

**LAERTE BERNARDES ARRUDA**

**OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE  
ÁGUA COM CONTROLE DE VAZÕES EM COLETORES PLANOS**

Texto apresentado à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção  
do Título de Doutor em Engenharia Civil.

São Paulo

2004

**LAERTE BERNARDES ARRUDA**

**OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE  
ÁGUA COM CONTROLE DE VAZÕES EM COLETORES PLANOS**

Texto apresentado à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo a obtenção do  
Título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração:  
Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientador:  
Prof. Dr. Racine Tadeu Araujo Prado

São Paulo  
2004

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu Orientador.

São Paulo, 19 de julho de 2004.

Assinatura do autor: \_\_\_\_\_

Assinatura do orientador: \_\_\_\_\_

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Arruda, Laerte Bernardes**

**Operação de sistemas de aquecimento solar de água com controle de vazões em coletores planos / L.B. Arruda. -- São Paulo, 2004.**

**230p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.**

**1.Sistemas prediais 2.Aquecimento solar de água  
3.Automação predial I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil  
Il.t.**

À minha esposa e filhos que tanto me apoiaram e têm sido o grande incentivo da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Racine Tadeu Araújo Prado, pela orientação, apoio e incentivo no durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo indispensável apoio financeiro.

À Aquecedores Cúmulus S/A. Indústria e Comércio, que gentilmente brindou os coletores solares e os reservatórios térmicos.

Aos professores, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP, sempre prestativos, que em muito colaboraram como apoio nos momentos das mais diversas dificuldades.

À Universidade Federal de Uberlândia, por me proporcionar as condições necessárias para a minha dedicação exclusiva a esta pesquisa.

À professora Dr<sup>a</sup>. Vânia Maria B. Arruda Fernandes, do Instituto de Letras e Linguística da UFU, pelo auxílio na revisão do texto.

À minha esposa Consuelo e a meus filhos, pela compreensão, apoio e participação em todos os momentos.

A Deus, pela oportunidade da vida.

## RESUMO

O presente trabalho consiste em um estudo experimental sobre o efeito do controle de vazões em sistemas de aquecimento solar de água em instalações com grande número de coletores, onde o gradiente de temperatura não é suficiente para circular a água por termossifonagem. Foi avaliado o desempenho de todo o sistema sob diferentes condições de insolação, de vazão, de diferenciais de temperatura entre os coletores e o reservatório, em regime não permanente. Os resultados experimentais foram comparados com a equação de rendimento dos coletores, para condições de regime quase permanente, obtida segundo a norma da ABNT – NBR 10184/1988. Os ensaios foram realizados em duas baterias de testes, cada uma composta de dois coletores industrializados e um reservatório isolado termicamente. Em uma destas baterias, o fluxo de água entre os coletores e o reservatório ocorreu por termossifonagem, isto é, sem nenhuma restrição à vazão; na outra bateria, a vazão foi controlada por um registro e uma bomba hidráulica. Um sistema de automação coletou e processou os dados de forma a permitir a execução dos controles desejados, inclusive a simulação de consumo de água quente. O sistema com circulação natural, isto é, por termossifão, demonstrou ter uma grande habilidade de se adaptar à disponibilidade de energia com as temperaturas da água armazenada, por meio da otimização da velocidade da troca de calor. Foi desenvolvido, tomado como referência o escoamento por termossifão, um modelo de operação para sistemas diretos ativos que calcula a vazão com base no monitoramento das temperaturas das extremidades das tubulações que interligam o reservatório e os coletores, temperatura do ar, radiação solar disponível e vazão no instante anterior. O modelo foi testado experimentalmente e a operação do sistema ativo resultou em significativa melhora na eficiência.

Palavras-chave: sistemas prediais, aquecimento solar de água, automação predial.

## ABSTRACT

The focus of this work is the experimental study of the effect of water control discharge in solar water-heating systems with a large number of collectors where the temperature gradient is not sufficient for thermosiphon water circulation. The performance of the system was evaluated under different conditions of solar radiation, flow rate, temperature differential between solar collectors and the storage tank and under transient conditions. The results were compared to a collector's performance equation of the quasi-steady-state model according to ABNT-NBR 10184/1988 standard. The tests were carried out on two systems each one constituted of two manufacturing collectors and one thermal tank. In one of these systems the flow between the collectors and storage occurred by thermosiphoning, i.e., by natural convection and without discharge restrictions. In the other, the flow control was done by means of a valve and a pump. In order to allow the execution of the desired controls, including hot water consumption, data were collected and controlled through an automation system. The system of natural circulation shows a great ability to adaptation of disposal energy with water temperature stored, through velocity of heat exchange optimization. An operation model was developed, having thermosiphoning water circulation as reference, for active direct circulation systems that calculate the discharge taking into consideration the monitoring of the differential temperature between solar collectors and the storage tank, the air temperature, solar radiation available and the flow rate on previous time interval. This model was experimentally tested and resulted in a significant improvement in performance of the system operation.

Key words: building systems, solar water heating, building automation.

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b> .....	01
<b>1.1 – Objetivo</b> .....	06
<b>2 – REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	07
<b>2.1 – Radiação Solar</b> .....	07
<b>2.1.1 – Medição da radiação solar</b> .....	08
<b>2.1.2 – Direção da radiação solar direta</b> .....	09
<b>2.1.3 – Radiação extraterrestre em uma superfície horizontal</b> .....	13
<b>2.1.4 – Atenuação da radiação solar na atmosfera</b> .....	14
<b>2.1.5 – Estimativas da radiação solar na superfície terrestre</b> .....	16
<b>2.1.5.1 – Frequência da ocorrência de dias e horas claros ou nublados</b> .....	17
<b>2.1.5.2 – Estimativas das componentes direta e difusa da radiação global</b> .....	18
<b>2.1.5.3 – Radiação solar direta em dias claros</b> .....	20
<b>2.1.5.4 – Estimativa da energia solar com dados de horas de radiação direta</b> ..	21
<b>2.1.6 – Radiação total em uma superfície plana inclinada</b> .....	23
<b>2.1.7 – Efeitos da orientação de coletores planos no aproveitamento da energia solar</b> .....	26
<b>2.2 – Componentes do sistema de aquecimento solar de água</b> .....	27
<b>2.2.1 – Coletores de calor solar para aquecimento de água</b> .....	30
<b>2.2.2 – Reservatórios de água quente</b> .....	39
<b>2.2.2.1 – Estratificação térmica nos reservatórios de água quente</b> .....	42
<b>2.2.2.2 – Perdas térmicas nos reservatórios de água quente</b> .....	51
<b>2.2.3 – Perdas de calor nas tubulações</b> .....	62
<b>2.2.4 – Fonte auxiliar de energia</b> .....	64
<b>2.3 – Sistemas diretos de aquecimento solar de água</b> .....	66
<b>3 – MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	73
<b>3.1 – Descrição da montagem e equipamentos</b> .....	73
<b>3.1.1 – Escolha da inclinação dos coletores</b> .....	77
<b>3.2 – Sistema de automação</b> .....	80



<b>3.3 – Cálculo das variáveis intervenientes</b> .....	82
<b>3.3.1 – Temperatura média do reservatório de água quente</b> .....	82
<b>3.3.2 – Energia da água quente consumida</b> .....	84
<b>3.3.3 – Energia da água fria que entra no reservatório de água quente</b> .....	86
<b>3.3.4 – Energia da água fria utilizada na mistura para o consumo</b> .....	87
<b>3.3.5 – Energia solar</b> .....	89
<b>3.3.5.1 – Energia solar útil no coletor avaliada pela equação da eficiência</b> .....	89
<b>3.3.5.2 – Energia solar útil recebida pelo reservatório de água quente</b> .....	91
<b>3.3.5.3 – Energia solar útil no coletor avaliada pela energia absorvida pela água</b> .....	95
<b>3.3.6 – Energia elétrica útil</b> .....	96
<b>3.3.7 – Perdas térmicas no reservatório de água quente utilizando o coeficiente global de perda de calor</b> .....	97
<b>3.3.8 – Perdas térmicas no reservatório de água quente devido à recirculação de água no coletor</b> .....	97
<b>3.3.9 – Energia utilizável</b> .....	98
<b>3.3.10 - Balanço de energia no reservatório de água quente</b> .....	98
<b>3.4 – Variáveis de avaliação do desempenho</b> .....	99
<b>3.4.1 – Eficiência do sistema no aproveitamento da energia solar</b> .....	100
<b>3.4.2 – Fração solar</b> .....	100
<b>3.4.3 – Fator de carga utilizável</b> .....	102
<b>3.4.4 – Massa equivalente de água no reservatório</b> .....	102
<b>3.4.5 – Coeficiente de melhoria da energia utilizável</b> .....	103
<b>3.4.6 – Relação entre o fator de carga utilizável e a eficiência</b> .....	104
<b>3.4.7 – Índice de estratificação térmica</b> .....	104
<b>4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	106
<b>4.1 – Ensaio preliminares</b> .....	106
<b>4.1.1 – Avaliação do coeficiente global de perda de calor dos reservatórios</b> ...	106
<b>4.1.2 – Ensaio de recuperação do reservatório com a fonte auxiliar</b> .....	109
<b>4.2 – Avaliação do desempenho dos sistemas</b> .....	110
<b>4.2.1 – Verificação experimental da influência das vazões no rendimento dos coletores</b> .....	116

<b>4.2.2 – Verificação experimental das vazões de consumo e do acionamento da fonte auxiliar de calor .....</b>	<b>123</b>
<b>4.2.3 – Verificação experimental da influência do controle do acionamento da fonte auxiliar de calor .....</b>	<b>128</b>
<b>4.2.4 – Observação da estratificação térmica no reservatório de água quente .....</b>	<b>130</b>
<b>4.3 – O modelo proposto .....</b>	<b>145</b>
<b>5 – CONCLUSÕES .....</b>	<b>161</b>
<b>Anexo A – Ensaio de calibração da instrumentação .....</b>	<b>166</b>
<b>Anexo B – Apresentação dos dados .....</b>	<b>180</b>
<b>Anexo C – Valores das vazões e temperaturas do sistema de aquecimento por termossifão .....</b>	<b>218</b>
<b>Anexo D – Modelo de controle da operação da fonte auxiliar de calor .....</b>	<b>221</b>
<b>LISTA DE REFERÊNCIAS .....</b>	<b>225</b>

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

