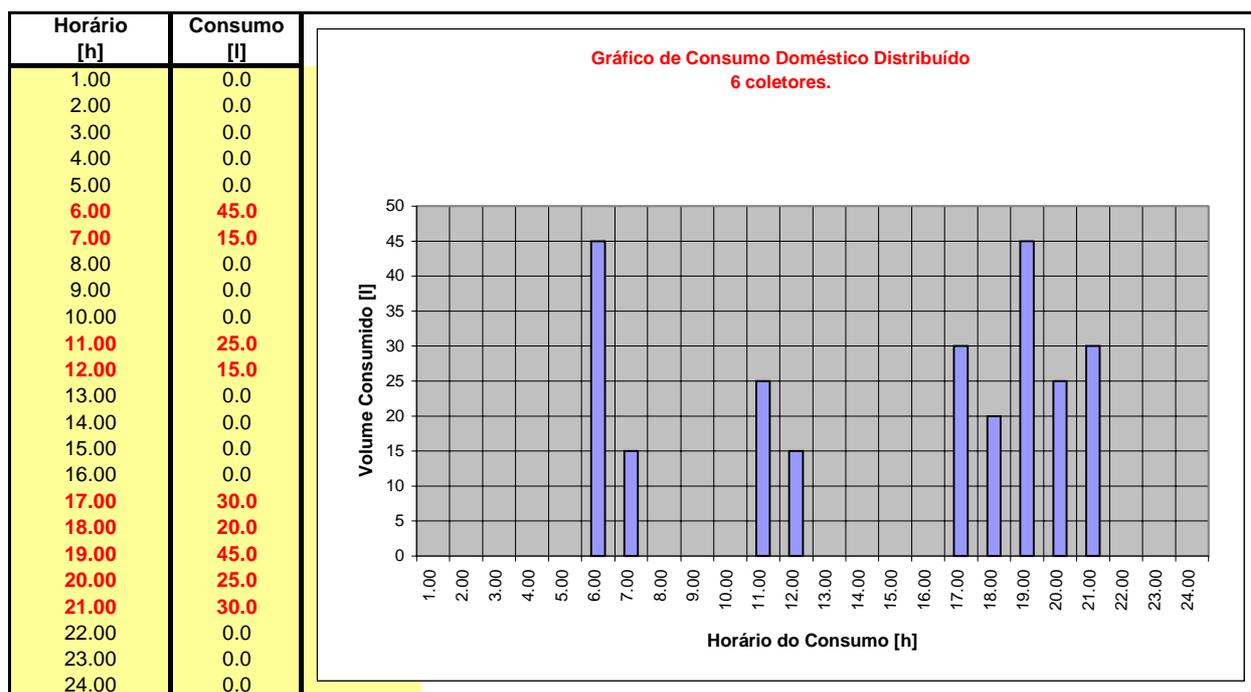


FIGURA 4.7 – GRÁFICO DE BARRAS MOSTRANDO O HORÁRIO E A DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA AQUECIDA PARA O CASO CONSIDERADO

O consumo distribuído, desta forma, fez parte de simulações para sistemas com reservatórios de 1, 1,5 e 2 m³.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados. A coluna 1 refere-se ao nome do arquivo utilizado, caso particular do arquivo *TMYP OA* já comentado, e a coluna 2 refere-se ao tempo durante o qual a energia auxiliar ficou desligada (não disponível), sempre a partir das 21 horas. As colunas 4, 6 e 8 apresentam a economia de energia auxiliar proporcionada pela utilização do controlador, e as demais colunas são auto-explicativas. A melhor economia percentual aparece com o valor máximo de 25,8% para o caso de 1 m³, e a energia auxiliar mínima, para este caso, é de aproximadamente 1.426 kWh, correspondendo a um período de 19 horas sem energia auxiliar. Para este mesmo caso, observa-se que, se a energia auxiliar tivesse permanecido ligada durante todo o tempo, o consumo de energia auxiliar teria sido de aproximadamente 1.917 kWh, o que expressa uma economia de 491 kWh.

TABELA 4.3 – CASO ESPECIAL PARA CONSUMO DOMÉSTICO DISTRIBUÍDO

CONSUMO DOMÉSTICO DISTRIBUÍDO - 6 COLETORES							
Dados utilizados		1,0 m ³		1,5 m ³		2,0 m ³	
1	2	3	4	5	6	7	8
Arquivo TMYP OA	Período h *	Q Aux. kWh	Econ. %	Q Aux. kWh	Econ. %	Q Aux. kWh	Econ. %
0	0	1917.4	0.0	2104.6	0.0	2276.4	0.0
A	1	1915.0	0.1	2101.8	0.1	2274.0	0.1
B	2	1912.5	0.3	2098.8	0.3	2272.6	0.2
1	3	1909.2	0.4	2095.0	0.5	2268.4	0.4
2	4	1905.4	0.6	2090.9	0.7	2263.5	0.6
3	5	1900.3	0.9	2086.1	0.9	2257.7	0.8
4	6	1894.0	1.2	2080.4	1.1	2251.6	1.1
5	7	1885.9	1.6	2072.1	1.5	2243.5	1.4
6	8	1876.1	2.2	2062.7	2.0	2235.9	1.8
7	9	1858.4	3.1	2046.8	2.7	2221.0	2.4
8	10	1835.8	4.3	2028.3	3.6	2202.6	3.2
9	11	1806.9	5.8	2006.7	4.7	2182.2	4.1
10	12	1714.5	10.6	1973.6	6.2	2155.3	5.3
11	13	1703.2	11.2	1929.2	8.3	2120.6	6.8
12	14	1641.4	14.4	1884.4	10.5	2082.3	8.5
13	15	1587.2	17.2	1843.9	12.4	2050.5	9.9
14	16	1540.5	19.7	1809.0	14.0	2020.9	11.2
15	17	1502.6	21.6	1782.1	15.3	1991.7	12.5
16	18	1463.6	23.7	1760.0	16.4	1977.8	13.1
17	19	1421.9	25.8	1736.2	17.5	1957.4	14.0
18	20	1372.2		1736.2		1923.0	

*Aquecimento não disponível a partir das 21 horas

4.4.2 Consumo concentrado no final da tarde

O consumo considerado para o presente caso é inspirado em trabalho realizado pelo então Grupo de Energia Solar da UFRGS e destinava-se à implementação, no Hospital São Pedro, de Porto Alegre, onde a água obtida por aquecimento solar seria empregada preferencialmente no horário destinado ao banho dos internos. Na Tabela 4.4, a coluna 1 faz referência ao mesmo *TMYP*OA(X), utilizado na seção 4.4.1, caso particular do arquivo *TMYP*OA já comentado. A coluna 2 refere-se ao tempo em que a energia auxiliar ficou desligada (não disponível), e as demais colunas são auto-explicativas.

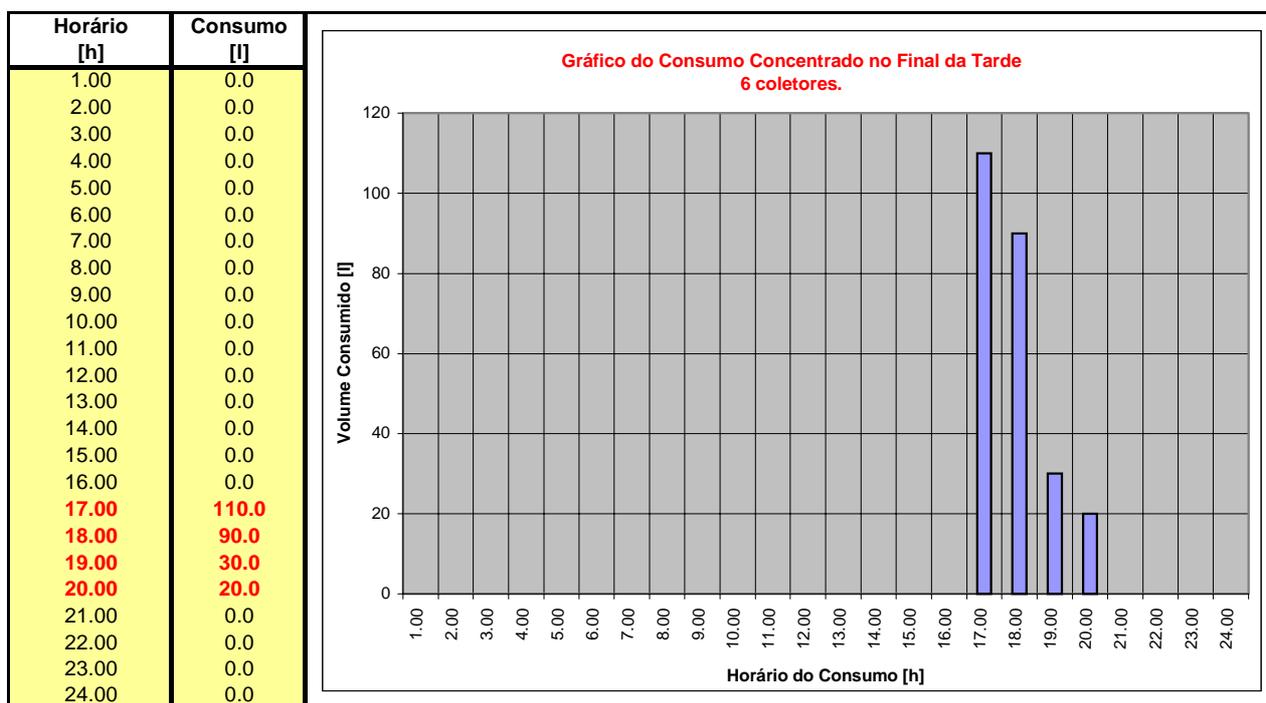


FIGURA 4.8 – GRÁFICO DO PERFIL DE CONSUMO DE ÁGUA AQUECIDA NO FINAL DA TARDE

Considerou-se, para o presente caso, que a maior demanda seria às 17 horas, mas que retardatários e outros tipos de consumo estenderiam a demanda por água aquecida até às 20 horas. Como no caso anterior, o desligamento foi sempre a partir das 21 horas. As últimas linhas

das colunas 3, 5 e 7 representam os valores obtidos para o correspondente período de desligamento, a partir dos quais as condições de consumo não são mais atendidas.

Observa-se uma mudança importante no comportamento da Tabela 4.4 em relação à Tabela 4.3. Com o consumo distribuído ao longo do dia, fica clara a vantagem de utilizar 1 m³ em vez de 1,5 ou 2 m³, sob todas as condições de controle horário; já que, com o consumo concentrado no final da tarde, o gasto com energia auxiliar parece ficar independente do volume do reservatório e o melhor percentual de economia de energia fica nitidamente relacionado com o reservatório de 1 m³, atingindo 25% de economia. A causa desta vantagem é estar aquecendo apenas a água necessária ao consumo um pouco antes do mesmo e não permitindo o acionamento do aquecimento auxiliar justo após o consumo, condição esta normalmente utilizada pelos sistemas controlados apenas por termostato.

TABELA 4.4 – CASO ESPECIAL PARA CONSUMO NO FINAL DA TARDE

CONSUMO CONCENTRADO NO FINAL DA TARDE - 6 COLETORES.							
Dados Utilizados		1,0 m ³		1,5 m ³		2,0 m ³	
1	2	3	4	5	6	7	8
Arquivo TMYPOA	Período h*	Q Aux. kWh	Econ. %	Q Aux. kWh	Econ. %	Q Aux. kWh	Econ. %
0	0.0	1761.4	0.0	1881.4	0.0	2101.4	0.0
A	1.0	1759.0	0.1	1878.3	0.2	2099.1	0.1
B	2.0	1756.5	0.3	1875.3	0.3	2097.2	0.2
1	3.0	1751.6	0.6	1871.3	0.5	2091.7	0.5
2	4.0	1747.8	0.8	1867.5	0.7	2087.4	0.7
3	5.0	1742.3	1.1	1862.6	1.0	2083.1	0.9
4	6.0	1735.9	1.4	1856.4	1.3	2076.3	1.2
5	7.0	1727.9	1.9	1848.6	1.7	2069.8	1.5
6	8.0	1717.7	2.5	1839.8	2.2	2061.4	1.9
7	9.0	1702.9	3.3	1828.1	2.8	2049.6	2.5
8	10.0	1683.7	4.4	1813.3	3.6	2033.8	3.2
9	11.0	1658.9	5.8	1796.5	4.5	2016.9	4.0
10	12.0	1628.6	7.5	1770.5	5.9	1995.6	5.0
11	13.0	1582.5	10.2	1738.2	7.6	1965.2	6.5
12	14.0	1527.5	13.3	1696.6	9.8	1929.7	8.2
13	15.0	1475.9	16.2	1661.8	11.7	1896.5	9.8
14	16.0	1431.8	18.7	1625.1	13.6	1868.9	11.1
15	17.0	1394.7	20.8	1695.1	9.9	1840.8	12.4
16	18.0	1360.1	22.8	1569.9	16.6	1817.9	13.5
17	19.0	1318.3	25.2	1544.2	17.9	1794.8	14.6
18	20.0	1270.5		1501.1		1758.8	

*Aquecimento não disponível a partir da 21 horas.

4.4.3 Consumo por transferência global

A distribuição de consumo proposta foi um exercício de entender a economia de energia auxiliar no sistema de aquecimento de água por energia solar. A água obtida por aquecimento solar, neste caso, teria um consumo de 250 litros efetuado de uma única vez, às 18 horas, mesmo horário a partir do qual a energia de apoio seria desligada. Esta distribuição está ilustrada na Figura 4.9.

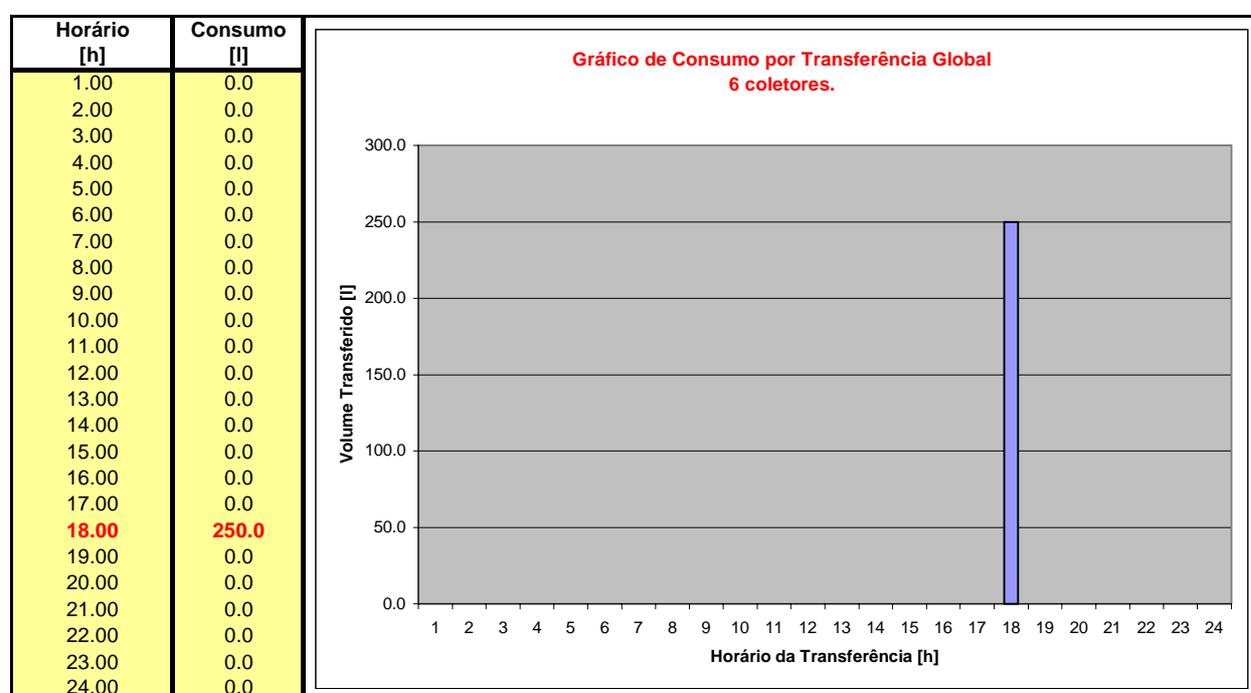


FIGURA 4.9 – GRÁFICO DE BARRAS MOSTRANDO CONCENTRAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA AQUECIDA PARA O PRESENTE CASO

Alcançou-se agora uma economia de energia elétrica ao redor de 27%, quando a capacidade volumétrica do reservatório era de 1,5 m³, tendo a energia de apoio permanecido desligada por 21 horas consecutivas.

Fica claro que um consumo concentrado, como no caso deste último exemplo, num tempo longe das horas de grande insolação e sem o controlador horário, dá oportunidade

para a resistência elétrica atuar durante toda a noite. Além do consumo elétrico que já teria ocorrido no dia seguinte, mesmo com muita incidência de radiação solar, os coletores estarão operando com temperaturas muito altas e, conseqüentemente, com menos eficiência. Volumes maiores no reservatório atenuam a proporção extraída no consumo concentrado e a temperatura média baixa menos. A reposição da água fria não afetando o plano do termostato dá oportunidade para o sistema solar operar de forma mais adequada.

TABELA 4.5 – CASO ESPECIAL PARA CONSUMO NO FINAL DA TARDE

CONSUMO POR TRANSFERÊNCIA GLOBAL - 6 COLETORES							
Dados Utilizados		1,0 m³		1,5 m³		2,0 m³	
1	2	3	4	5	6	7	8
Arquivo TMYPOA	Período h*	Q Aux. kWh	Econ. %	Q Aux. kWh	Econ. %	Q Aux. kWh	Econ. %
0	0.00	602.5	0.00	722.7	0.00	902.8	0.00
1	1.00	601.8	0.12	721.2	0.21	901.0	0.20
2	2.00	600.9	0.27	720.3	0.33	900.1	0.30
3	3.00	599.4	0.51	718.7	0.55	898.2	0.51
4	4.00	597.9	0.76	717.2	0.76	895.3	0.83
5	5.00	596.2	1.05	714.6	1.12	894.2	0.95
6	6.00	593.3	1.53	712.3	1.44	889.6	1.46
7	7.00	590.6	1.98	709.6	1.81	887.3	1.72
8	8.00	588.3	2.36	706.3	2.27	885.5	1.92
9	9.00	584.5	2.99	702.3	2.82	879.7	2.56
10	10.00	580.9	3.59	697.8	3.45	876.3	2.94
11	11.00	577.0	4.23	693.5	4.04	871.3	3.49
12	12.00	566.0	6.06	685.7	5.12	863.5	4.35
13	13.00	557.8	7.42	679.1	6.03	857.4	5.03
14	14.00	549.7		671.7	7.06	850.3	5.82
15	15.00			656.6	9.15	833.6	7.67
16	16.00			633.6	12.33	811.3	10.14
17	17.00			608.6	15.79	784.9	13.06
18	18.00			583.9	19.21	760.2	15.80
19	19.00			560.4	22.46	722.5	19.97
20	20.00			545.1	24.57	721.0	20.14
21	21.00			530.7	26.57	706.6	21.73
22	22.00			492.9		653.3	

*Aquecimento não disponível a partir das 18:00 horas.

5 CONCLUSÕES

Desde o início procurou-se desenvolver um trabalho objetivo, procurando demonstrar a viabilidade de reduzir o consumo de energia elétrica no aquecimento de apoio em sistemas solares.

Tendo este objetivo, simularam-se todas aquelas situações descritas no corpo do trabalho numa tentativa de identificar as estratégias que podem contribuir para o desenvolvimento de projetos que atendam aos requisitos de economia energética. Destas simulações, várias observações puderem ser feitas, tendo-se destacado as mais importantes para compor este capítulo de conclusões:

- O consumo de energia elétrica de apoio varia com o volume do reservatório; volumes pequenos resultam em temperaturas mais altas que trazem como consequência um funcionamento menos eficiente dos coletores solares, resultando, finalmente, em maior consumo de energia elétrica. Por outro lado, volumes muito grandes sem acompanhamento de excesso de coletores solares resultam em pouco aquecimento solar e, mais uma vez, em maior consumo de energia auxiliar.
- O consumo de energia auxiliar depende da relação entre área de coletores, volume de reservatório e consumo de água quente. O dimensionamento deve ser harmônico sob pena de produzir excesso de consumo no apoio elétrico. Os valores recomendados geralmente nos textos de energia solar, para dimensionamento típico, podem ser substituídos por valores que produzam resultados mais econômicos. Conforme os resultados das simulações realizadas, em vez de utilizar 50 litros para cada metro quadrado de coletor e 60°C no termostato, recomenda-se utilizar 200 litros para cada metro quadrado de coletor e 43°C no ajuste do termostato. Estas duas providências combinadas produzirão uma economia de 44,4% no consumo de energia elétrica auxiliar.

- A resistência elétrica de aquecimento é, em geral, projetada para instalar-se na metade da altura do reservatório, especialmente se o reservatório tem o dobro do volume consumido em um dia. Esta providência proporciona segurança ao garantir sempre o volume consumido diariamente com aquecimento adequado. Aumentando a proporção do volume do reservatório, é possível modificar a posição da resistência elétrica para uma zona mais alta no reservatório. Recomenda-se estabelecer a posição da resistência elétrica o mais alto possível, respeitando a manutenção de um volume acima da resistência, com aproximadamente o valor consumido diariamente. Se por algum motivo técnico não for possível levar a instalação da resistência para o plano com altura ideal, o deslocamento do termostato para esta altura já introduz um importante efeito.
- O perfil de consumo de água quente ao longo do dia interfere no desempenho geral do sistema de aquecimento. Para diferentes perfis de consumo, a configuração ideal da instalação pode resultar diferente. Enquanto que, para um perfil de consumo distribuído ao longo do dia, uma relação de volume do reservatório/área de coletor/volume de consumo, na proporção 200 litros/1m²/50 litros é adequada, para um perfil de consumo concentrado no final da tarde e noite, a relação é a mesma, porém com pouca influência no caso de aumentar a proporção de volume de reservatório. No caso de uma demanda inteiramente concentrada às 18 horas, a relação ideal se desloca para 300 litros/1m²/50 litros.
- Foi demonstrado que a utilização de um controlador horário conectando a resistência elétrica de aquecimento pode produzir economia de 28,5% na energia auxiliar. A eficácia de tal equipamento depende também do perfil de consumo ao longo do dia, sendo mais efetivo no caso de consumo concentrado do que no caso de consumo distribuído e, apesar de não ter sido abordado no presente trabalho, é evidente que este controlador traria vantagens econômicas no caso de entrar em vigor a cobrança diferenciada horária no setor residencial, permitindo excluir os horários de maior demanda da programação diária.

- Finalmente foi demonstrado, através das simulações, que uma combinação adequada das estratégias para diminuir o consumo de energia elétrica no apoio de sistemas solares, como os discutidos nesta dissertação, pode conduzir a uma economia anual de 79%. Trata-se de comparação entre a energia auxiliar necessária para o consumo distribuído ao longo do dia, com termostato ajustado para 60°C e relação volume do reservatório/área de coletor/volume do consumo igual a 50 litros/lm²/50 litros, e o mesmo consumo atendido por um sistema com relação 200 litros/1m²/50 litros, com termostato ajustado para 43 °C e controlador horário que desconecta a resistência elétrica no período noturno (das 21 às 9 horas) 700 kWh/ano.

Este trabalho não aborda aspectos econômicos no sentido de otimizar o dimensionamento, mas faz-se uma comparação ilustrativa dos dois casos destacados: o sistema inicialmente apresentado no capítulo 2, como sendo um dimensionamento típico, e um sistema que segue as recomendações deste trabalho. No primeiro caso, têm-se 6 coletores, um reservatório de 375 litros e termostato ajustado para 60°C, gastando 2.928,5 kWh/ano de energia elétrica. O contraste é feito com um sistema de idêntico consumo e número de coletores, um reservatório de 1000 litros e termostato ajustado para 43°C com utilização de controlador horário, gastando 1.421,9 kWh/ano de energia elétrica. Os investimentos necessários para um e outro caso são, respectivamente, R\$5.860,00 e R\$7.660,00. Aparentemente é mais interessante optar pelo sistema mais barato, entretanto, analisando o consumo de energia elétrica, verifica-se uma diferença anual de 1.506,6 kWh/ano a favor do segundo sistema, o que implica poder a diferença de investimento ser recuperada em 50 meses e durante uma vida útil de 25 anos (sem considerar juros ou gastos de manutenção). O usuário que optar pelo segundo sistema terá feito uma economia de R\$8931,12 e 31,3 MWh, considerando R\$0,285/kWh.

Uma análise econômica completa fica como sugestão de continuidade imediata deste trabalho. Da mesma forma, o emprego de controladores lógicos programáveis, associados ao uso de água quente e energia solar, na condição sugerida no capítulo 4 do trabalho, merece ser investigado em condições experimentais em nível de protótipo, por julgar-se residir aí a solução para o crucial problema do atendimento da demanda sazonal definida no gráfico da Figura 1.1. Ainda fica como sugestão o estudo do efeito de utilizar-se um controlador lógico programável para interferir na conexão da resistência elétrica, permitindo seu uso apenas nos momentos em que a radiação solar apresente intensidade inferior a um determinado patamar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 10184 – Coletores Solares Planos para Líquidos, Determinação do Rendimento Térmico, Método de Ensaio, 1988.

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

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

Klein, S. A. et al., 1997. “TRNSYS – A Transient System Simulation Program”, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin (USA).

Krenzinger, A., 1994. “Modelo do Peixe – Sequências Horárias de Radiação Solar”. **ANAIS.V ENCIT** – Encontro Nacional de Ciências Térmicas, São Paulo, Brasil

Krenzinger, A., Macagnan, M.H.. Elaboração de Software Servidor de Dados de Radiação Solar Para Dimensionamento e Simulação. **ANAIS. III Encontro Nacional e I Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído**. Gramado, RS: 1995.

Krenzinger, A., Vielmo, H.A. e Prieb, C. W. M. “Caracterização de Componentes de Sistemas de Aquecimento Solar na UFRGS”. III Encontro para o Desenvolvimento da Energia Solar, Eólica e de Biomassa no Brasil, São Paulo SP, 1996.

Macagnan, M. H., 1989. “**Estudo de Modelos de Sintetização de Dados de Radiação Solar**”. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

Oliveski, R. C., 2000. “**Análise Numérica e Experimental dos Campos de Temperatura e Velocidade em Armazenadores Térmicos**”. Tese de Doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

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

Siqueira, A. M. O., Krenzinger, A., 1998. “Cálculo da Eficiência Diária em Média Mensal de um Sistema de Aquecimento Solar Operando em Regime de Termossifão”. **ANAIS. MERCOFRIO 98** – Feira e Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul, Porto Alegre, Brasil.

APÊNDICE I – ARQUIVOS *TMYPOA*TABELA I.1 – ARQUIVO *TMYPOA* ORIGINAL

ARQUIVO <i>TMYPOA</i> .						
Mes	Dia	Hora h	Rad. Solar MJ/m ²	Veloc.Vento m/s	Bulbo Seco °C	Bulbo Úmido °C
1	1	0	0	3,1	22,5	18,7
1	1	1	0	3,1	22,5	18,7
1	1	2	0	2,6	21,8	18,3
1	1	3	0	2,6	20,5	17,5
1	1	4	0	3,1	20,2	17,1
1	1	5	0	2,1	19,7	16,8
1	1	6	354,7091	0	21	17,2
1	1	7	591,4319	2,1	21	17,3
1	1	8	1651,311	0	24,8	19,9
1	1	9	1506,466	4,6	26,6	20,5
1	1	10	2236,272	5,1	28,5	21,1
1	1	11	2628,853	3,6	30,2	21,8
1	1	12	2909,657	5,1	30,5	21,7
1	1	13	2450,315	5,1	31,7	22,2
1	1	14	1981,668	4,1	33	23,3
1	1	15	1702,986	8,2	28,8	22,8
1	1	16	1017,479	11,3	26,7	22,2
1	1	17	636,2927	2,6	24,3	21,4
1	1	18	356,7578	1	24,3	22
1	1	19	0	1	22,8	20,8
1	1	20	0	0	21	19,4
1	1	21	0	2,6	21	19,6
1	1	22	0	0	20,8	19,5
1	1	23	0	0	20,5	19,5
1	1	24	0	0	21,5	20,1

A Tabela I.1 apresenta um exemplo do arquivo *TMYPOA* original mostrando o primeiro dia do ano.

TABELA I.2 – ARQUIVO TMYPOA(X) DERIVADO DO ORIGINAL

ARQUIVO TMYPOA(X) - CONTROLE							
Mes	Dia	Hora	Rad. Solar	Veloc.Vento	Bulbo Seco	Bulbo Úmido	Controle
		h	MJ/m ²	m/s	°C	°C	Período
1	1	0	0	3,1	22,5	18,7	0
1	1	1	0	3,1	22,5	18,7	0
1	1	2	0	2,6	21,8	18,3	0
1	1	3	0	2,6	20,5	17,5	0
1	1	4	0	3,1	20,2	17,1	0
1	1	5	0	2,1	19,7	16,8	0
1	1	6	354,7091	0	21	17,2	0
1	1	7	591,4319	2,1	21	17,3	0
1	1	8	1651,311	0	24,8	19,9	0
1	1	9	1506,466	4,6	26,6	20,5	0
1	1	10	2236,272	5,1	28,5	21,1	0
1	1	11	2628,853	3,6	30,2	21,8	0
1	1	12	2909,657	5,1	30,5	21,7	0
1	1	13	2450,315	5,1	31,7	22,2	0
1	1	14	1981,668	4,1	33	23,3	1
1	1	15	1702,986	8,2	28,8	22,8	1
1	1	16	1017,479	11,3	26,7	22,2	1
1	1	17	636,2927	2,6	24,3	21,4	1
1	1	18	356,7578	1	24,3	22	1
1	1	19	0	1	22,8	20,8	0
1	1	20	0	0	21	19,4	0
1	1	21	0	2,6	21	19,6	0
1	1	22	0	0	20,8	19,5	0
1	1	23	0	0	20,5	19,5	0
1	1	24	0	0	21,5	20,1	0

A Tabela I.2 apresenta o arquivo TMYPOA(X), com acréscimo da coluna de controle, para o primeiro dia do ano.

O uso do arquivo exemplificado acima permite seja a energia ligada somente dentro do um período preestabelecido, como no presente caso, das 14 às 18 horas.

APÊNDICE II – POTÊNCIA NOMINAL X TEMPERATURA DA ÁGUA

TABELA II.1 – POTÊNCIA NOMINAL X TEMPERATURA DA ÁGUA PARA 5 COLETORES

RESUMO ANUAL - 5 COLETORES - 0,5 m ³ .						RESUMO ANUAL - 5 COLETORES - 1,0 m ³ .					
Res. Nom.	Q. Util	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.	Res. Nom.	Q. Util	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.
18000	4056.27	2386.80	908.54	42.55	53.67	18000	4229.73	2260.28	911.69	42.72	50.75
14000	4056.46	2386.64	908.58	42.55	53.67	14000	4229.71	2260.30	911.68	42.72	50.74
10000	4056.35	2386.76	908.60	42.55	53.67	10000	4229.82	2260.14	911.67	42.72	50.74
8000	4056.29	2386.81	908.53	42.55	53.67	8000	4229.82	2260.18	911.71	42.72	50.74
6000	4056.54	2386.65	908.68	42.55	53.67	6000	4229.73	2260.28	911.70	42.72	50.74
5000	4056.45	2386.56	908.51	41.87	53.67	5000	4229.84	2260.09	911.66	42.72	50.75
4000	4056.97	2384.48	907.65	40.77	53.67	4000	4230.21	2259.35	911.34	42.08	50.75
3000	4060.79	2364.81	903.31	34.58	53.67	3000	4231.98	2254.14	909.66	40.14	50.74
2000	4076.51	2221.53	881.67	27.22	53.67	2000	4243.23	2160.56	894.05	30.80	50.74
1000	4136.47	1622.02	796.54	21.10	53.64	1000	4294.34	1645.23	816.14	22.23	50.67
RESUMO ANUAL - 5 COLETORES - 1,5 m ³ .						RESUMO ANUAL - 5 COLETORES - 2,0 m ³ .					
Res. Nom.	Q. Util	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.	Res. Nom.	Q. Util	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.
18000	4282.69	2251.43	909.15	42.77	49.67	18000	4291.24	2261.26	913.39	42.81	49.25
14000	4282.86	2251.42	909.16	42.77	49.67	14000	4291.99	2259.86	913.39	42.81	49.25
10000	4282.78	2251.52	909.18	42.77	49.67	10000	4290.96	2261.05	913.40	42.81	49.25
8000	4282.74	2251.47	909.13	42.77	49.67	8000	4291.77	2258.70	913.40	42.81	49.25
6000	4282.91	2251.37	909.03	42.77	49.67	6000	4291.52	2260.13	913.45	42.81	49.25
5000	4282.72	2251.41	909.14	42.77	49.67	5000	4291.93	2259.83	913.37	42.81	49.25
4000	4282.93	2250.96	909.12	42.72	49.67	4000	4292.45	2258.37	913.20	42.81	49.25
3000	4283.63	2248.87	908.38	41.06	49.67	3000	4292.43	2257.97	913.04	41.79	49.25
2000	4292.73	2185.62	896.75	31.77	49.67	2000	4298.59	2212.36	904.15	33.74	49.25
1000	4345.80	1684.89	818.20	22.73	49.67	1000	4353.63	1715.24	823.28	24.60	49.25

Os números em cor azul indicam o não atendimento da temperatura de 40°C, mínimo aceitável no misturador.

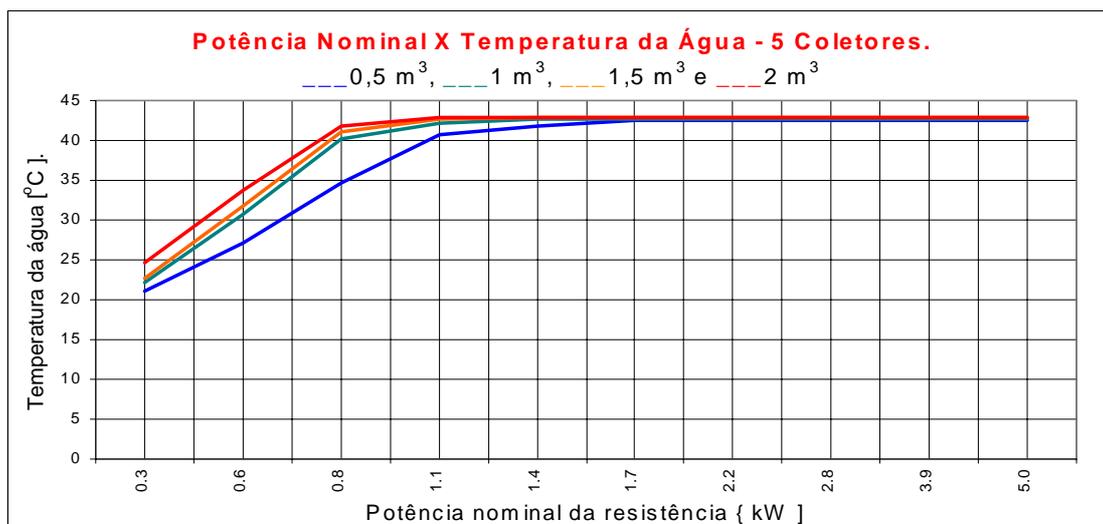


FIGURA II.1 – CURVAS PARA UM SISTEMA SOLAR PARA 5 COLETORES

TABELA II.2 – POTÊNCIA NOMINAL X TEMPERATURA DA ÁGUA PARA 6 COLETORES

RESUMO ANUAL - 6 COLETORES - 0,5 m ³						RESUMO ANUAL - 6 COLETORES - 1,0 m ³					
Res. Nom.	Q. Útil	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.	Res. Nom.	Q. Útil	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.
kW	kWh	kWh	kWh	°C	°C	kW	kWh	kWh	kWh	°C	°C
0.3	4522.6	2018.2	1005.4	42.6	58.6	0.3	4737.8	1846.8	1002.8	42.7	56.0
0.6	4522.6	2018.1	1005.4	42.6	58.6	0.6	4737.7	1846.9	1002.7	42.7	56.0
0.8	4522.6	2018.1	1005.4	42.6	58.6	0.8	4737.8	1846.8	1002.8	42.7	56.0
1.1	4522.7	2018.1	1005.4	42.6	58.6	1.1	4737.8	1846.7	1002.8	42.7	56.0
1.4	4522.7	2018.1	1005.4	42.6	58.6	1.4	4737.8	1846.7	1002.8	42.7	56.0
1.7	4522.7	2018.0	1005.4	41.9	58.6	1.7	4737.9	1846.6	1002.8	42.7	56.0
2.2	4523.6	2015.8	1004.6	40.8	58.6	2.2	4738.0	1846.3	1002.6	42.5	56.0
2.8	4526.9	1998.7	1000.8	34.4	58.6	2.8	4739.6	1842.0	1001.2	40.5	56.0
3.9	4543.0	1873.5	982.3	28.0	58.6	3.9	4750.2	1766.5	988.3	31.2	56.0
5.0	4604.1	1376.6	912.2	21.4	58.4	5.0	4800.2	1372.2	929.1	22.7	56.0
RESUMO ANUAL - 6 COLETORES - 1,5 m ³						RESUMO ANUAL - 6 COLETORES - 2,0 m ³					
Res. Nom.	Q. Útil	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.	Res. Nom.	Q. Útil	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.
kW	kWh	kWh	kWh	°C	°C	kW	kWh	kWh	kWh	°C	°C
0.3	4811.5	1810.2	997.5	42.8	53.7	0.3	4831.3	1802.2	996.8	42.8	52.7
0.6	4811.3	1810.7	997.3	42.8	53.7	0.6	4831.3	1802.3	996.8	42.8	52.7
0.8	4811.3	1810.7	997.3	42.8	53.7	0.8	4831.8	1801.5	996.8	42.8	52.7
1.1	4811.3	1810.7	997.3	42.8	53.7	1.1	4831.6	1801.7	996.7	42.8	52.7
1.4	4811.3	1810.8	997.3	42.8	53.7	1.4	4831.5	1802.1	996.8	42.8	52.7
1.7	4810.9	1811.3	997.4	42.8	53.7	1.7	4831.3	1802.2	996.8	42.8	52.7
2.2	4811.7	1809.9	997.3	42.5	53.7	2.2	4831.3	1802.2	996.8	42.8	52.7
2.8	4812.8	1808.4	996.7	41.5	53.7	2.8	4830.9	1802.7	997.0	41.9	52.7
3.9	4819.9	1761.1	987.9	32.4	53.7	3.9	4837.5	1770.1	990.3	34.9	52.7
5.0	4866.9	1403.9	930.8	23.3	53.7	5.0	4885.2	1430.0	933.8	25.8	53.1

Números em cor azul indicam o não atendimento da temperatura de 40°C, aceitável no misturador.

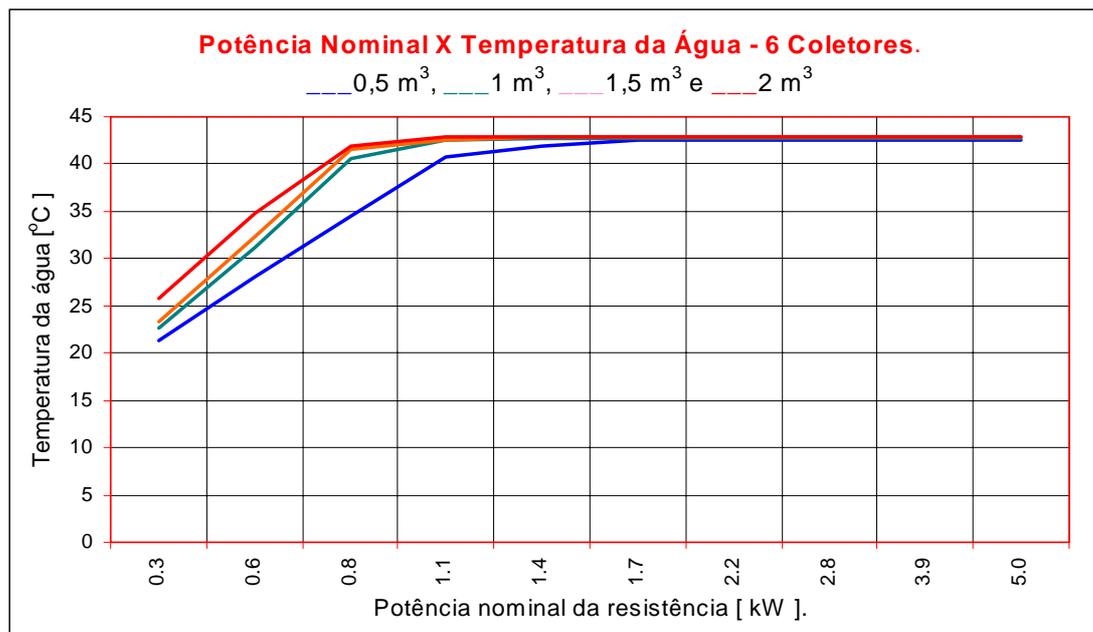


FIGURA II.2 – CURVAS PARA UM SISTEMA SOLAR PARA 6 COLETORES

TABELA II.3 – POTÊNCIA NOMINAL X TEMPERATURA DA ÁGUA PARA 7 COLETORES

RESUMO ANUAL - 7 COLETORES - 0,5 m ³ .						RESUMO ANUAL - 7 COLETORES - 1,0 m ³ .					
Res. Nom.	Q. Útil	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.	Res. Nom.	Q. Útil	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.
kW	kWh	kWh	kWh	°C	°C	kW	kWh	kWh	kWh	°C	°C
0,3	4900,2	1739,6	1102,6	42,6	63,1	0,3	5149,0	1535,8	1100,7	42,7	60,2
0,6	4900,1	1739,7	1102,6	42,6	63,1	0,6	5149,0	1535,8	1100,7	42,7	60,2
0,8	4900,1	1739,7	1102,6	42,6	63,1	0,8	5149,1	1535,7	1100,7	42,7	60,2
1,1	4900,1	1739,6	1102,6	42,6	63,1	1,1	5149,2	1535,7	1100,9	42,7	60,2
1,4	4900,0	1739,7	1102,6	42,6	63,1	1,4	5149,1	1535,8	1100,8	42,7	60,2
1,7	4900,1	1739,6	1102,6	41,9	63,1	1,7	5149,1	1535,7	1100,7	42,7	60,2
2,2	4900,8	1738,0	1102,0	40,8	63,1	2,2	5149,2	1535,3	1100,6	42,6	60,2
2,8	4904,3	1722,3	1098,6	35,3	63,1	2,8	5150,8	1531,8	1099,5	40,7	60,2
3,9	4920,9	1609,1	1082,0	28,6	63,1	3,9	5161,0	1470,0	1088,9	31,6	60,2
5,0	4983,5	1177,7	1022,0	21,6	63,0	5,0	5207,9	1150,7	1041,3	22,9	63,0
RESUMO ANUAL - 7 COLETORES - 1,5 m ³ .						RESUMO ANUAL - 7 COLETORES - 2,0 m ³ .					
Res. Nom.	Q. Útil	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.	Res. Nom.	Q. Útil	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.
kW	kWh	kWh	kWh	°C	°C	kW	kWh	kWh	kWh	°C	°C
0,3	5241,3	1476,6	1094,3	42,8	58,5	0,3	5274,0	1450,7	1089,9	42,8	57,2
0,6	5241,2	1476,8	1094,2	42,8	58,5	0,6	5273,4	1451,3	1089,9	42,8	57,2
0,8	5241,0	1477,0	1094,3	42,8	58,5	0,8	5273,9	1449,7	1090,0	42,8	57,2
1,1	5241,1	1477,0	1094,3	42,8	58,5	1,1	5273,4	1451,2	1089,9	42,8	57,2
1,4	5241,3	1476,6	1094,3	42,8	58,5	1,4	5273,8	1451,3	1090,1	42,8	57,2
1,7	5240,9	1477,1	1094,4	42,8	58,5	1,7	5273,4	1451,3	1089,9	42,8	57,2
2,2	5241,0	1476,7	1094,3	42,7	58,5	2,2	5273,8	1451,2	1090,1	42,8	57,2
2,8	5241,9	1475,4	1093,8	41,6	58,5	2,8	5274,4	1449,9	1089,7	42,5	57,2
3,9	5248,7	1438,3	1086,8	33,1	58,5	3,9	5279,3	1428,6	1085,3	35,8	57,2
5,0	5292,3	1164,7	1042,6	23,8	58,5	5,0	5320,0	1178,7	1043,3	27,0	57,0

Números em cor azul indicam o não atendimento da temperatura de 40°C, aceitável no misturador.

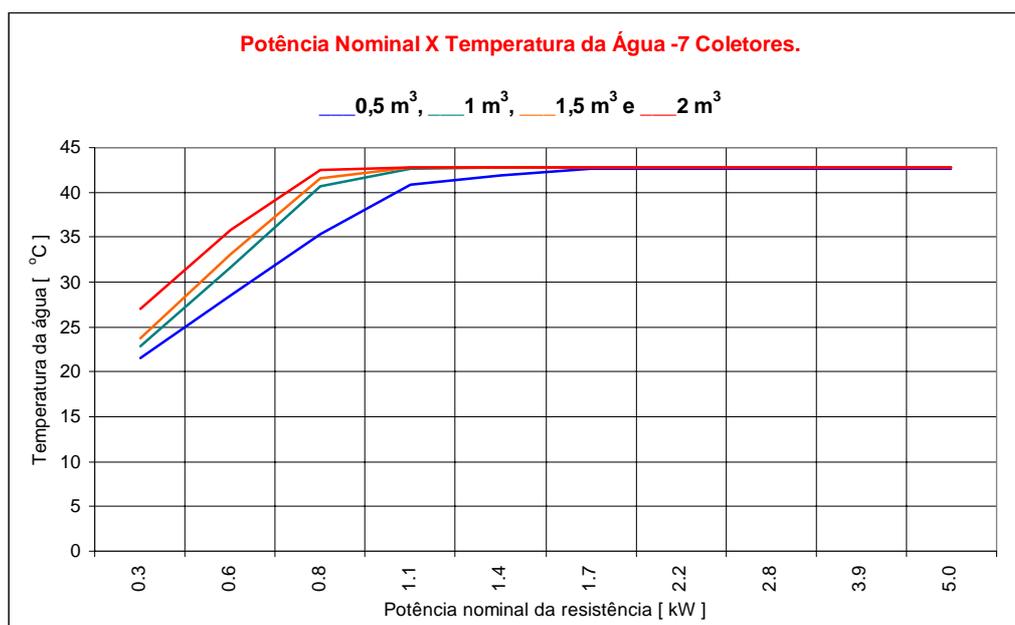


FIGURA II.3 – CURVAS PARA UM SISTEMA SOLAR PARA 7 COLETORES

TABELA II.4 – POTÊNCIA NOMINAL X TEMPERATURA DA ÁGUA PARA 8 COLETORES

RESUMO ANUAL - 8 COLETORES - 0,5 m ³ .						RESUMO ANUAL - 8 COLETORES - 1,0 m ³ .					
Res. Nom.	Q. Útil	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.	Res. Nom.	Q. Útil	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.
kW	kWh	kWh	kWh	°C	°C	kW	kWh	kWh	kWh	°C	°C
0,3	5206,3	1529,3	1196,5	42,6	67,4	0,3	5491,1	1294,5	1200,5	42,7	63,9
0,6	5206,3	1529,3	1196,5	42,6	67,4	0,6	5491,1	1294,5	1200,5	42,7	63,9
0,8	5206,2	1529,4	1196,5	42,6	67,4	0,8	5491,1	1294,5	1200,5	42,7	63,9
1,1	5206,4	1529,3	1196,5	42,6	67,4	1,1	5491,1	1294,5	1200,5	42,7	63,9
1,4	5206,3	1529,3	1196,5	42,6	67,4	1,4	5491,1	1294,4	1200,4	42,7	63,9
1,7	5206,3	1529,3	1196,4	41,8	67,4	1,7	5491,0	1294,5	1200,3	42,7	63,9
2,2	5206,9	1527,7	1195,8	40,8	67,4	2,2	5491,0	1294,5	1200,3	42,7	63,9
2,8	5210,6	1513,4	1192,8	35,7	67,4	2,8	5492,5	1291,2	1199,4	41,2	63,9
3,9	5227,0	1410,2	1178,0	29,6	67,4	3,9	5503,1	1238,0	1190,3	31,8	63,9
5,0	5291,2	1024,9	1125,0	21,8	67,4	5,0	5548,7	967,4	1151,3	23,1	63,9
RESUMO ANUAL - 8 COLETORES - 1,5 m ³ .						RESUMO ANUAL - 8 COLETORES - 2,0 m ³ .					
Res. Nom.	Q. Útil	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.	Res. Nom.	Q. Útil	Q. Aux.	Perdas	T.Supri.	T. Máxi.
kW	kWh	kWh	kWh	°C	°C	kW	kWh	kWh	kWh	°C	°C
0,3	5593,7	1218,2	1193,0	42,8	62,0	0,3	5632,7	1181,1	1189,5	42,8	60,5
0,6	5593,7	1218,1	1193,0	42,8	62,0	0,6	5632,9	1180,9	1189,5	42,8	60,5
0,8	5594,1	1217,5	1193,1	42,8	62,0	0,8	5632,7	1181,1	1189,5	42,8	60,5
1,1	5594,4	1217,5	1193,1	42,8	62,0	1,1	5632,7	1181,1	1189,5	42,8	60,5
1,4	5594,2	1217,5	1193,1	42,8	62,0	1,4	5632,6	1181,0	1189,5	42,8	60,5
1,7	5594,0	1218,2	1193,0	42,8	62,0	1,7	5632,6	1181,1	1189,5	42,8	60,5
2,2	5594,3	1217,6	1193,0	42,8	62,0	2,2	5632,7	1181,0	1189,5	42,8	60,5
2,8	5593,9	1218,3	1192,8	41,9	62,0	2,8	5632,9	1180,7	1189,4	42,5	60,5
3,9	5601,9	1187,2	1186,9	33,5	62,0	3,9	5636,5	1166,7	1185,7	36,5	60,5
5,0	5640,6	972,3	1152,2	24,4	62,2	5,0	5676,4	976,3	1153,0	28,0	60,5

Números em cor azul indicam o não atendimento da temperatura de 40°C, aceitável no misturador.

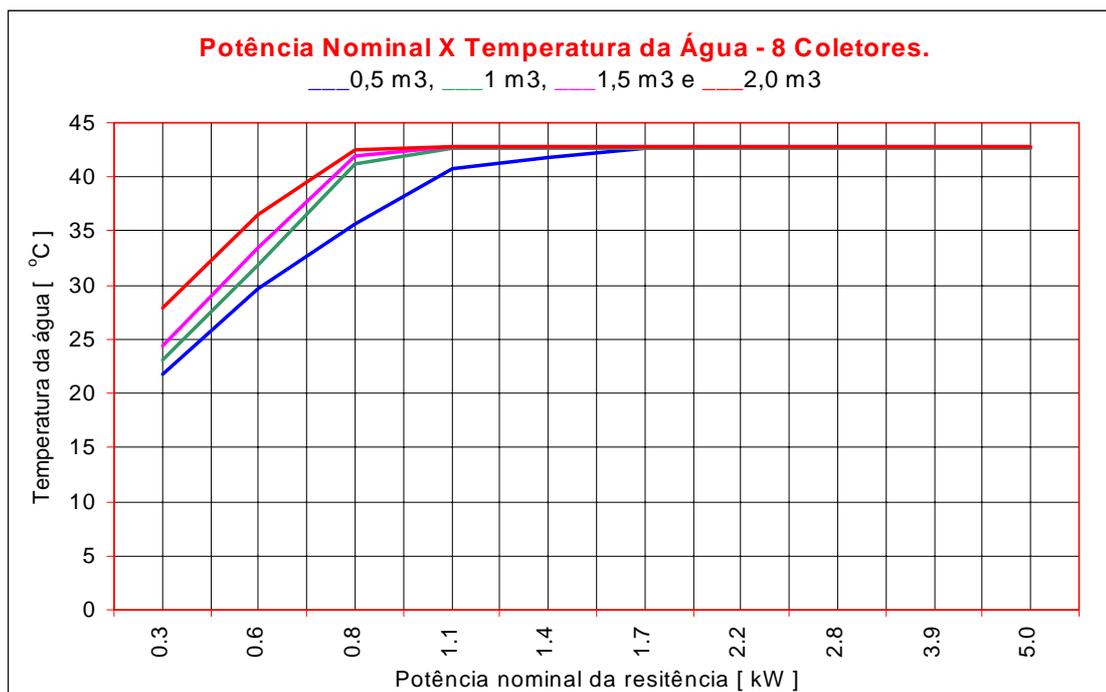


FIGURA II.4 – CURVAS PARA UM SISTEMA SOLAR PARA 8 COLETORES

Independentemente do número de coletores empregados para os reservatórios com capacidade volumétrica de 0,5, 1, 1,5 e 2 m³, observa-se que, para uma potência igual ou superior a 1,7 kW na resistência de aquecimento, a água atinge 43°C em qualquer um dos 4 reservatórios

APÊNDICE III – VARIAÇÃO DE ENERGIA ÚTIL

Variação da energia útil em função da altura da resistência auxiliar de aquecimento.

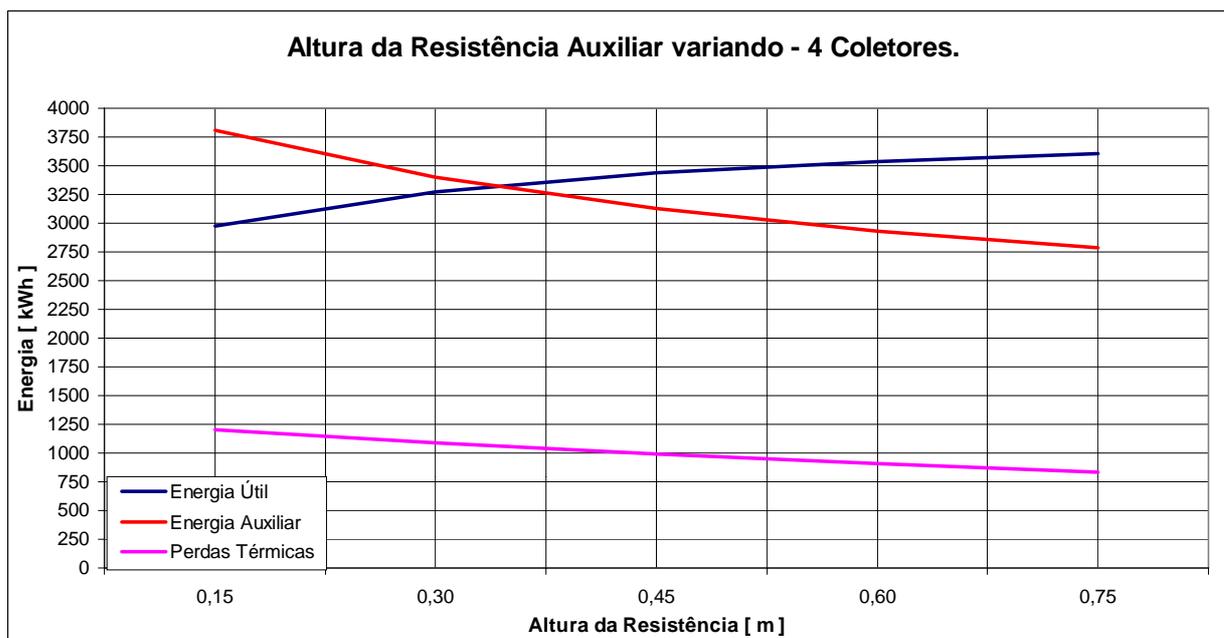


FIGURA III.1 – CURVAS DA POTÊNCIA FUNÇÃO DA POSIÇÃO DA RESISTÊNCIA AUXILIAR PARA 4 COLETORES

TABELA III.1 – ALTURA DA RESISTÊNCIA AUXILIAR PARA 4 COLETORES

ALTURA DA RESISTÊNCIA AUXILIAR VARIANDO - 4 COLETORES.						
Altura	Q Útil	Q Aux.	Perdas	Q. Interno	T.Supri.	T.Máx.
m	kWh	kWh	kWh	kWh	°C	°C
0,15	2973,9	3808,2	1201,7	1,8	42,8	51,0
0,30	3272,7	3402,0	1088,6	3,8	42,8	50,4
0,45	3441,0	3125,1	992,0	5,7	42,8	49,0
0,60	3538,4	2934,6	907,7	7,5	42,8	47,6
0,75	3604,5	2785,4	830,8	9,0	42,7	46,8

Variação da energia útil em função da altura da resistência auxiliar de aquecimento.

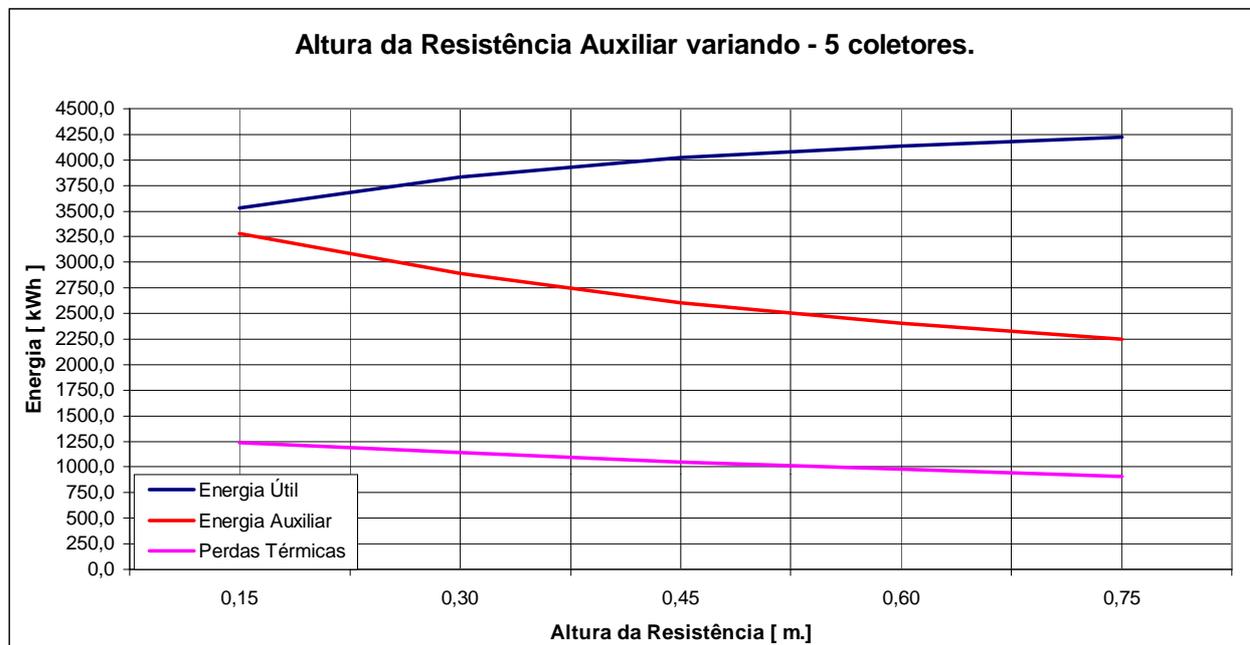


FIGURA III.2 – CURVAS DA POTÊNCIA FUNÇÃO DA POSIÇÃO DA RESISTÊNCIA AUXILIAR PARA 5 COLETORES

TABELA III.2 – ALTURA DA RESISTÊNCIA AUXILIAR PARA 5 COLETORES

Altura m	Q Útil kWh	Q Aux. kWh	Perdas kWh	Q. Interno kWh	T.Supri. °C	T.Máx. °C
0,15	3533,7	3278,4	1234,9	1,8	42,8	52,8
0,30	3831,5	2890,3	1139,1	4,2	42,8	52,1
0,45	4022,7	2603,6	1051,3	6,6	42,8	51,1
0,60	4139,8	2404,7	976,6	8,7	42,8	50,9
0,75	4219,9	2252,8	909,9	10,6	42,7	50,7

Variação da energia útil em função da altura da resistência auxiliar de aquecimento.

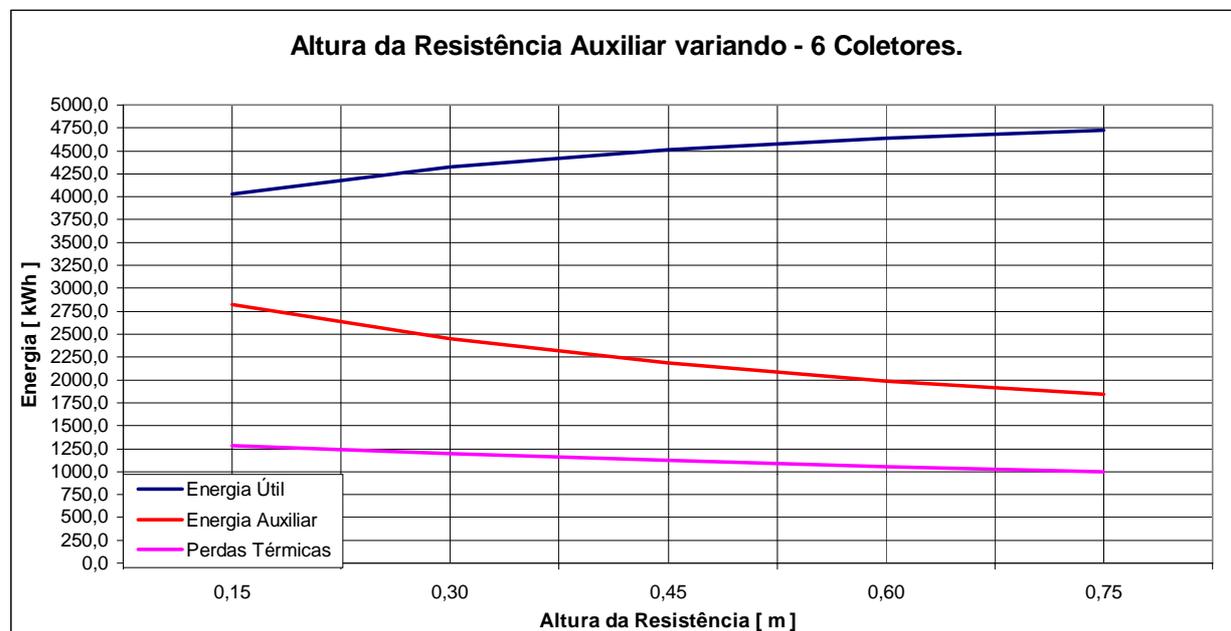


FIGURA III.3 – CURVAS DA POTÊNCIA FUNÇÃO DA POSIÇÃO DA RESISTÊNCIA AUXILIAR PARA 6 COLETORES

TABELA III.3 – ALTURA DA RESISTÊNCIA AUXILIAR PARA 6 COLETORES

Altura	Q Útil	Q Aux.	Perdas	Q. Interno	T.Supri.	T.Máx.
m	kWh	kWh	kWh	kWh	°C	°C
0,15	4034,9	2822,3	1282,5	2,9	42,8	56,5
0,30	4327,3	2452,5	1199,4	5,0	42,8	55,8
0,45	4511,7	2188,8	1124,8	7,4	42,8	56,0
0,60	4638,8	1989,5	1058,8	9,8	42,8	56,0
0,75	4726,6	1840,7	1000,8	12,0	42,7	56,0

Variação da energia útil em função da altura da resistência auxiliar de aquecimento.

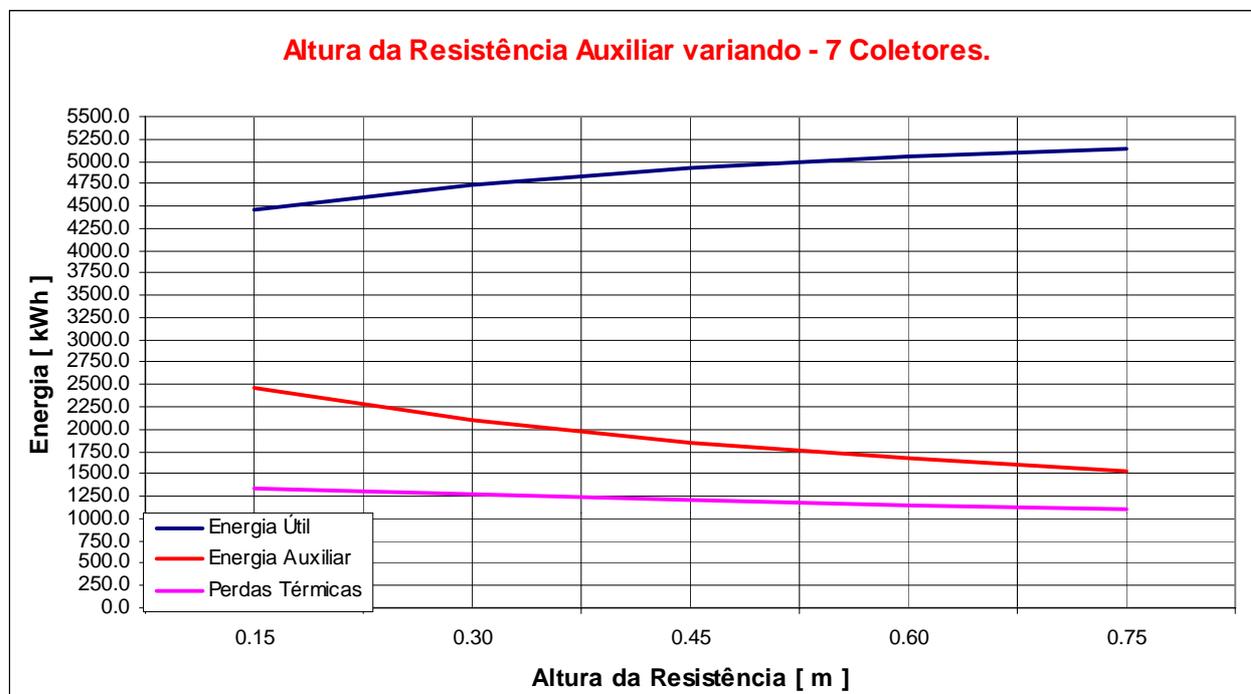


FIGURA III.4 – CURVAS DA POTÊNCIA FUNÇÃO DA POSIÇÃO DA RESISTÊNCIA AUXILIAR PARA 7 COLETORES

TABELA III.4 – ALTURA DA RESISTÊNCIA AUXILIAR PARA 7 COLETORES

Altura	Q Útil	Q Aux.	Perdas	Q. Interno	T.Supri.	T.Máx.
m	kWh	kWh	kWh	kWh	°C	°C
0,15	4453,5	2464,8	1344,5	3,9	42,8	60,5
0,30	4739,5	2110,6	1271,2	5,8	42,8	60,3
0,45	4926,4	1854,4	1205,5	8,1	42,8	60,2
0,60	5044,9	1676,1	1149,7	10,6	42,8	60,2
0,75	5136,9	1530,9	1098,6	13,3	42,7	60,2

Variação da energia útil em função da altura da resistência auxiliar de aquecimento.

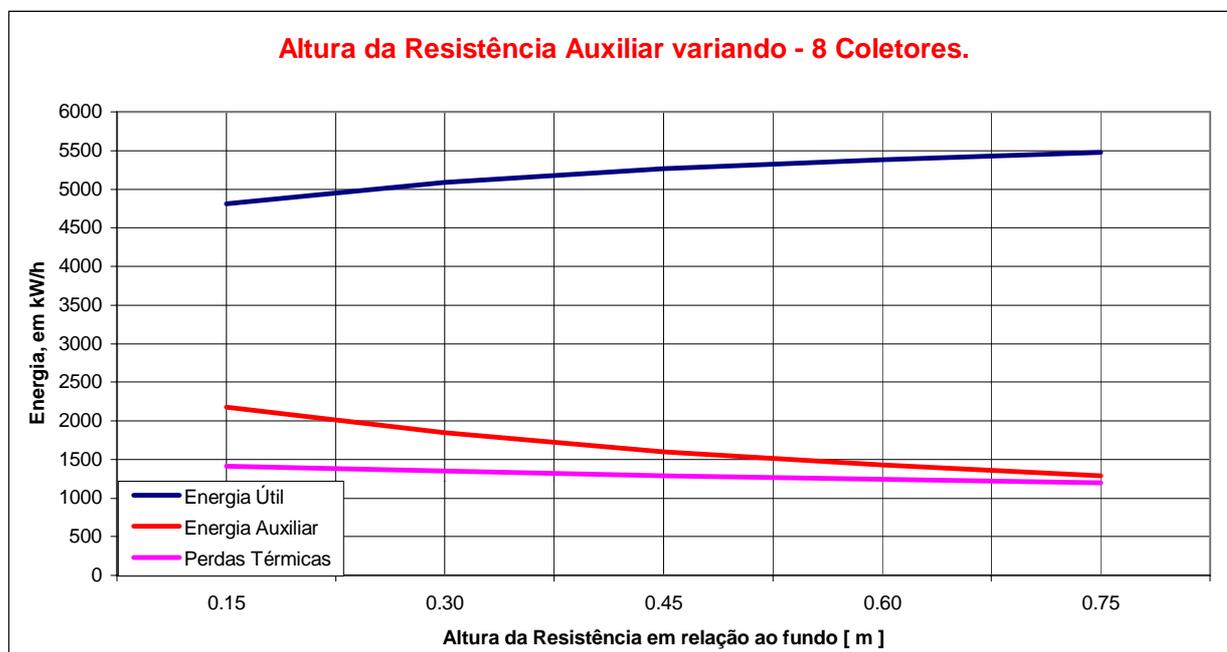


FIGURA III.5 – CURVAS DA POTÊNCIA FUNÇÃO DA POSIÇÃO DA RESISTÊNCIA AUXILIAR PARA 8 COLETORES

TABELA III.5 – ALTURA DA RESISTÊNCIA AUXILIAR PARA 8 COLETORES.

Altura m	Q Útil kW/h	Q Aux. kW/h	Perdas kW/h	Q. Interno	T.Supri. °C	T.Máx. °C
0.15	4809.66	2177.98	1413.54	4.93	42.82	64.24
0.30	5085.03	1842.33	1349.02	6.73	42.80	63.93
0.45	5264.91	1602.26	1291.94	9.02	42.78	63.93
0.60	5384.82	1430.47	1242.49	11.56	42.75	63.93
0.75	5477.8	1291.19	1198.22	14.27	42.73	63.93